



Universidade Politécnica

INSTITUTO SUPERIOR DE GESTÃO, CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS - ISGCT

TRABALHO DE FINAL DE CURSO

ENGENHARIA CIVIL

TEMA:

**REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM
COMPÓSITO DE FIBRAS DE CARBONO**

Supervisor: Prof. Doutor Eng^o. Ruy Moreira Cravo

Selton Augusto Machuinde

Estudante nr^o: 442036

Junho de 2022

SELTON AUGUSTO MACHUINDE

TEMA:

**REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM
COMPÓSITO DE FIBRAS DE CARBONO**

Monografia submetida ao curso de Engenharia Civil da Universidade Politécnica como parte dos requisitos para a obtenção do grau de licenciatura em Engenharia Civil.

Supervisor: Prof. Doutor Eng^o. Ruy Moreira Cravo

Maputo, Junho de 2022

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aos ____ de _____ de _____ foi apresentada a presente Monografia, numa defesa pública, na qual lavrou-se uma Acta onde consta que o autor foi aprovado com a classificação de _____ valores, feita pelos seguintes Membros de Júri:

Presidente:

Supervisor:

Arguente:

Maputo, aos _____ de _____ de _____

DEDICATÓRIA

Primeiramente dedico a realização deste trabalho aos meus pais Augusto Isabel e Isilda Brás, minha irmã Angelina Machuinde, porque graças a eles tive a oportunidade de realizar o curso de engenharia civil assim como força para realizar este trabalho.

Dedico também este trabalho a todos os meus colegas, docentes e amigos que de forma directa ou indirectamente me ajudaram em toda minha caminhada académica assim como na realização deste trabalho, pois o apoio de cada um foi determinante para a minha trajectória.

Dedico também a Deus, pois através da sua presença permitiu-me encontrar forças para realizar este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de prestar os meus agradecimentos a Deus que sempre esteve comigo durante a minha formação académica e também na realização deste trabalho de final do curso, pois reconheço que não teria esta oportunidade sem a sua graça.

Agradeço também aos meus pais por me terem dado a oportunidade de realizar a formação em Engenharia Civil e por todo apoio por eles dado, à minha irmã pelo seu apoio e força, e a minha família que esteve ao meu lado durante a minha formação académica.

Gostaria de agradecer também ao Prof. Doutor Eng^o Ruy Moreira Cravo, supervisor deste trabalho, por me receber bem e pela disponibilidade em me orientar na realização deste trabalho, por todo conhecimento que me foi partilhado por ele durante a minha formação académica assim como durante a realização deste trabalho.

Finalmente desejo manifestar os meus agradecimentos, aos meus colegas que estiveram sempre ao meu lado durante a minha formação académica, aos meus docentes por todo conhecimento que nos foi passado, aos meus amigos pessoais que tiveram um papel determinante na minha formação académica e na realização deste trabalho.

PARECER DO SUPERVISOR

PROF. DOUTOR ENG.º RUY MOREIRA CRAVO

CANDIDATO SELTON AUGUSTO MACHUINDE

MONOGRAFIA:

“REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM COMPÓSITO DE FIBRAS DE CARBONO”

Trabalho de projecto de fim de curso apresentado a Universidade Politécnica – A Politécnica como parte dos requisitos de obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Civil.

O Candidato **SELTON AUGUSTO MACHUINDE**, estudante finalista do curso de Licenciatura em Engenharia Civil nesta Universidade, realizou o seu trabalho final na área de reforço estrutural de vigas de betão armado com compósito de fibras de carbono, onde aplicou de forma conhecedora os conhecimentos adquiridos ao longo da sua formação.

O trabalho desenvolvido cumpre com as normas de escrita e apresentação de trabalhos de fim de curso, nesta Universidade, pelo que eu, Ruy Moreira Cravo, seu Supervisor, recomendo a submissão do relatório do trabalho para a defesa pública conforme as normas da Universidade Politécnica.

Maputo, 17 de Maio de 2022

O Supervisor do Trabalho

Ruy Moreira Cravo

Prof. Doutor Eng.º

RESUMO:

Autor: Selton Augusto Machuinde

Grau Académico: Licenciatura em Engenharia Civil

Tema: Reforço estrutural de vigas de betão armado com compósito de fibras de carbono

Universidade: A Politécnica

Faculdade: Instituto Superior de Gestão, Ciências e Tecnologias - ISGCT

Supervisor: Prof. Doutor Eng^o. Ruy Moreira Cravo

Data: Junho de 2022

Palavras-Passe: Reforço estrutural, problemas patológicos, betão armado, fibras de carbono, encamisamento da secção transversal.

Neste trabalho contém leitura bibliográfica sobre o reforço estrutural de vigas de betão armado utilizando compósito de fibras de carbono (CFC), em alternativa ao reforço estrutural de vigas de betão armado por encamisamento da secção transversal, com a finalidade de apresentar a técnica de reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono como uma proposta para reforçar e reabilitar estruturas de betão armado. A utilização deste método de reforço estrutural tem crescido bastante devido as suas diversas vantagens quanto a sua resistência à tração maior que a do aço tradicional de construção. O sistema apresenta alta resistência mecânica, leveza e imunidade à corrosão (Machado, 2010). Sua aplicação é simples, rápida e não provoca grandes mudanças na geometria da peça. Porém, ainda é uma técnica com custo elevado e que necessita de mão de obra especializada para execução do serviço.

A aplicação desta técnica de reforço estrutural exige muitos cuidados na preparação do substrato ao qual o reforço será aplicado, visto que há necessidade de garantir que o reforço tenha elevado

grau de aderência entre o compósito e o betão para garantir que a transferência das tensões de corte aconteça com eficiência e segurança.

O dimensionamento do reforço a flexão assim como ao esforço transversal são feitos mediante os princípios de Bernoulli, equilíbrio de forças no estado limite último. Sendo que devido a ausência de normas nacionais, são utilizadas as metodologias apresentadas por Machado (2010) e as recomendações do ACI 440.2R (ACI, 2008), norma americana.

O reforço estrutural tem como um dos principais objectivos a reabilitação ou o reforço de estruturas visando garantir a segurança dos utentes das mesmas, portanto este método de reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono mostra ser uma solução eficiente para atender a muitos casos de reforço de estruturas de betão armado de uma forma mais eficiente e evoluída tecnicamente.

ABSTRACT:**Author:** Selton Augusto Machuinde**Academic Degree:** Licenciatura em Engenharia Civil**Title:** Reforço estrutural de vigas de betão armado com compósito de fibras de carbono**University:** A Politécnica**Faculty:** Instituto Superior de Gestão, Ciências e Tecnologias - ISGCT**Work Supervisor:** Prof. Doutor Eng^o. Ruy Moreira Cravo**Date:** June de 2022**Keywords:** Structural strengthening, pathological problems, reinforced concrete, carbon fibers, cross section jacketing.

In this paper contains literature reading on the structural strengthening of reinforced concrete beams using carbon fibre composite (CFC), as an alternative to the structural strengthening of reinforced concrete beams by cross section jacketing, with the purpose of presenting the structural strengthening technique using carbon fibre composite as a proposal to strengthen and rehabilitate reinforced concrete structures. The use of this method of structural reinforcement has grown a lot due to its several advantages as its tensile strength is higher than that of traditional construction steel. The system presents high mechanical strength, lightness and immunity to corrosion (Machado, 2010). Its application is simple, fast and does not cause major changes in the geometry of the part. However, it is still a technique with high cost and requires skilled labour to perform the service.

The application of this structural reinforcement technique requires much care in the preparation of the substrate to which the reinforcement will be applied, since there is the need to ensure that the

reinforcement has a high degree of adhesion between the composite and the concrete to ensure that the transfer of shear stresses happens efficiently and safely.

The dimensioning of the reinforcement to bending as well as shear is done through Bernoulli's principles, balance of forces in the ultimate limit state. Due to the absence of national standards, the methodologies presented by Machado (2010) and the recommendations of ACI 440.2R (ACI, 2008), American standard, are used.

The structural strengthening has as one of the main objectives the rehabilitation or strengthening of structures aiming to ensure the safety of users of the same, so this method of structural strengthening using carbon fibers composite shows to be an efficient solution to meet many cases of reinforcement of reinforced concrete structures in a more efficient and technically evolved way.

Índice

1. Capítulo I: A Metodologia de Investigação:	16
1.1. Introdução:	16
1.2. Objectivos:	18
1.2.1. Objectivo Geral:	18
1.2.2. Objectivos Específicos:	18
1.3. O Processo de Investigação:	18
1.4. O Problema a ser Investigado:	19
1.5. A Pergunta a Investigar e as Hipóteses a Considerar:	20
1.5.1. Formulação de Hipóteses:	20
1.5.2. Perguntas Investigativas:	20
1.6. Constrangimentos Previstos na Investigação:	21
1.6.1. As Limitações do Trabalho:	21
1.6.2. As Delimitações do Trabalho:	21
1.7. Os Capítulos Propostos e seus Conteúdos:	22
1.8. A Importância do Tema Proposto para a Investigação:	23
1.9. Leitura Bibliográfica:	24
2. Capítulo II: Apresentação dos Métodos de Reforço Estrutural	26
2.1. Métodos de Reforço de Estruturas de Betão Armado:	26
2.1.1. Reforço de Estruturas de Betão Armado por Encamisamento das Secções:	26
2.1.1.1. Tecnologias utilizadas no encamisamento:	26
2.1.1.2. Disposições de armaduras adicionais:	28
2.1.1.3. Ligação entre o betão inicial e o material de adição:	29
2.1.1.4. Verificação da segurança:	29
2.1.2. Reforço Estrutural Utilizando Fibras de Carbono:	33
2.1.2.1. Produção das fibras de carbono:	33
2.1.2.2. Características das fibras de carbono:	34
2.1.2.3. Estrutura das fibras de carbono:	34
2.1.2.4. Matriz polimérica:	35
2.1.2.5. Variação de temperatura:	36
2.1.2.6. Propriedade dos compósitos:	37
2.1.2.7. Resistência e rigidez:	38
2.1.2.8. Fadiga:	38

2.1.2.9.	Fluência:.....	39
2.1.2.10.	Coefficiente de expansão térmica:	39
2.1.2.11.	Resistência ao fogo:.....	39
2.1.2.12.	Vantagens e desvantagens:.....	41
2.1.2.13.	Aplicações dos sistemas compostos:	41
3.	Capítulo III: Procedimentos para a Aplicação do Compósito de Fibras de Carbono:.....	45
3.1.	Processo Construtivo dos Sistemas Compostos:.....	45
3.1.1.	Recuperação do Substrato de Betão:.....	46
3.1.2.	Preparação da Superfície para o Recebimento do Sistema Composto:	47
3.1.3.	Aplicação do Imprimador Primário:	48
3.1.4.	Aplicação do Regularizador de Superfícies:.....	48
3.1.5.	Corte e Imprimação das Fibras de Carbono:.....	49
3.1.6.	Segunda Camada de Saturação:.....	50
3.1.7.	Revestimento Estético e/ou Protector:	50
4.	Capítulo IV: Dimensionamento do Reforço com Fibras de Carbono:.....	52
4.1.	Comportamento de Vigas Reforçadas a Flexão	52
4.1.1.	Modos de Ruptura	55
4.1.2.	Dimensionamento do Reforço à Flexão com Fibras de Carbono.....	56
4.1.2.1.	Verificação da ductibilidade	57
4.1.2.2.	Procedimentos para o dimensionamento do reforço a flexão	57
4.2.	Comportamento de Vigas Reforçadas ao Esforço Transverso	61
4.2.1.	Dimensionamento do Reforço ao Esforço Transverso com Fibras de Carbono.....	63
4.2.1.1.	Configurações de um reforço ao esforço transverso	63
4.2.1.2.	Critérios para a seleção de uma configuração de reforço ao esforço transverso	65
4.2.1.3.	Princípios gerais de dimensionamento:.....	66
4.2.1.4.	Procedimentos para o dimensionamento do reforço ao esforço transverso.....	72
5.	Capítulo V – Estudo Comparativo das Técnicas e Procedimentos de Cálculo:	75
5.1.	Reforço da Viga por Encamisamento da Secção Transversal.....	76
a)	Reforço a flexão:	77
b)	Reforço ao esforço transverso:.....	79
5.2.	Reforço da Viga com Compósito de Fibras de Carbono	80
a)	Reforço a flexão:	80
b)	Reforço ao esforço transverso:.....	83

6. Capítulo VI - Conclusões e Recomendações:	85
6.1. Conclusão:	85
6.2. Recomendações:	86
7. Referências Bibliográficas:	88

Lista de figuras e fotografias:

Figura 1. – Reforço de vigas a) só a flexão; b) e c) flexão e esforço transversal (Fonte: A. Gomes e J. Appleton).

Figura 2. – Cálculo do momento flector resistente (Fonte: A. Gomes e J. Appleton).

Figura 3. – Tensões de corte (Fonte: A. Gomes e J. Appleton).

Figura 4. – Representação esquemática de um sistema de fibras de carbono (Fonte: Machado, 2010).

Fotografia 1. – Reforço de viga de betão à flexão e ao corte (Fonte: Machado, 2010).

Fotografia 2. – Reforço de lajes à flexão nas duas direções (Fonte: Machado, 2010).

Figura 5. – Reforço de pilares à flexão e confinamento (Fonte: Machado, 2010).

Fotografia 3 – Colunas reforçadas por confinamento para efeitos sísmico (Fonte: Machado, 2010).

Figura 6. – Etapas construtivas dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono (Fonte: Machado, 2010).

Figura 7. – Limpeza da superfície de instalação do sistema. (Fonte: G. Fontes e L. Cunha, 2017).

Figura 8. – Arredondamento dos cantos vivos (Fonte: Machado, 2010).

Figura 9. - Critérios de Bernoulli (Fonte: Machado, 2010).

Figura 10. - Determinação da deformação inicial ϵ_{bi} (Fonte: Machado, 2010).

Figura 11. - Forças atuantes na secção transversal da viga (Fonte: B. R. G. de Lorenzi, 2018).

Figura 12. – Configurações possíveis ao cisalhamento (Fonte: Machado, 2010).

Figura 13. – Características geométricas da secção transversal da viga.

Lista de tabelas:

Tabela 1. – Coeficientes de dilatação térmica das fibras de carbono (Fonte: Machado, 2010).

Tabela 2. – Características genéricas das fibras de carbono (Fonte: Machado, 2010).

Tabela 3. - Equações para dimensionamento do Reforço à Flexão de vigas com CFC (Fonte: B. R. G. de Lorenzi, 2018).

Tabela 4. - Equações para determinação do comprimento de ancoragem do CFC (Fonte: B. R. G. de Lorenzi, 2018).

Tabela 5. - Equações para o dimensionamento do Reforço ao Cisalhamento da Viga com CFC (Fonte: B. R. G. de Lorenzi, 2018).

Tabela 6. – Dados da fibra de carbono considerada (Fonte: Catálogo Sika - Sistemas de reforço estrutural).

1. Capítulo I: A Metodologia de Investigação:

Neste trabalho relacionado com o reforço estrutural de vigas de betão armado utilizando compósito de fibras de carbono será desenvolvido com o intuito de apresentar esta técnica pouco utilizada para o reforço e recuperação de construções, visando procurar compreender de que forma este método pode ajudar a solucionar casos de reforços em construções que necessitam de intervenção na sua reabilitação estrutural.

Deste modo para o efeito, será conduzida uma investigação baseada no paradigma Positivista, sendo que o propósito da investigação será descritiva, onde serão descritos os fenómenos tal como eles se apresentam, considerando a possibilidade de estudos empírico, utilizando os métodos de coleta de dados secundários que de acordo com Hussey & Hussey (1997:149), são aqueles que já existem, como os obtidos de livros, relatórios, contabilidade de empresas, etc.

Realizar-se-á ainda, uma pertinente leitura bibliográfica sobre o tema para dar suporte ao trabalho.

1.1. Introdução:

As estruturas de betão armado são afectadas por diversas patologias ao longo da sua vida útil, que podem comprometer significativamente em sua segurança, dentre os factores que podem causar patologias nas diversas estruturas de betão armado tem-se as falhas de projecto, falhas na execução e falhas devido à utilização da estrutura.

O projecto de uma estrutura é de fundamental importância para que se possa evitar os problemas patológicos associados aos factores referidos anteriormente. Portanto ao se proceder com a execução de uma estrutura de betão armado, é necessário que se cumpram com todas as recomendações e especificações técnicas de modo a evitar eventuais problemas patológicos na estrutura tais como, fissuras, rachas, fendas, corrosão das armaduras, etc.

Quando a estrutura apresenta problemas patológicos referidos anteriormente, devem ser tomadas providências e precauções imediatas para evitar que a estrutura alcance o seu estado-limite ou que entre em colapso. Daí que é necessário o seu reforço estrutural para a sua recuperação ou reabilitação visando garantir a segurança e a durabilidade da estrutura em causa.

No mercado existem vários tipos de reforço, todos com a finalidade de reabilitar a estrutura, dentre eles temos o reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono. Este tipo de reforço estrutural tem sido pouco utilizado como solução para restaurar estruturas de betão armado devido ao seu elevado custo, mas que em contrapartida, segundo Machado (2010), normalmente os sistemas de compostos estruturados que utilizam as fibras de carbono como elemento resistente apresentam extraordinária resistência mecânica, extraordinária rigidez, bom comportamento a fadiga e a actuação de cargas cíclicas, elevada resistência a ataques químicos diversos, não são afectadas pela corrosão por se tratar de um produto inerte, estabilidade térmica e reológica, extrema leveza devido ao baixo peso específico do sistema (da ordem de $1,6\text{g/cm}^3$ a $1,9\text{g/cm}^3$, cerca de 5 vezes menor do que o do aço estrutural) chegando-se ao ponto de não se considerar o seu peso próprio nos reforços.

A utilização de fibra de carbono na construção civil teve seu início no distrito de Kobe, Japão, em 1995, após sismos demandarem uma rápida execução de reforços estruturais em construções da região (M. V. C. Serra & T. H. L. da Silva).

Nos anos 80 no Japão ocorriam abalos sísmicos que ocasionava danificações as estruturas, onde mostrou-se a necessidade de recuperar o mais rápido possível, portanto o reforço com fibra de carbono surgiu como uma opção. As fibras de carbono podem ser também utilizadas para o aumento da capacidade resistente, a flexão e ao esforço transversal de vigas e lajes, processo que, no entanto, exige muito cuidado no desenvolvimento dos detalhes que devem ser adotados para o sistema de amarração do compósito, assim como a mais detalhada análise das tensões de deslizamento na interface entre o compósito e o betão (M. V. C. Serra & T. H. L. da Silva).

No desenvolvimento deste trabalho serão abordados os conceitos e as características do sistema de compósito de fibra de carbono de modo a apresentar este material como reforço estrutural a flexão e ao esforço transversal em vigas de betão armado, onde será apresentado um método para o dimensionamento utilizando o compósito de fibra de carbono no reforço estrutural de vigas, sendo que devido a ausência de normas nacionais que estabeleçam métodos de cálculo para o reforço estrutural, são adoptados neste trabalho as recomendações da ACI 440.2R (ACI, 2008) e a metodologia apresentada por Machado (2010) para o dimensionamento do reforço a flexão e ao

esforço transversal de vigas, como também serão apresentados os procedimentos e cuidados necessários para a sua execução na prática.

1.2. Objectivos:

1.2.1. Objectivo Geral:

Este trabalho tem como objectivo geral apresentar o compósito de fibra de carbono como um material utilizado no reforço estrutural em estruturas de betão armado, bem como propor o seu uso no mercado da construção civil em Moçambique.

1.2.2. Objectivos Específicos:

- Tem como objectivo apresentar os conceitos e características relativos ao material empregue para este tipo de reforço estrutural visando apresentar o que são compósitos de fibras de carbono;
- Tem como objectivo apresentar este método pouco empregue de reforço estrutural visando mostrar as suas vantagens e a sua eficiência na utilização deste tipo de reforço estrutural na construção civil;
- Tem como objectivo apresentar esta técnica de reforço estrutural de modo a incentivar o seu uso no mercado da construção civil em Moçambique;
- Tem como objectivo apresentar esta técnica de reforço estrutural como um avanço da tecnologia na construção civil.
- Tem como objectivo mostrar os procedimentos que devem ser seguidos para a execução ou aplicação deste tipo de reforço estrutural;
- Tem como objectivo apresentar os procedimentos para a concepção e dimensionamento do reforço estrutural com compósito de fibras de carbono;

1.3. O Processo de Investigação:

A construção civil tem evoluído bastante em Moçambique visto que o país encontra-se em via de desenvolvimento, como também recentemente tem sido afectado por diversas calamidades naturais

que ocasionaram danificações em muitas construções, e tendo deixado várias infraestruturas em estado de degradação carecendo de intervenção para a sua reabilitação e recuperação.

Nessa sequência, surge a necessidade de se investigar e pesquisar métodos inovadores e eficientes para se realizar reabilitações e recuperações de construções danificadas nas regiões afectadas pelas intempéries, entretanto não descartando as razões referidas anteriormente pelo qual este trabalho é desenvolvido.

Portanto para a elaboração deste trabalho seguir-se-á a seguinte estrutura:

- Identificação do tópico a ser investigado;
- Definição do problema a ser investigado;
- Definição da pergunta a investigar e das hipóteses a considerar;
- Identificação do paradigma de investigação e determinação da metodologia de investigação a ser aplicada;
- Definição dos objectivos gerais e específicos a atingir com o trabalho;
- Determinação das limitações e delimitações da investigação;
- Determinação do método de coleta de dados e informação;
- Análise e interpretação de dados;
- Escrever o documento final.

1.4. O Problema a ser Investigado:

A necessidade de cumprir com as recomendações e especificações técnicas de um projecto de estrutura é de grande importância, uma vez que só assim é possível evitar grande parte dos eventuais problemas previstos que afectam as construções. Estes problemas surgem na sequência de factores patológicos tais como as falhas na execução assim como falhas devido à utilização da estrutura que de alguma forma podem comprometer a vida útil destas sem sofrerem qualquer intervenção para a sua recuperação caso necessária. Nesse sentido, o problema a ser investigado pode ser formulado como abaixo se indica:

“ As falhas na execução e devido à utilização de estruturas de betão armado ocasionam o surgimento de problemas patológicos carecendo de reforço estrutural. ”

1.5. A Pergunta a Investigar e as Hipóteses a Considerar:

Quando se executa uma estrutura de betão armado em que não se cumpre com todas as recomendações técnicas previstas no projecto, a estrutura fica condicionada devido a essas falhas na execução que comprometem a sua segurança, surgindo problemas patológicos que podem conduzir a estrutura do seu estado limite de utilização para o seu estado limite último que é o que se pretende evitar.

Neste contexto, a pergunta a ser investigada pode ser formulada da seguinte forma:

“ Qual é o impacto que as falhas na execução assim como devido à utilização da estrutura têm no surgimento de problemas patológicos ? ”

1.5.1. Formulação de Hipóteses:

De acordo com Leed & Ormond (2001:60), hipóteses são tentativas para orientar a investigação sobre um dado problema, ou providenciar possíveis explicações para as observações feitas.

Hussey & Hussey (1997:126), acrescenta ainda que as hipóteses a considerar devem ser formuladas de forma a identificar as variáveis dependentes e as variáveis independentes que facilitarão a formulação das hipóteses.

(H0) – *“ Não é a falha na execução assim como devido à utilização da estrutura que ocasionam o surgimento de problemas patológicos ”*

(H1) – *“ A falha na execução assim como devido à utilização da estrutura ocasionam o surgimento de problemas patológicos ”*

1.5.2. Perguntas Investigativas:

De acordo com o problema a ser investigado, a pergunta a investigar e as hipóteses consideradas, poder-se-á formular as seguintes perguntas investigativas que vão ajudar numa melhor compreensão do assunto a investigar:

- Quais são as causas do surgimento de problemas patológicos ?
- Quais são as consequências devido a falhas na execução assim como devido à utilização da estrutura ?
- Qual é a necessidade do reforço estrutural ?
- Quais são as vantagens do reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono ?
- Será que o reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono é mais viável em relação ao reforço estrutural por encamisamento das secções ?
- Será que o reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono irá melhorar a qualidade dos serviços de reabilitação e recuperação de construções executadas no país ?
- Qual é a razão de este método de reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono ser pouco utilizado ?

1.6. Constrangimentos Previstos na Investigação:

1.6.1. As Limitações do Trabalho:

Como em vários outros trabalhos desta natureza, surgiram problemas que influenciaram negativamente na pesquisa, dos quais se podem citar abaixo:

- Falta de bibliografias nacionais para a consulta e suporte ao trabalho em análise;
- Disponibilidade apenas em formato digital de informação para consulta e suporte ao trabalho em análise;
- Falta de regulamentos e normas para o dimensionamento de reforço estrutural de vigas de betão armado;
- Falta do conhecimento da utilização deste método de reforço estrutural em Moçambique.

1.6.2. As Delimitações do Trabalho:

O trabalho de investigação centrar-se-á em apenas manuais, artigos científicos, trabalhos de culminação de curso de bibliografias brasileiras e portuguesas, e visa apresentar uma proposta de uma técnica nova, com o objectivo de contribuir no avanço da tecnologia da construção civil, não

tendo conteúdos obtidos em campo ou na vida cotidiana, contudo conteúdos estes comprovados pelas respetivas normas de carácter verdadeiros.

1.7. Os Capítulos Propostos e seus Conteúdos:

Por forma a se atingir os objectivos propostos, para a realização do trabalho de final de curso, este terá a seguinte estrutura de organização:

CAPÍTULO 1 – Metodologia de investigação:

Neste capítulo será apresentada a metodologia usada no trabalho, o processo de investigação e as hipóteses a considerar, limitações, delimitações, os objetivos específicos e gerais e a importância do tema, apresentados de uma forma clara, bem como outros recursos que poderão ser usados com intuito de enriquecimento trabalho.

CAPÍTULO 2 – Apresentação dos métodos de reforço estrutural:

Neste capítulo, far-se-á uma revisão bibliográfica pertinente ao tema utilizando manuais, artigos científicos, trabalhos académicos e internet, que contribuirão para uma análise mais profunda do problema a ser investigado, visando descrever os conceitos referentes ao tema em questão de modo a introduzir o assunto para uma melhor compreensão e análise dos conteúdos apresentados na sequência do trabalho.

CAPÍTULO 3 – Procedimentos para a aplicação do reforço com fibras de carbono:

Neste capítulo, far-se-á uma revisão bibliográfica pertinente ao tema, apresentando os principais procedimentos necessários para a execução ou aplicação na prática do reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono.

CAPÍTULO 4 – Dimensionamento do reforço com fibras de carbono:

Neste capítulo, far-se-á uma revisão bibliográfica pertinente ao tema de forma a apresentar os principais procedimentos de cálculo necessários para a concepção e dimensionamento do compósito de fibra de carbono a ser empregue num reforço.

CAPÍTULO 5 – Estudo de caso:

Neste capítulo, far-se-á um estudo de caso pertinente ao tema onde serão apresentados cálculos referentes a uma viga de betão armado genérica reforçada utilizando as técnicas abordados neste trabalho, visando deste modo obter conclusões referentes ao resultados obtidos entre as duas técnicas.

CAPÍTULO 6 - Conclusões e recomendações:

Neste capítulo, far-se-ão as conclusões respeitantes ao estudo em investigação, e com base nessas conclusões far-se-ão recomendações de modo a incentivar o uso do reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono em Moçambique.

1.8. A Importância do Tema Proposto para a Investigação:

As construções têm apresentado vários tipos de problemas patológicos que comprometem as mesmas, desde a sua segurança até ao seu desconforto estético. Esses problemas são devido a vários factores tais como as falhas de projecto, falhas na execução, falhas devido à utilização da estrutura, etc.

Em Moçambique, a maioria das construções, sobretudo obras de pequeno e médio porte, tem-se cometido graves irregularidades na sua execução, onde muitas vezes não se cumpre com todas as recomendações técnicas previstas no projecto, e dessa forma a segurança das construções têm ficado comprometidas. Portanto, vários problemas de carácter patológicos irão surgir, daí que para que se possa garantir a integridade e a segurança dos utentes dessas construções, é necessário que haja uma intervenção visando melhorar, recuperar ou reforçar a capacidade e durabilidade das mesmas.

Por via disso, métodos vêm sido desenvolvidos para o reforço estrutural com o intuito de obter resultados eficientes e mais eficazes que possam cumprir com as funções das quais eles foram previstas.

1.9. Leitura Bibliográfica:

O reforço estrutural é uma forma de recuperação e melhoramento da capacidade portante de uma estrutura, visando garantir a sua segurança face aos problemas patológicos ou ao incremento de cargas que eventualmente podem existir.

Portanto existem muitas formas de se fazer o reforço estrutural de uma estrutura de betão armado, das quais temos o reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono, que é uma técnica pouco utilizada mas que oferece resultados satisfatórios na sua utilização.

O material compósito, conhecido também como apenas compósito, não tem uma definição universalmente aceita. Este pode ser definido como o produto da combinação de dois ou mais materiais, com diferentes propriedades químicas e físicas, que visam a conjugação destas para o alcance de novas propriedades que atendem o objetivo imposto (G. Fontes e L. Cunha, 2017).

Ele geralmente é a combinação de dois componentes: a matriz, que é contínua, e o reforço, que na maioria das vezes é denominado de componente disperso. Juntos, eles formam um novo material, com um desempenho melhor que os elementos separados, com propriedades mecânicas superiores (G. Fontes e L. Cunha, 2017).

As propriedades dos materiais compósitos são mais dependentes do componente de reforço, a sua quantidade e sua geometria tem grande influência no produto final. De acordo com G. Fontes e L. Cunha (2017), o material pode ser classificado em particulares (reforço com partículas), fibrosos (reforço com fibras) e compósitos estruturais. As partículas têm suas dimensões simétricas em todas as direções, já as fibras são compridas, ou seja, a relação diâmetro comprimento é grande (G. Fontes e L. Cunha, 2017).

Um exemplo de reforço com materiais particulares é o betão, onde os agregados trazem mais resistência para a matriz contínua (argamassa), assim como o betão armado, onde temos a combinação da resistência a compressão do betão e a resistência a tracção da armadura.

Segundo G. Fontes e L. Cunha (2017) o material reforçado por fibras, do ponto de vista tecnológico é o mais importante, pois as fibras, na maioria das vezes, apresentam melhores propriedades de resistência e rigidez, o que é interessante no ponto de vista estrutural.

O método mais eficiente encontrado consiste em combinar um material fibroso de alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade com um material de baixo módulo e baixa resistência (G. Fontes e L. Cunha, 2017).

Logo, a fibra de carbono passou a ser usada como material compósito de reabilitação ou restauração de elementos estruturais de betão armado enfraquecidos ou fragilizados com o tempo e de reforço para elementos estruturais em boas condições, possibilitando assim o aumento das cargas solicitantes para corrigir e minimizar eventuais riscos produto de vícios de projecto ou de construção ou para atender mudanças de destinação da estrutura (G. Fontes e L. Cunha, 2017).

2. Capítulo II: Apresentação dos Métodos de Reforço Estrutural

2.1. Métodos de Reforço de Estruturas de Betão Armado:

Para além do reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono existem outros métodos de reforço estrutural que são mais utilizados devido a facilidades de aplicação, maior entendimento das técnicas empregadas e das características dos materiais utilizados e por terem menor custo (G. Fontes e L. Cunha, 2017).

Na sequência apresenta-se um dos vários métodos existentes de reforço de estruturas, que é o reforço de estruturas de betão armado por encamisamento das secções, de modo a analisar esta técnica em comparação com a técnica de reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono.

2.1.1. Reforço de Estruturas de Betão Armado por Encamisamento das

Secções:

O reforço de um elemento por encamisamento consiste no aumento da secção transversal de uma peça de betão armado por meio de adição de uma armadura suplementar e uma camada de betão na qual as armaduras de reforço ficam inseridas (A. Gomes e J. Appleton).

De acordo com J. R. Correia (2011), nesta técnica o reforço estrutural causa mudanças na geometria da peça a ser reforçada, visto que as camadas do novo material cobrem o material existente, encamisando-o.

Segundo A. Gomes e J. Appleton este tipo de reforço apresenta algumas desvantagens pelo facto de ser necessário o aumento das dimensões da secção transversal da peça provocando implicações na arquitectura e requerer um certo tempo até que o betão de encamisamento endureça e a estrutura possa ser posta em serviço.

2.1.1.1. Tecnologias utilizadas no encamisamento:

a) Betões (e argamassas) moldados

Segundo A. Gomes e J. Appleton, é aconselhável que se use materiais de elevada qualidade quando pretendemos fazer um reforço ou reparação estrutural, sendo que para o reforço por encamisamento os materiais a utilizar devem possuir as seguintes características:

- Elevada resistência à compressão;
- Boa aderência;
- Boa trabalhabilidade associada à facilidade de colocação em espaço de difícil acesso;
- Retração pequena;
- Compatibilidade, em termos de deformabilidade, com o betão inicial.

O desempenho quer dos betões, quer das argamassas pode ser melhorado através da utilização de aditivos e de adjuvantes, que ao serem adicionados dão origem a diferentes tipos de materiais, em geral apresentando uma elevada resistência (A. Gomes e J. Appleton).

b) Betão projectado

De acordo com A. Gomes e J. Appleton, este processo é considerado mais adequado quando há grandes volumes de betão a aplicar para o reforço ou reparação de uma estrutura, uma vez que o betão projectado é um processo de aplicação contínua do betão. Existem dois processos de mistura: por via húmida ou por via seca, sendo o mais correntemente utilizado o processo por via seca. Neste processo os inertes e o cimento são misturados e transportados a seco e a água, adicionada na pistola de aplicação, é projectada em paralelo com a mistura de inertes e cimento.

Segundo A. Gomes e J. Appleton, a utilização do betão projectado apresenta as seguintes vantagens:

- Boa aderência ao betão e às armaduras existentes desde que as superfícies sejam convenientemente preparadas;
- Resistência elevada devido à baixa relação água cimento e à grande compacidade;
- Boas características de durabilidade devido à compacidade;
- Economia de cofragens - a utilização de cofragens é apenas necessária em arestas vivas;

- Quando se pretender pode dar-se um acabamento à talocha, dando origem a superfícies lisas e planas. Esta operação não é aconselhável em estruturas inseridas em ambientes muito agressivos porque causa um abaixamento da compacidade da camada superficial. Nestes casos deve-se posteriormente aplicar uma camada de argamassa projectada à qual se dá o acabamento pretendido, não se prejudicando assim a protecção das armaduras.

Apesar de ser bastante utilizada, o método possui como desvantagens o alto de risco de corrosão das armaduras e, conseqüentemente, deterioração da camada de betão do reforço devido ao recobrimento reduzido das armaduras e o aumento da carga permanente na estrutura (G. Fontes e L. Cunha, 2017).

2.1.1.2. Disposições de armaduras adicionais:

Na figura a seguir indica-se o tipo de disposições de armaduras mais utilizadas no encamisamento de vigas.

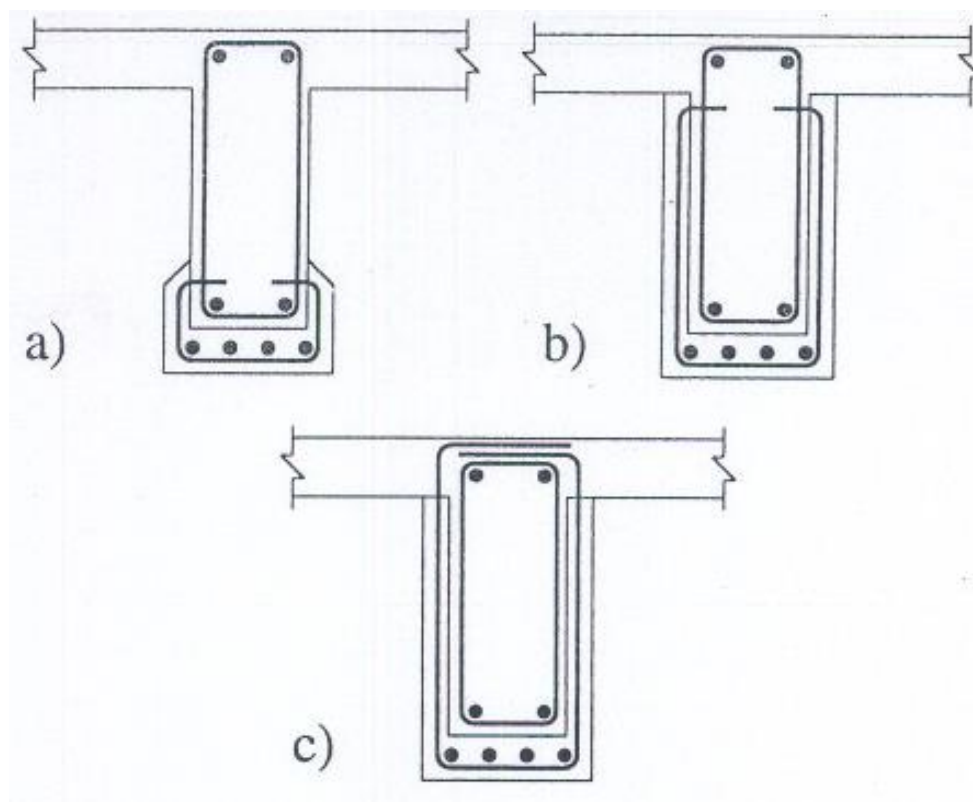


Figura 1. – Reforço de vigas a) só a flexão; b) e c) flexão e esforço transversal (Fonte: A. Gomes e J. Appleton).

2.1.1.3. Ligação entre o betão inicial e o material de adição:

De acordo com A. Gomes e J. Appleton, a aderência entre os materiais é fundamental para que se tenha um bom funcionamento e eficiência de um reforço por encamisamento, de modo a garantir que a peça reforçada funcione como um único elemento (monoliticamente) e não como a associação de duas peças funcionando independentemente uma da outra.

Segundo G. Fontes e L. Cunha (2017), a nova camada de betão e a superfície do elemento estrutural já existente devem funcionar como um elemento monolítico para que o efeito de reforço pretendido seja alcançado.

2.1.1.4. Verificação da segurança:

a) Vigas – Flexão

Na Fig. 2a) apresenta-se o modelo de comportamento no estado limite último de flexão de uma secção reforçada. De acordo com A. Gomes e J. Appleton o dimensionamento pode realizar-se pelo método dos coeficientes globais, admitindo-se um coeficiente de monolitismo para a flexão de $\gamma_{n,M} = 0,9$. Com base nesta hipótese, a determinação do momento flector resistente M_{rd} é efectuada admitindo que a secção tem um comportamento monolítico, havendo uma aderência perfeita (as secções planas mantêm-se planas após a deformação). Deste modo, o cálculo é semelhante ao de uma secção de betão armado, considerando-se duas camadas de armadura que podem ter resistências diferentes, como indicado na Fig. 2b).

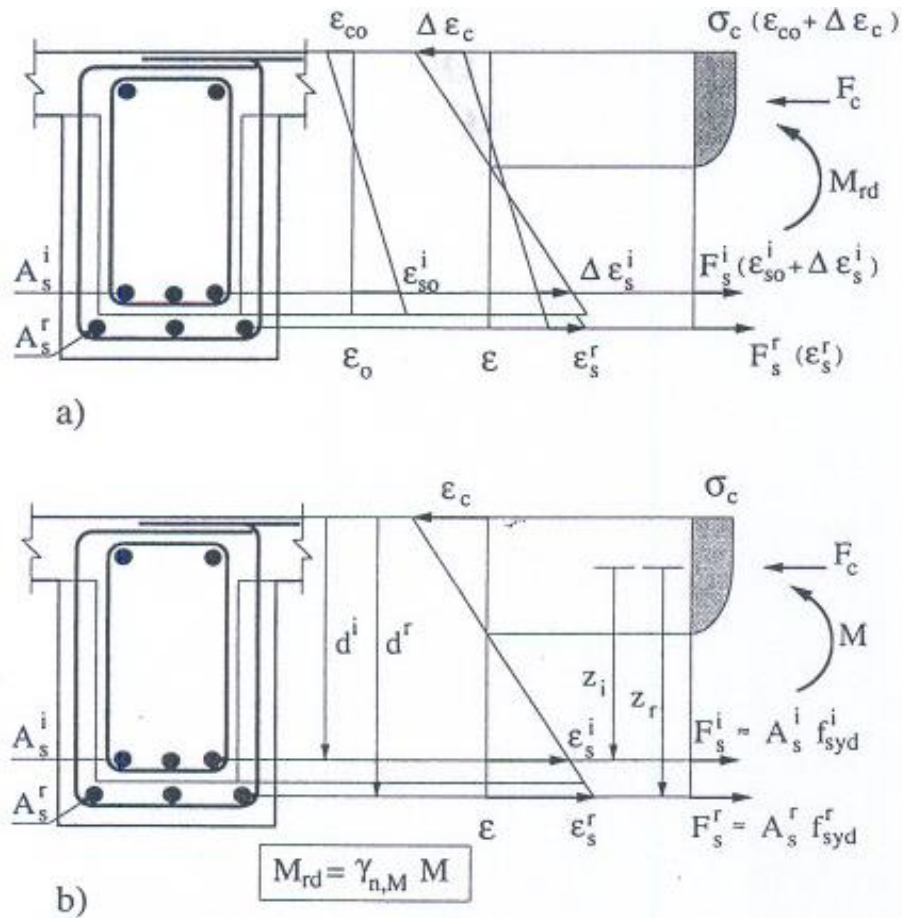


Figura 2. – Cálculo do momento flector resistente (Fonte: A. Gomes e J. Appleton).

De acordo com A. Gomes e J. Appleton, se as duas camadas de armadura estão próximas, o cálculo poderá ser realizado com uma armadura equivalente de área A_s^{eq} , com uma resistência de cálculo f_{syd}^i e posicionada no centro mecânico dessas armaduras definidas pelas equações:

$$M_{rd} = \gamma_{n,M} \{ A_s^{eq} z^{eq} f_{syd}^i = A_s^i z^i f_{syd}^i + A_s^r z^r f_{syd}^r \}$$

$$A_s^{eq} = A_s^i + A_s^r \frac{f_{syd}^r}{f_{syd}^i}$$

$$z^{eq} = \frac{A_s^i z^i f_{syd}^i + A_s^r z^r f_{syd}^r}{A_s^i f_{syd}^i + A_s^r f_{syd}^r}$$

Admitindo $z \approx 0,9 d$ obtém-se:

$$M_{rd} \approx \gamma_{n,M} \left\{ A_s^{eq} 0,9 d^{eq} f_{syd}^i = f_{syd}^i (A_s^i 0,9 d^i + A_s^r 0,9 d^r \frac{f_{syd}^r}{f_{syd}^i}) \right\}$$

Este procedimento permite a utilização de tabelas correntes de dimensionamento de armaduras, sendo a área de reforço determinada através da expressão:

$$A_s^r = \frac{f_{syd}^i}{f_{syd}^r} \left(A_s^{eq} \frac{d^{eq}}{d^r} - A_s^i \frac{d^i}{d^r} \right)$$

Para além do cálculo acima referido deverá ser garantida a segurança da ligação betão de adição/betão inicial. Na figura 3 indica-se a distribuição de tensões tangenciais associadas ao estado limite último de flexão (A. Gomes e J. Appleton).

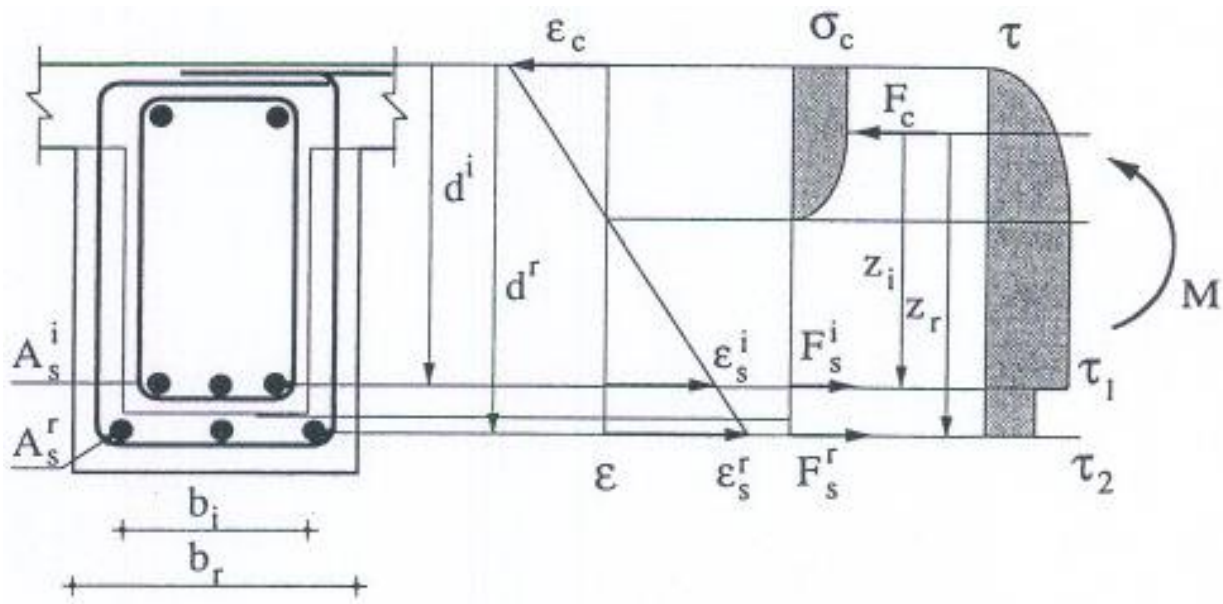


Figura 3. – Tensões de corte (Fonte: A. Gomes e J. Appleton).

Os valores das tensões tangenciais são dados por:

$$\tau_1 = \frac{V_{sd}}{b^r z_{eq}}$$

$$\tau_2 = \frac{V_{sd}}{b^r z_{eq}} \times \frac{A_s^r f_{syd}^r}{A_s^r f_{syd}^r + A_s^i f_{syd}^i}$$

Em que $z^{eq} = \frac{A_s^i z^i f_{syd}^i + A_s^r z^r f_{syd}^r}{A_s^i f_{syd}^i + A_s^r f_{syd}^r}$. Podendo também admitir-se a simplificação:

$$z^r \approx 0,9 d^r; z^i \approx 0,9 d^i \text{ e } z^{eq} \approx 0,9 d^{eq}$$

A verificação da segurança da ligação consiste em garantir que a tensão tangencial entre o betão de adição e o betão inicial τ_2 é inferior ao limite definido na equação:

$$\tau_2 \leq \frac{1}{\gamma_c} \frac{2}{3} f_{ctm}$$

O Eurocódigo 8 - parte 1.4 [6] prescreve para o reforço à flexão por encamisamento os seguintes coeficientes de monolitismo:

Em vigas - $\gamma_{n,M} = 0,90$ e $\gamma_{n,k} = 0,85$.

b) Vigas – Esforço transversal

De acordo com A. Gomes e J. Appleton, o encamisamento de uma viga pode também aumentar a resistência ao esforço transversal. Com esta técnica é possível incrementar a resistência associada às tensões de compressão nas bielas inclinadas do modelo de treliça se for aumentada a largura da alma da secção e o valor da resistência conferida pela armadura transversal através da introdução de novos estribos. O cálculo do esforço transversal resistente pode também ser baseado nos coeficientes globais, através das equações:

$$V_{sd} \leq V_{rd}^{max} = \tau_2^i b_w^i d^i + 0,5 \tau_2^r (b_w^r - b_w^i) d^r$$

$$V_{sd} \leq V_{rd} = V_{cd} + V_{wd}$$

$$V_{cd} = \tau_1^i b_w^i d^i + \tau_1^r b_w^r d^r$$

$$V_{wd} = \gamma_{n,v} (0,9 d^i \frac{A_{sw}^i}{s} f_{syd}^i + 0,9 d^r \frac{A_{sw}^r}{s} f_{syd}^r)$$

Segundo A. Gomes e J. Appleton, os valores para os coeficientes de monolitismo prescritos no EC8 - parte 1.4 [6] são os seguintes: $\gamma_{n,v} = 0,80$ e $\gamma_{n,k} = 0,75$. Neste documento, o reforço ao esforço transversal não deve ser muito elevado, sendo recomendado que: $V_{Rd}^r < 2 V_{Rd}^l$.

2.1.2. Reforço Estrutural Utilizando Fibras de Carbono:

Segundo Machado (2010), as fibras de carbono resultam do tratamento térmico (carbonização) de fibras precursoras orgânicas tais como a poliacrilonitrila (PAN) ou com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH) em um ambiente inerte e, também, através de fibras de rayon.

Segundo BEBER (2003), a fibra de carbono é um material altamente promissor, baseado na força das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono. As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência e grande rigidez. O seu módulo de elasticidade e, de certo modo, alta resistência, dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, do paralelismo entre os eixos das fibras.

2.1.2.1. Produção das fibras de carbono:

De acordo BEBER (2003), todas as fibras de carbono são fabricadas através da pirólise de fibras orgânicas em uma atmosfera inerte. A temperatura de pirólise pode variar entre 1000° C e 3000°C. Temperaturas de processo mais altas geralmente conduzem a fibras com maior módulo de elasticidade. Apenas três matérias-primas alcançaram importância na produção comercial de fibras de carbono. São elas: rayon, poliacrilonitrila (PAN) e PITCH.

Segundo (SANTOS, 2015) a poliacrilonitrila (PAN) é um polímero obtido a partir da polimerização da acrilonitrila (C₃H₃N). É também utilizada na produção de fibras de carbono, material com excelentes propriedades mecânicas.

De acordo com Machado (2010) o processo de produção consiste na oxidação dessas fibras precursoras seguido do processamento a elevadas temperaturas (variando de 1.000°C a 1.500°C para as fibras de carbono e até cerca de 3.000°C para as fibras de grafite).

Nesse processo térmico as fibras resultantes apresentam os átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, característica que confere extraordinária resistência mecânica ao produto final (MACHADO, 2010).

2.1.2.2. Características das fibras de carbono:

Segundo Machado (2010) normalmente, os sistemas compostos estruturados que utilizam as fibras de carbono como elemento resistente apresentam as seguintes características:

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

2.1.2.3. Estrutura das fibras de carbono:

Segundo Machado (2010), os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono, CFC, são constituídos com dois elementos distintos e fundamentais:

- a) A matriz polimérica, a quem cabe a função de manter as fibras que as estruturam coesas, propiciando a transferência das tensões de cisalhamento entre os dois elementos estruturais, betão e fibra de carbono.

- b) O elemento estrutural, constituído pelas fibras de carbono. As fibras dispostas unidirecionalmente dentro das matrizes poliméricas absorvem as tensões de tração decorrentes dos esforços solicitantes atuantes.

De acordo com Juvandes (2002), resultando de um princípio de heterogeneidade, os materiais compósitos são constituídos essencialmente por duas fases. Uma apresenta grande resistência,

elevado módulo de elasticidade e tem a forma de filamentos de pequeno diâmetro – AS FIBRAS. A outra é macia e tem características sinérgicas – A MATRIZ. Esta última, sendo relativamente dúctil, envolve completamente a primeira fase, permitindo boa transferência de tensões entre as fibras interlaminares e no plano (conceito de sinergia).

Segue abaixo um esquema típico do sistema composto estruturado com fibras de carbono. No esquema os bastonetes representam as fibras de carbono imersas na matriz polimérica. Nos plásticos, as armaduras (fibras) são responsáveis pela resistência mecânica do sistema, cabendo à matriz polimérica a transferência das tensões de cisalhamento do substrato de betão para o sistema composto (MACHADO, 2010).

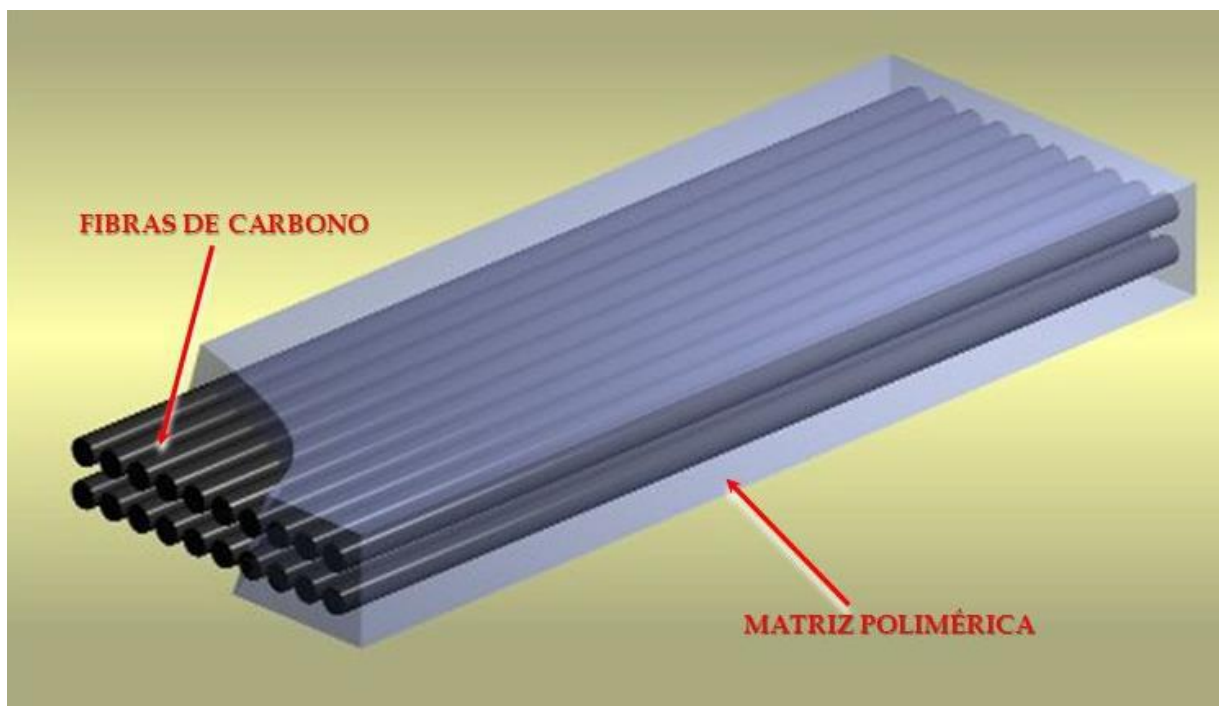


Figura 4. – Representação esquemática de um sistema de fibras de carbono (Fonte: Machado, 2010).

2.1.2.4. Matriz polimérica:

A matriz dos compósitos reforçados com fibras apresenta variadas funções. Em princípio ela é responsável pela união das fibras que compõem o compósito, actuando como o meio através do qual as solicitações externas são transmitidas e distribuídas para as fibras. Apenas uma parcela muito pequena desta solicitação é absorvida pela matriz (BEBER, 2003).

A matriz polimérica tem, também, como função, actuar na protecção das fibras, formando uma camada entre as fibras e o ambiente, protegendo-as contra a abrasão, umidade, oxidação e agentes agressivos, de natureza química e biológica. As propriedades químicas, térmicas e eléctricas dos compósitos são afectadas pela escolha da resina que irá compor a matriz polimérica. Além disso, a matriz polimérica é responsável por manter as fibras posicionadas correctamente (BEBER, 2003).

A matriz polimérica tem necessariamente que ter um alongamento de ruptura muito maior do que o alongamento que ocorre na fibra de carbono, para permitir que a mesma continue a possuir capacidade de carga mesmo após a tensão na fibra ter atingido a sua tensão de ruptura (limite de resistência), ou seja, os sistemas compostos com fibras de carbono devem trabalhar segundo o critério fibra com ruptura frágil, e a matriz polimérica com ruptura dúctil. Dessa maneira fica descartada a possibilidade de que o sistema composto entre em colapso pela ruptura frágil da matriz (MACHADO, 2010).

2.1.2.5. Variação de temperatura:

O coeficiente de dilatação térmica dos compostos unidireccionais de carbono varia segundo suas direcções longitudinal e transversal e dependem do tipo da fibra, da resina, e do volume de fibra no composto (MACHADO, 2010).

Apresenta-se abaixo tabela com os coeficientes de dilatação térmica para um composto unidirecional de fibra de carbono típico (MACHADO, 2002).

Direção	Coefficiente de Dilatação Térmica
Longitudinal (α_L)	$-10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a 0
Transversal (α_T)	$22 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Tabela 1. – Coeficientes de dilatação térmica das fibras de carbono (Fonte: Machado, 2010).

Observe-se que o coeficiente negativo de dilatação térmica indica que o material sofre contração com o aumento de temperatura e dilata com a diminuição da temperatura (somente como referência, o coeficiente de dilatação térmica do betão é da ordem de 4 a $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) (MACHADO, 2010).

De acordo com o REBAP o coeficiente de dilatação térmica do betão é da ordem de $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

A temperatura a partir da qual o polímero começa a “amolecer” é conhecida como temperatura de transição vítrea (TG). Acima dessa temperatura o módulo de elasticidade é significativamente reduzido devido a mudanças em sua estrutura molecular. O valor de TG depende fundamentalmente do tipo da resina, mas normalmente se situa na faixa entre 80°C a 100°C . Em um material composto com as fibras de carbono, que possuem melhores propriedades térmicas do que as resinas podem continuar suportando alguma carga na sua direção longitudinal até que a sua temperatura limite seja alcançada (situada no entorno de 1.500°C). Entretanto, devido à redução da força de transferência por meio da cola entre as fibras, as propriedades de tração do composto como um todo são reduzidas após a ultrapassagem da temperatura de transição vítrea (TG) (MACHADO, 2010).

2.1.2.6. Propriedade dos compósitos:

Os materiais compósitos não são homogêneos. Suas propriedades dependem de vários factores, sendo os mais importantes o tipo da fibra, quantidade (fracção volumétrica) e sua configuração na matriz polimérica (BEBER, 2003).

De acordo com Machado (2010), o ACI 440 indica, genericamente, para os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono, CFC, as seguintes propriedades:

Tipo da Fibra de Carbono	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência Máxima de Tração (MPa)	Deformação de Ruptura (%)
De uso geral	220 - 235	< 3.790	> 1,2
Alta resistência	220 - 235	3.790 – 4.825	> 1,4

Ultra alta resistência	220 - 235	4.825 – 6.200	> 1,5
Alto módulo	345 - 515	> 3.100	> 0,5
Ultra alto módulo	515 - 690	>2.410	>0,2

Tabela 2. – Características genéricas das fibras de carbono (Fonte: Machado, 2010).

2.1.2.7. Resistência e rigidez:

As fibras de carbono são predominantemente utilizadas por permitirem que sejam alcançadas grandes resistências e rigidez. A maioria dos compósitos de fibra de carbono (laminados, mantas e tecidos), comercializados atualmente, apresenta um módulo de elasticidade que pode variar entre 230 e 640 GPa, enquanto que a resistência varia entre 1500MPa e 5000MPa (BEBER, 2003).

2.1.2.8. Fadiga:

Segundo Juvandes (2002), a generalidade dos compósitos reforçados com fibras de elevado desempenho (grafite, carbono e aramida), quando submetidos a acções cíclicas, apresentam melhor resistência à fadiga do que os equivalentes em aço.

Ainda segundo Juvandes (2002), a ruína por fadiga de um compósito de CFC é progressiva, ao contrário do aço, cuja ruína surge rápida e no fim do tempo de fadiga estabelecido para o material.

As propriedades à fadiga de um material compósito são bastante boas quando as solicitações actuam na direcção das fibras, mas insuficientes para carregamentos transversais ou de corte (Juvandes, 2002).

De acordo com Beber (2002), a resistência a fadiga dos compósitos de fibra de carbono é geralmente muito superior à resistência dos metais e outros compósitos. Este é o caso particular de compósitos unidireccionais, solicitados na direcção das fibras. Entretanto, a resistência à fadiga pode ser reduzida se a resistência da matriz não é suficiente ou quando a solicitação é oblíqua à direcção da fibra.

2.1.2.9. Fluência:

Os polímeros são materiais viscoelásticos e apresentam deformação contínua sob tensão. Diante destas circunstâncias, e particularmente sob altas temperaturas, o desempenho quanto à fluência dos compósitos requer atenção especial. No caso dos compósitos de fibra de carbono, para solicitações na direção das fibras, seu comportamento quanto à fluência é comparável aos aços de baixa relaxação (BEBER, 2003).

Segundo Juvandes (2002), quanto maior for o TG do compósito, maior é a resistência do material à fluência. Os compósitos reforçados unidireccionalmente apresentam melhor comportamento na direção das fibras, do que os bidireccionais e os multidireccionais. O aumento de tensões de tracção, combinado com ambientes de elevada amplitude higrotérmica e agentes químicos agressivos, pode conduzir ao amolecimento da resina, à diminuição da ligação interlaminar e, por último, à antecipação no tempo da ruína por fluência.

2.1.2.10. Coeficiente de expansão térmica:

A expansão térmica dos materiais compósitos depende de uma série de factores, do tipo de fibra, tipo de matriz, geometria da fibra e fracção volumétrica. Em função desta versatilidade, os materiais compósitos podem ser construídos para atender a uma necessidade específica (BEBER, 2003).

2.1.2.11. Resistência ao fogo:

Como os sistemas compostos com fibras de carbono são aderidos externamente às estruturas de betão armado para permitir o seu reforço, torna-se imprescindível a verificação da resistência ao fogo da estrutura reforçada (MACHADO, 2010).

Segundo MACHADO (2010), a análise do comportamento ao fogo dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono deve levar em consideração dois factores relevantes:

- As resinas de epoxídicas utilizadas nos materiais dos sistemas CFC aderidos externamente ao betão são combustíveis, sendo assim fundamental avaliar o seu potencial de geração de fumaça e propagação da chama.

- Como se utiliza os sistemas compostos como elementos estruturais, deverá ser avaliada a resistência ao fogo da estrutura de betão reforçada com o mesmo.

De acordo com Juvandes (2002), o comportamento ao fogo pode tornar-se um ‘ponto crítico’ nas aplicações de sistemas de CFC à construção civil. A resina utilizada na composição da matriz de um produto de CFC pode comprometer o elemento estrutural onde foi aplicada, quando sujeita a um incêndio durante um certo período de tempo.

Segundo Machado (2010) a resistência ao fogo dos materiais dos sistemas compostos é basicamente determinada pela qualidade da resina utilizada no composto. Essas resinas são tipicamente classificadas como termoplásticas e termo estáveis (ou termofixas).

As resinas termoplásticas podem se fundir e novamente se solidificar repetidas vezes ao serem aquecidas e resfriadas, já as resinas termoestáveis experimentam uma reação química para serem curadas, mas não podem regressar ao estado inicial após sofrerem aquecimento (MACHADO, 2010).

De acordo com Machado (2010), essas resinas que são utilizadas em praticamente todos os materiais compostos da indústria da construção civil passam a um estado frágil vitrificado quando expostas a altas temperaturas. A temperatura na qual se inicia essa transição é conhecida como temperatura de transição vítrea TG. De modo geral a integridade estrutural de um sistema composto de fibras de carbono começa a se degradar a temperaturas superiores a TG decorrente do facto de que a resina não mais consegue manter inalterada a adesão das fibras individuais no composto.

Segundo G. Fontes e L. Cunha (2017) geralmente, a integridade estrutural de um sistema composto começa a degradar quando ultrapassam a TG (temperatura de transição vítrea). De modo geral, o TG das resinas epoxídicas bicomponentes, curadas à temperatura ambiente, se situam na ordem de 90°C. Infelizmente não há muito o que se fazer, já que os revestimentos comuns contra incêndio não atendem ao isolamento térmico necessário para manter a temperatura na peça e no sistema composto abaixo da TG.

2.1.2.12. Vantagens e desvantagens:

Segundo R. Soto (2013), o maior objetivo destes materiais é acrescentar ductilidade, resistência à flexão e ao cisalhamento tanto em estruturas novas, quanto em reforço. Esta técnica (reforço por colagem de mantas de fibras de carbono) possui as seguintes vantagens: possibilidade de fazer o reforço em um curto período de tempo, leveza, pode ser feito manualmente, alta resistência à tração e módulo de elasticidade moderado.

Esta técnica também tem algumas desvantagens como por exemplo: possibilidade de vandalismo ou dano ao reforço por falta de conhecimento técnico, baixa resistência ao fogo, custo elevado dos materiais, exige mão de obra qualificada e dificuldade de obter o material em pequenas quantidades (R. Soto, 2013).

2.1.2.13. Aplicações dos sistemas compostos:

Segundo Machado (2010), existe uma grande variedade de elementos de betão armado em que os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono podem ser utilizados para promover reforço estrutural. Essencialmente, em elementos estruturais onde ocorrem momentos fletores, com suas correspondentes tensões de tração e compressão, esforços cortantes e de torção com suas tensões tangenciais e em casos específicos de confinamento os sistemas compostos podem ser utilizados para:

2.1.2.13.1. Reforço de vigas à flexão e ao corte:

As fibras de carbono podem ser utilizadas para absorver os esforços de tração decorrentes dos momentos fletores positivos e negativos, bem como das tensões tangenciais (de cisalhamento) decorrentes dos esforços cortantes (MACHADO, 2010).



Fotografia 1. – Reforço de viga de betão à flexão e ao corte (Fonte: Machado, 2010).

2.1.2.13.2. *Reforço de lajes à flexão:*

Identicamente ao caso das vigas, as lajes podem ser reforçadas à flexão com lâminas de fibras de carbono dispostas segundo as duas direções (MACHADO, 2010).



Fotografia 2. – Reforço de lajes à flexão nas duas direções (Fonte: Machado, 2010).

2.1.2.13.3. *Reforço de pilares e colunas:*

Segundo Machado (2010) o reforço de pilares e colunas pode ser feito de duas maneiras distintas:

- Aumento de sua resistência à flexão;
- Aumento da sua resistência à compressão axial por meio de confinamento.

É importante destacar que o reforço por flexão deverá sempre ser instalado antes dos reforços para o corte e para o confinamento, ou seja, os dois últimos reforços serão aplicados sobre o reforço

por flexão. Essa sequência executiva tem por objetivo de garantir para o reforço à flexão e para o reforço ao corte a condição denominada “colagem crítica”, onde é exigida uma aderência íntima entre o betão e o sistema composto, e para o reforço por confinamento a condição denominada de “contato íntimo”, onde as necessidades de aderência entre o sistema composto e o betão não são mandatórias (Machado, 2010).

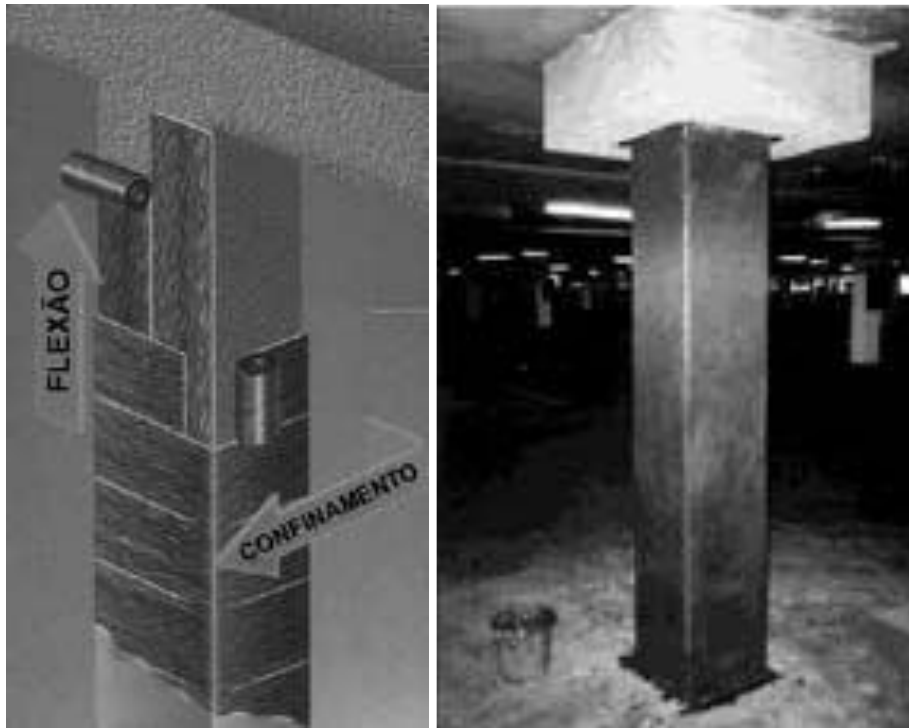


Figura 5. – Reforço de pilares à flexão e confinamento (Fonte: Machado, 2010).

2.1.2.13.4. Aumento da ductibilidade de colunas para prevenção de efeitos sísmicos:

Segundo Machado (2010), uma aplicação interessante dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono é a possibilidade de se aumentar a ductibilidade (reserva de resistência) de colunas e pilares de betão armado, por confinamento, para resistir aos efeitos sísmicos.

De acordo com Machado (2010), a alternância das tensões produzidas quando da ocorrência dos abalos sísmicos produz o fendilhamento do betão nas extremidades superior e inferior das colunas e pilares. Portanto o confinamento é instalado preventivamente, de forma a que sejam minimizados os possíveis efeitos dos sísmos. O confinamento impede as deformações transversais do betão, assegurando a integridade da secção. A fotografia 3 mostra colunas confinadas preventivamente em seus terços superior (esquerda) e inferior (direita).



Fotografia 3 – Colunas reforçadas por confinamento para efeitos sísmico (Fonte: Machado, 2010).

3. Capítulo III: Procedimentos para a Aplicação do Compósito de Fibras de Carbono:

3.1. Processo Construtivo dos Sistemas Compostos:

Segundo Machado (2010), a sequência para a execução dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono pode ser resumida da seguinte forma:

- Recuperação do substrato de betão armado para que o sistema possa ser aderido com segurança;
- Imprimação da superfície sobre a qual será aplicado o sistema para se estabelecer uma ponte de aderência entre o substrato de betão e o sistema composto. Para tanto se utiliza um imprimador epoxídico (primer) com elevado teor de sólidos que, ao penetrar nos poros do betão e ao estabelecer uma película sobre a superfície do betão, cria uma interface altamente eficiente para a transmissão de esforços entre o composto e a peça de betão;
- Regularização e correção das imperfeições superficiais do substrato de betão, de modo a estabelecer um plano adequadamente nivelado. É utilizada uma pasta epoxídica contendo alto teor de sólidos para calafetar eventuais imperfeições superficiais e criar um plano desempenado para a aplicação do sistema composto;
- Aplicação da primeira camada de resina saturante com alto teor de sólidos que servirá para impregnar (saturar) a lâmina de fibra de carbono e aderi-la à superfície do betão;
- Aplicação da lâmina de fibra de carbono que vai reforçar o sistema composto;
- Aplicação da segunda camada de resina saturante para completar a impregnação da lâmina de fibra de carbono e acabando de conformar a matriz epoxídica que envelopa o sistema;
- Aplicação (opcional) de película de acabamento com elevado teor de sólidos, alto brilho e resistente à corrosão, com o objetivo de proteção e/ou acabamento estético para o sistema;

A figura 6 apresenta a sequência recomendada para a execução dos sistemas estruturados com fibras de carbono.

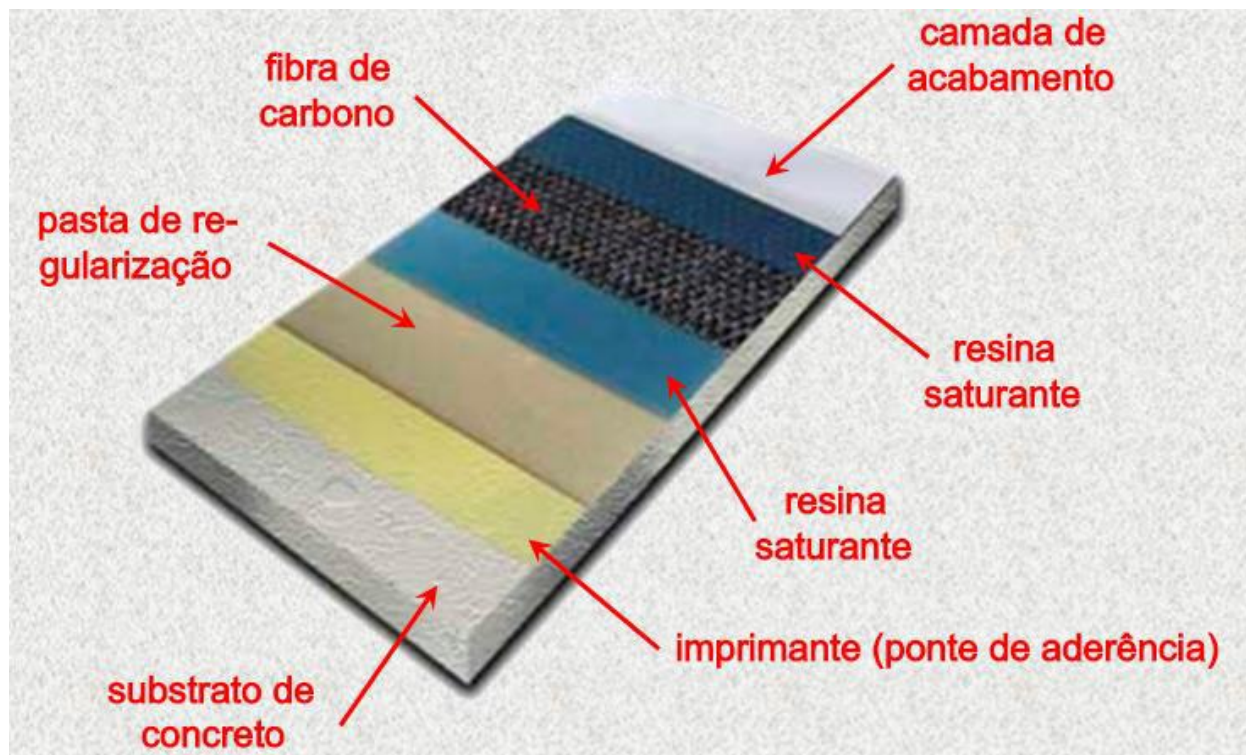


Figura 6. – Etapas construtivas dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono (Fonte: Machado, 2010).

3.1.1. Recuperação do Substrato de Betão:

Para que seja garantida a instalação do sistema composto é fundamental que o substrato ao qual ele será aderido esteja íntegro e são, ou seja, que disponha de suficiente resistência mecânica para que sejam procedidas as transferências de esforços que acontecem na interface betão armado/sistema composto. Assim, todas as patologias significativas existentes no substrato deverão ser corrigidas (MACHADO, 2010).

Portanto no caso de existência de fissuras trincas existentes na estrutura a ser reforçada deverão ser recuperadas. Além delas, as fissuras com aberturas maiores que 0,25 mm também deverão ser tratadas. Podem ser utilizados para essa recuperação os procedimentos convencionais de injeção das mesmas com epóxi sob pressão. As fissuras com aberturas menores que 0,25mm expostas ao meio ambiente podem exigir injeção de resinas ou seladores para prevenir futura corrosão da armadura da peça (MACHADO, 2010).

3.1.2. Preparação da Superfície para o Recebimento do Sistema Composto:

Segundo Machado (2010), a superfície do betão sofre as seguintes preparações:

Utilização de abrasivos ou jatos de areia ou limalhas metálicas para a limpeza da superfície onde deverá ser aderido o sistema composto. Para superfícies pequenas ou limitadas costumam ser utilizadas politrizes, geralmente acopladas com aspiradores de pó, que permitem a limpeza sem a contaminação do ambiente. Esta limpeza deve contemplar a remoção de poeira, pó, substâncias oleosas e graxas, partículas sólidas não totalmente aderidas, recobrimentos diversos como pinturas, argamassas, etc. Também deverão ficar totalmente expostas quaisquer brocas ou imperfeições superficiais significativas.

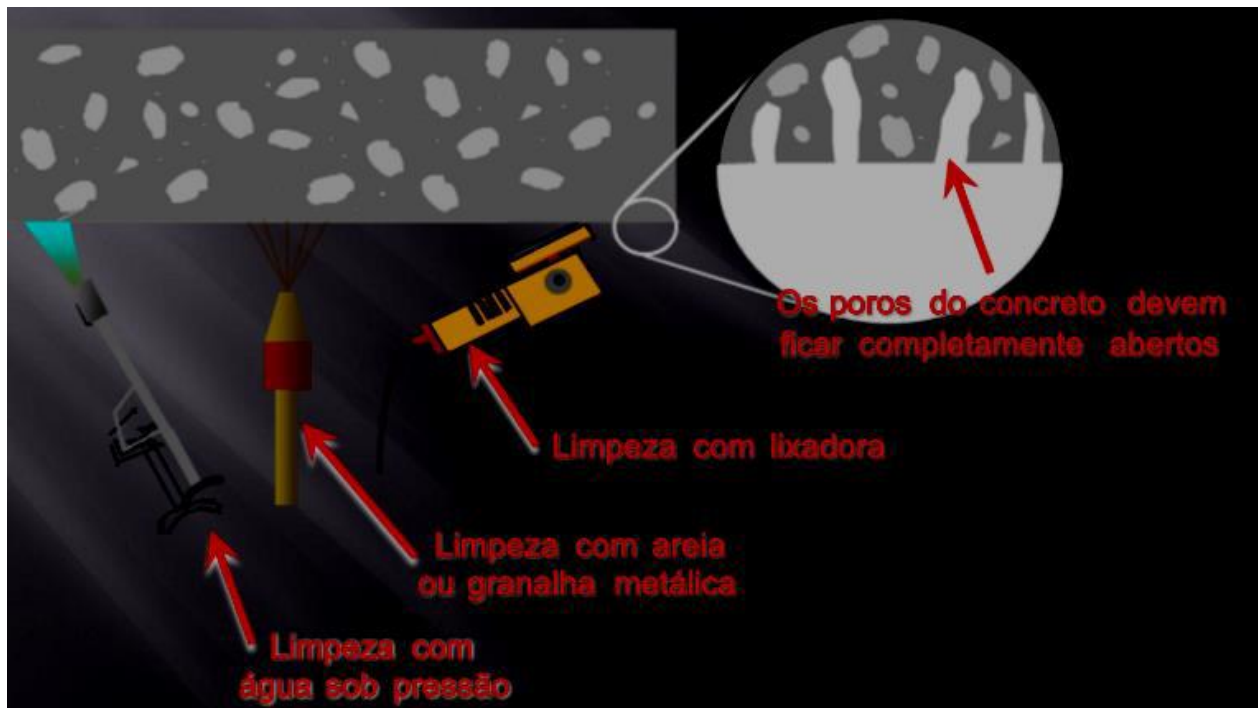


Figura 7. – Limpeza da superfície de instalação do sistema. (Fonte: Gabriela Fontes e Larissa Cunha, 2017).

Uma nota importante é que, no caso em que o sistema composto exigir o recobrimento de mais de uma superfície lateral da peça ocorrerá a necessidade de arredondamento das quinas envolvidas nessa aplicação, visando com isso evitar concentração de tensões na fibra de carbono e eliminar eventuais “vazios” entre o betão e o sistema por deficiência na colagem. Esse arredondamento é

mostrado na Figura 8. Os cantos rugosos devem ser suavizados com aplicação de massa regularizadora apropriada com acabamento lixado (MACHADO, 2010).

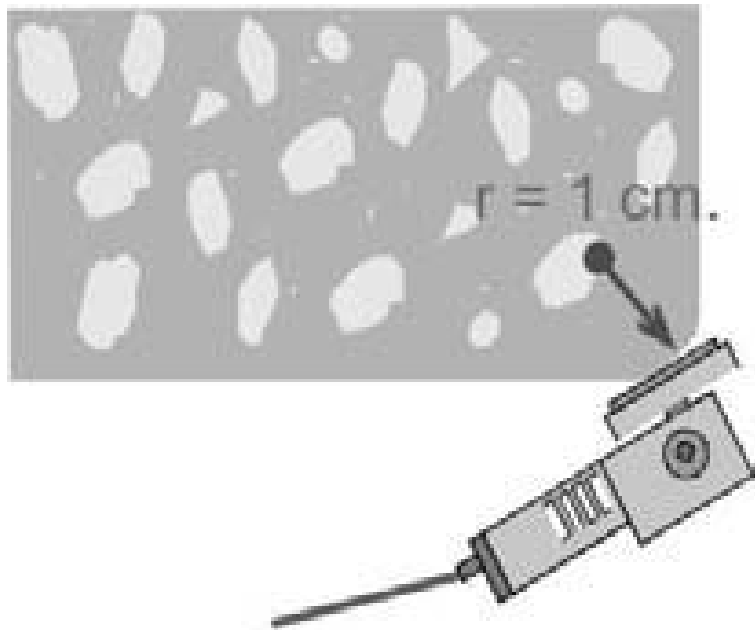


Figura 8. – Arredondamento dos cantos vivos (Fonte: Machado, 2010).

Para que as demais etapas possam ser implantadas, todas as superfícies sobre as quais será implantado o sistema composto deverão estar secas, sem umidade intersticial, uma vez que a presença de água pode inibir a penetração das resinas e reduzir drasticamente a eficiência da ponte de aderência necessária (MACHADO, 2010).

3.1.3. Aplicação do Imprimador Primário:

Segundo Machado (2010), os imprimadores primários têm como objetivo penetrar nos poros do betão, colmatando-os para que, juntamente com a película aderida à superfície do betão, seja estabelecida uma ponte de aderência eficiente, sobre a qual será instalado o sistema.

3.1.4. Aplicação do Regularizador de Superfícies:

As massas regularizadoras de superfície são utilizadas para a calafetação e/ou regularização das superfícies de betão onde serão aplicados os sistemas, garantindo o estabelecimento de uma

superfície desempenada contínua. Quanto maior a irregularidade superficial maior será o consumo desse material (MACHADO, 2010).

3.1.5. Corte e Imprimação das Fibras de Carbono:

As lâminas de fibra de carbono serão previamente cortadas em bancadas especialmente montadas para o corte. São utilizados para o corte uma régua metálica, tesoura de aço (para o corte transversal) e faca de corte ou estilete (para o corte longitudinal) (MACHADO, 2010).

Segundo Machado (2010), após o corte as lâminas de fibras de carbono deverão ser aderidas às peças a serem reforçadas. Existem duas maneiras distintas para se executar esse procedimento:

- a) **Saturação via húmida:** Nessa alternativa a lâmina de fibra de carbono é saturada em bancada própria, sendo depois transportada para a sua aplicação na peça a ser reforçada.

- b) **Saturação via seca:** Nessa alternativa a saturação é feita directamente sobre o betão da peça a ser reforçada para em seguida ser colada a lâmina de fibra de carbono.

Segundo Machado (2010), existem duas correntes distintas com relação ao procedimento de saturação. A primeira corrente advoga que a saturação da lâmina na bancada conduz a uma condição de trabalhabilidade e economia de resina maior que a corrente que advoga a saturação directamente na peça de betão a ser reforçada.

Ainda de acordo com Machado (2010), a prática tem demonstrado que no caso de reforços contra-cabeça a aplicação de lâminas de fibra de carbono saturadas em bancada tem se mostrado de aplicação mais fácil (menos trabalhosa). Por sua vez, a aplicação via húmida conduz a uma limitação no comprimento da lâmina a ser transportada, da ordem de 3,5m a 4,0m. Enfim, cabe ao aplicador definir qual o sistema a ser adotado uma vez que o resultado final para ambos os procedimentos não é alterado.

Contudo, segundo G. Fontes e L. Cunha (2017), nesta fase, corta-se as lâminas que serão colocadas e aplica-se a primeira camada de resina saturante com alto teor de sólidos (saturação via húmida) ou aplica-se a resina saturante diretamente sobre o betão a ser reforçado (saturação via seca). Esse processo de saturação servirá para impregnar a lâmina de fibra de carbono e aderi-la à superfície do betão. Nos laminados, o desdobramento e o corte são a primeira etapa de execução e a imprimação é efectuada a partir de um gabarito que distribui a cola com espessura constante.

Logo depois, deve-se colocar a lâmina ou o laminado de carbono, para que seja possível fazer ajustes de alinhamento e prumo das lâminas de fibra de carbono. Para que a lâmina fique devidamente aderida, deve-se executar o processo de “rolagem das bolhas de ar” que é feito com a utilização de pequenos roletes de aço denteados que levam as bolhas de ar até a extremidade das lâminas, com o intuito de eliminá-las.

3.1.6. Segunda Camada de Saturação:

Terminado o posicionamento da lâmina de fibra de carbono é feita a segunda saturação sobre a lâmina instalada, de modo a garantir que a fibra de carbono esteja totalmente imersa (encapsulada). Normalmente se espera cerca de 30 minutos para essa segunda operação de saturação. Variações de tempo podem ocorrer conforme o sistema composto adotado (MACHADO, 2010).

De acordo com Machado (2010), dessa forma, estruturalmente, está encerrada a aplicação do sistema composto estruturado com fibras de carbono. Como podem ser necessárias várias camadas de lâminas de fibra de carbono para o reforço estrutural da peça essas operações são repetidas sucessivamente para cada camada adicional. Convém ressaltar que cada lâmina exige duas imprimações independentes, não podendo a última camada de imprimação da lâmina anterior ser utilizada para a colocação da próxima lâmina.

3.1.7. Revestimento Estético e/ou Protector:

Muitas vezes por razões estéticas se quer esconder o sistema composto aplicado. Para esse tipo de acabamento alguns sistemas compostos disponibilizam revestimentos especiais com diversas cores e texturas. Frequentemente, entretanto, o revestimento deve ser projectado para atender condições específicas de agressões físicas, mecânicas e ambientais. Nesse caso o revestimento deixa de ser

meramente estético para passar a ter uma finalidade de proteção mecânica e química do sistema composto (MACHADO, 2010).

4. Capítulo IV: Dimensionamento do Reforço com Fibras de Carbono:

4.1. Comportamento de Vigas Reforçadas a Flexão

Quando se utiliza para o reforço de estruturas de betão armado à flexão um sistema composto estruturado com fibras de carbono, ele é aderido nas faces superior ou inferior das peças. Ou seja, o sistema composto é um sistema de reforço externo (MACHADO, 2010).

Segundo Machado (2010), para o cálculo da resistência à flexão de uma estrutura de betão armado reforçado com fibras de carbono algumas considerações e conceitos básicos devem ser estabelecidos, tais como:

- Os estudos e cálculos deverão ser efectuados com base nas dimensões existentes das secções e da quantidade e da distribuição das armaduras de aço da mesma, assim como das propriedades e características mecânicas dos materiais constituintes do elemento de betão a ser reforçado.
- Prevalecem os critérios de Bernoulli, figura 9, ou seja, as secções planas permanecem planas após a ocorrência dos carregamentos e as deformações são linearmente proporcionais à sua distância à linha neutra.

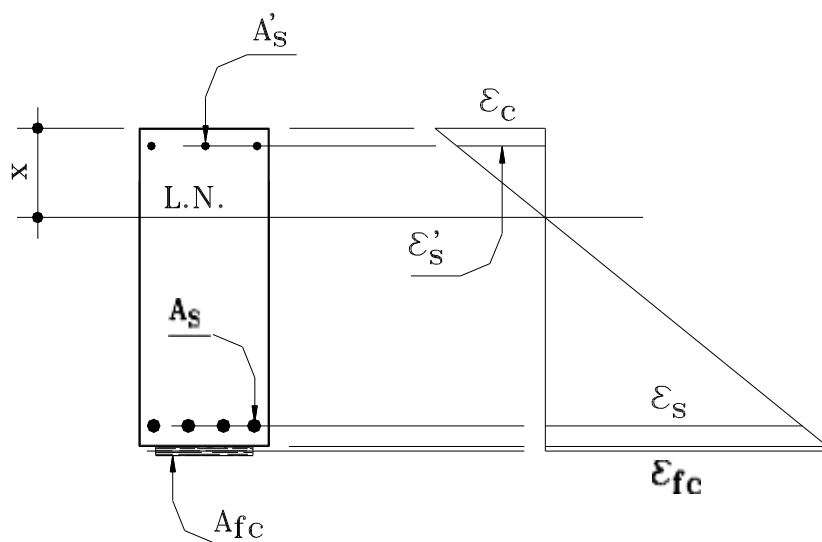


Figura 9. - Critérios de Bernoulli (Fonte: Machado, 2010).

- Despreza-se a resistência à tração do betão;
- A deformação do betão não pode ultrapassar 3,5‰ quando dimensionado segundo os critérios da ABNT e do REBAP, e 3,0‰ segundo as recomendações da ACI;
- A aderência entre o sistema composto CFC e o substrato de betão deve ser perfeita;
- A deformação será considerada linear até a ruptura no sistema composto CFC.

Quando da sua aplicação o sistema composto não está submetido a qualquer nível inicial de tensões. Entretanto, o substrato ao qual ele será aderido já está submetido a tensões decorrentes da atuação de seu peso próprio, forças de pré-esforço e/ou outros eventuais tipos de solicitação existentes por ocasião da instalação do reforço (MACHADO, 2010). Dessa forma, o nível de tensões actuantes na fibra de carbono será diferente daquele que ocorre na fibra extrema do substrato sobre o qual o reforço é colado (MACHADO, 2010).

Para se conhecer o nível de tensão ao qual o reforço será submetido é necessário que se conheça previamente o nível de tensão existente na superfície do substrato na hora de sua aplicação. Conhecido esse nível de tensão conhece-se o nível de deformação existente na fibra extrema do betão à qual será aderido o reforço (MACHADO, 2010).

De acordo com Machado (2010), essa deformação pré-existente deverá ser subtraída da deformação final encontrada para a fibra de carbono para que se possa estabelecer o nível de tensão com o qual a fibra de carbono efetivamente trabalhará. A deformação máxima permissível na fibra de carbono será fornecida pela seguinte equação:

$$\epsilon_{fc} = (\epsilon_b - \epsilon_{bi}) \leq \epsilon_{fu}$$

Onde:

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

ϵ_{bi} - deformação pré-existente quando da instalação do reforço de fibra de carbono.

A Figura 10, a seguir mostra como é determinado o valor de (ϵ_{bi}) a partir da análise elástica dos carregamentos existentes quando da instalação do sistema CFC:

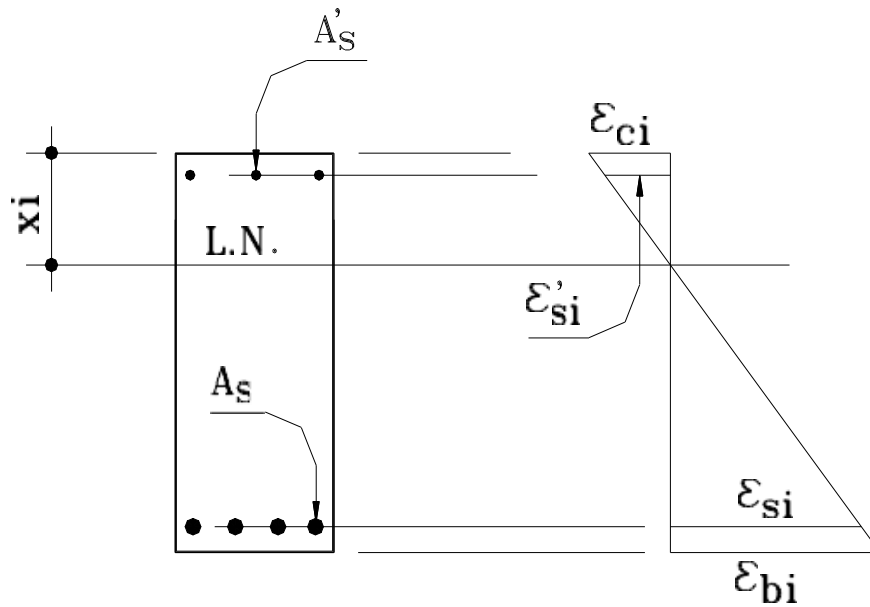


Figura 10. - Determinação da deformação inicial ϵ_{bi} (Fonte: Machado, 2010).

Assim a deformação (ϵ_{bi}) deve ser considerada como deformação inicial e, portanto, ser excluída da deformação final do sistema composto (MACHADO, 2010).

O ACI Committee 440 recomenda que o reforço à flexão através de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono seja feito no estado limite último (MACHADO, 2010).

Os critérios de dimensionamento à flexão no estado limite último estabelecem que a capacidade resistente à flexão de um elemento deve exceder a demanda estrutural (MACHADO, 2010).

A análise para o estado limite último calcula a capacidade resistente da secção pela combinação das condições de equilíbrio das deformações, compatibilidade das tensões e o comportamento reológico do betão e dos demais materiais constituintes na ruptura (MACHADO, 2010).

Segundo Beber (2003), a determinação do nível inicial de deformação pode ser feita através de uma análise elástica do elemento, considerando todas as cargas que estarão actuando durante a aplicação do reforço.

O nível inicial de deformação do compósito de fibras de carbono deve ser, então deduzido da deformação específica no substrato de betão para a determinação da deformação resultante no reforço (BEBER, 2010).

De acordo com Beber (2003), dos conceitos fundamentais da elasticidade, sabe-se que a deformação específica no substrato de betão pode ser determinada através da expressão:

$$\epsilon_i = \frac{M_i * (h - x)}{I * E_{CS}}$$

Onde:

M_i = momento flector actuante no instante de aplicação do reforço;

h = altura da secção transversal;

x = altura da linha neutra;

I = momento de inércia da secção homogeneizada de betão;

E_{CS} = módulo de elasticidade secante do betão ($E_{CS} = 1505\sqrt{f_c}$ [kN/cm²]).

Baseado na teoria da elasticidade e com o valor do momento M_i , actuando sobre a secção transversal em estudo, durante a aplicação do reforço, é possível determinar-se o perfil de deformações específicas, o momento de inércia da secção transversal homogeneizada e a altura da linha neutra, a serem empregados na equação (BEBER, 2003).

4.1.1. Modos de Ruptura

Segundo Machado (2010), ocorrem quatro possibilidades distintas para que ocorra a ruptura das peças de betão armado:

1- ruptura por escoamento do aço antes do esmagamento do betão.

2- ruptura por escoamento do aço antes da ruptura do sistema CFC.

3- ruptura por esmagamento do betão antes da ruptura por escoamento do aço.

4- ruptura do sistema compósito CFC antes da ruptura por escoamento do aço.

Onde os modos de ruptura 1 e 2 caracterizam um comportamento dúctil da estrutura, o que é desejável. E os modos de ruptura 3 e 4 caracterizam um comportamento frágil da estrutura, menos desejável que o anterior.

Para BEBER (2003), a metodologia para o dimensionamento e verificação do comportamento de vigas de betão armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono baseia-se nos princípios e hipóteses do estado limite último. Este processo requiere a investigação dos diversos modos de ruptura possíveis e suas implicações sobre o comportamento dos elementos reforçados.

Estes procedimentos consideram apenas a ruptura à flexão por falha do compósito à tracção ou esmagamento do betão, sem ruptura prematura por deslocamento. Preferencialmente, o modo de ruptura a ser considerado no dimensionamento deve ser o esmagamento do betão após o escoamento da armadura longitudinal e ruptura do compósito após o escoamento da armadura, sendo mais favorável o primeiro. Em ambos os modos, o escoamento da armadura longitudinal precede a ruptura do compósito ou esmagamento do betão, o que garante que o colapso ocorrerá após a formação de grandes fissuras de flexão (BEBER, 2003).

4.1.2. Dimensionamento do Reforço à Flexão com Fibras de Carbono

Segundo G. Fontes e L. Cunha (2017), devem ser efectuadas as seguintes verificações para o cálculo do reforço de uma viga de betão armado com a utilização de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono:

- Determinação do momento fletor de cálculo máximo que deve actuar ($M_{d,Max}$);
- Determinar o momento fletor resistente ($M_{d,resist}$), da viga em função das características geométricas da secção e das características mecânicas dos materiais constituintes;
- Comparar $M_{d,Max}$ com $M_{d,resist}$. Se $M_{d,resist} > M_{d,Max}$, a viga não precisa de reforço a flexão. Se entretanto $M_{d,resist} < M_{d,Max}$, a viga precisará de reforço.

4.1.2.1. Verificação da ductibilidade

De acordo com Machado (2010), a utilização de sistemas compostos aderidos externamente a peças de betão armado para aumentar a sua resistência à flexão provocará a redução da ductibilidade original da mesma.

Na maioria dos casos essa perda de ductibilidade é desprezível. Contudo é necessário se precaver contra a possibilidade da ocorrência de perda significativa da ductibilidade em peças reforçadas (MACHADO, 2010).

Para que se obtenha um grau suficiente de ductibilidade é recomendável que se verifique o nível de deformação do aço no estado limite último (MACHADO, 2010).

Uma adequada ductibilidade é conseguida se a deformação do aço ao nível do esmagamento do betão ou ruptura do sistema composto seja de pelo menos 5‰ (MACHADO, 2010).

Segundo Machado (2010), uma maior reserva de resistência é adquirida aplicando-se um fator de redução no valor da resistência do aço, de valor 0,70 para as seções frágeis ao invés do valor de 0,90 para as seções dúcteis, conforme indicado nas equações.

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

$$\phi = 0,70 + \frac{0,20 (\epsilon_s - \epsilon_{sy})}{0,005 - \epsilon_{sy}} \quad \text{para } \epsilon_{sy} < \epsilon_s < 0,005$$

$$\phi = 0,70 \quad \text{para } \epsilon_s \leq \epsilon_{sy}$$

Onde (ϵ_{sy}) é a deformação de escoamento do aço.

4.1.2.2. Procedimentos para o dimensionamento do reforço a flexão

De acordo com B. R. G. de Lorenzi (2018), o ACI 440.2R (ACI, 2008) recomenda que para o dimensionamento do reforço, parte-se do princípio de que a viga foi projectada no E.L.U. (Estado

Limite Último). Sendo assim, para determinar a força atuante no compósito de carbono, realiza-se o equilíbrio de momentos externo e interno (M_{ref}) em dois pontos da seção transversal, de acordo com a figura 11.

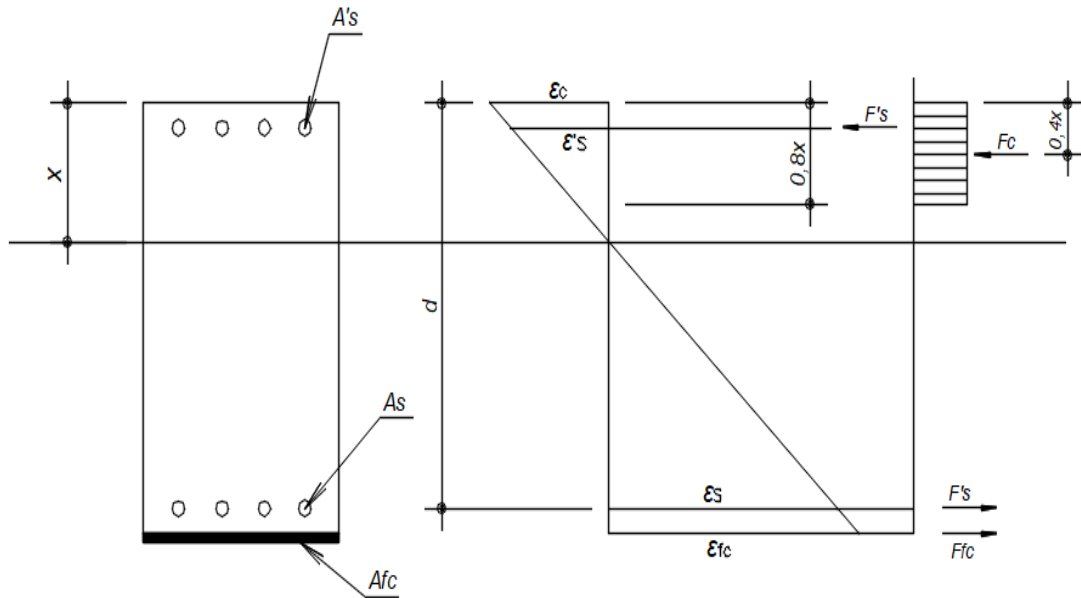


Figura 11. - Forças atuantes na seção transversal da viga (Fonte: B. R. G. de Lorenzi, 2018).

De acordo com B. R. G. de Lorenzi (2018), o primeiro ponto para o equilíbrio é feito no eixo da armadura tracionada e o segundo ponto para realizar o equilíbrio da seção transversal é feito no eixo da resultante de compressão do betão. Para que a estrutura esteja em equilíbrio, o momento interno resistente encontrado deverá ser o mesmo em qualquer ponto escolhido da seção transversal. Partindo disso, é necessário determinar a posição correcta da linha neutra para haver o equilíbrio da estrutura.

O dimensionamento do reforço à flexão da viga é calculado a partir das expressões apresentadas na tabela 3, de acordo com a ACI 440.2R (ACI, 2008):

Item calculado	Equação
Determinação do momento resistente	$M_d = A_s * f_{yd} * (d - 0,4x)$ $x = \frac{A_s * f_{yd}}{0,68 * b_w * f_{cd}}$
Determinação da deformação inicial	$\epsilon_{bi} = \frac{\epsilon_{si} * (h - x_0)}{d - x_0}$ $\epsilon_{fc,b} = \frac{\epsilon_c * (h - x_0)}{x_0}$ $\epsilon_{fc} = (\epsilon_{fc,b} - \epsilon_{bi})$
Dimensionamento do reforço	$M_{ref} = M_c + M_s + M'_s + M_{fc}$ $F_{fc1} = \frac{M_{ref} - F_c * (d - 0,4x)}{(h - d)} \quad (1)$ $F_{fc2} = \frac{M_{ref}}{(h - 0,4x)} \quad (2)$ $F_c = 0,85 * f_{cd} * b_w * 0,8x$ $F_s = A_s * f_{yd}$ $\sigma_{fc} = E_{fc} * \epsilon_{fc}$ $A_{fc} = \frac{F_{fc}}{\sigma_{fc}}$
<p>(1) Equilíbrio da secção transversal no eixo da armadura tracionada;</p> <p>(2) Equilíbrio da secção transversal no eixo da resultante de compressão do betão;</p>	

Tabela 3. - Equações para dimensionamento do Reforço à flexão de vigas com CFC (Fonte: B. R. G. de Lorenzi, 2018).

Onde:

M_d – Momento fletor resistente da viga;

A_s – Área de aço existente na viga;

f_{yd} – Resistência de cálculo do escoamento do aço;

b_w – Largura da viga;

f_{cd} – Resistência de cálculo à compressão do betão;

x – Altura da linha neutra para a viga em equilíbrio;

d – Altura útil da secção da viga;

h – Altura da viga

$M_{d,0}$ – Momento fletor solicitante inicial devido apenas as cargas permanentes;

ϵ_{si} – Deformação inicial do aço existente na viga;

ϵ_{bi} – Deformação inicial da viga devido apenas às cargas permanentes;

$\epsilon_{f_c,b}$ – Deformação na fibra considerada no reforço para o carregamento máximo;

ϵ_{f_c} – Deformação final da fibra de carbono;

ϵ_c – Deformação do betão;

x_0 – Altura da linha neutra referente apenas aos carregamentos permanentes;

M_{ref} – Momento fletor solicitante da viga;

M_c – Momento fletor resistente do betão;

M_s – Momento fletor resistente do aço comprimido;

M'_s – Momento fletor resistente do aço tracionado;

M_{f_c} – Momento fletor resistente da fibra de carbono;

F_c – Força de compressão atuante no betão;

F_s – Força de tração atuante na armadura;

F_{f_c} – Força atuante na fibra de carbono;

σ_{f_c} – Tensão na fibra de carbono;

E_{f_c} – Módulo de elasticidade da fibra de carbono utilizada;

A_{f_c} – Área de fibra de carbono necessária para o reforço.

4.1.2.2.1. Comprimento de ancoragem

A determinação do comprimento de ancoragem do sistema CFC é necessária para garantir que os esforços suportados pelas fibras de carbono sejam transferidos para a estrutura de betão reforçada por meio de um comprimento mínimo de aderência, sem que haja o descolamento do CFC (B. R. G. de Lorenzi, 2018).

Item calculado	Equação
Determinação do comprimento de ancoragem	$l_{t,máx} = 0,7 * \sqrt{\frac{E_{fc} * t_{fc}}{2 * f_{ct,m}}}$
Determinação da resistência média de tracção do betão	$f_{ct,m} = 0,3 * f_{ck}^{2/3}$
$l_{t,máx}$ é o comprimento de ancoragem do CFC em mm; E_{fc} é o módulo de elasticidade da fibra de carbono utilizada em MPa; t_{fc} é a espessura do compósito de carbono em mm; $f_{ct,m}$ é a resistência média de tracção no betão em MPa; f_{ck} é a resistência à compressão do betão em MPa.	

Tabela 4. - Equações para determinação do comprimento de ancoragem do CFC (Fonte: B. R. G. de Lorenzi, 2018).

4.2. Comportamento de Vigas Reforçadas ao Esforço Transverso

Rupturas por flexão e esforço transverso são as principais formas de falhas de vigas normalmente armadas. Geralmente é desejável que se tenha uma ruptura por flexão pois esta é mais dúctil que a ruptura por esforço transverso. Isto explica porque as vigas de betão armado são primeiramente dimensionadas a flexão e, então verificada ao esforço transverso (BEBER, 2003).

Segundo Beber (2003), uma ruptura dúctil permite a redistribuição de tensões e alerta os ocupantes para a possibilidade de colapso, enquanto uma ruptura frágil é repentina e, conseqüentemente, catastrófica.

Com os resultados alcançados pela técnica no reforço à flexão, verificou-se também a possibilidade da aplicação dos compósitos de CFC para elevar a resistência ao esforço transversal de vigas de betão armado (BEBER, 2003).

De acordo com Beber (2003), ainda existem algumas dúvidas quanto ao comportamento de estruturas de betão armado reforçadas ao esforço transversal. Isto deve, principalmente, ao facto de que a ruptura por esforço transversal se constitui em um mecanismo bastante complicado e os métodos analíticos empregados se baseiam, parcialmente, em resultados experimentais.

Segundo Machado (2010), os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono oferecem várias possibilidades para permitir o reforço ao esforço transversal dos elementos de betão armado. Esses sistemas são utilizados para o envolvimento das secções de betão com as fibras dispostas transversalmente com o objectivo de reforçar as diagonais tracionadas da treliça de Morsch de maneira similar aos estribos de aço.

De acordo com Beber (2010), a ruptura por esforço transversal em um elemento de betão armado ocorre de maneira súbita e catastrófica e deve ser evitada ainda durante a etapa do projecto. O efeito do esforço transversal se traduz em tensões de tracção em planos com orientação de aproximadamente 45° com o plano onde a tensão de esforço transversal actua. A ruptura ocorre quando estas tensões, juntamente com as tensões horizontais devidas à flexão, excedem a resistência à tracção diagonal do material. Assim, a ruptura por esforço transversal de um elemento de betão armado se constitui em um fenómeno de tracção diagonal; o colapso ocorre em um plano inclinado devido à combinação das tensões de flexão e esforço transversal. Os mecanismos que conduzem à ruptura por esforço transversal de uma viga de betão armado são completamente diferentes daqueles associados à ruptura por flexão. A transferência dos esforços de esforço transversal em vigas de betão armado depende fortemente das resistências à compressão e à tracção do betão. Isto explica porque, no caso do esforço transversal, a viga apresenta uma ruptura frágil sem que seja evidenciados indícios de que sua capacidade portante está se esgotando. Assim, para evitar este colapso prematuro, uma quantidade adequada de armadura transversal é, geralmente, dimensionada (BEBER, 2010).

4.2.1. Dimensionamento do Reforço ao Esforço Transverso com Fibras de Carbono

De acordo com Beber (2010), os estudos sobre o reforço ao esforço transverso de vigas de betão armado utilizando materiais compósitos têm sido limitados e, de certa forma, entremeados de alguma controvérsia. Verifica-se que, apesar da existência de alguns estudos sobre o reforço ao esforço transverso de vigas de betão armado, os procedimentos de verificação e dimensionamento destes elementos são, ainda, bastante complexos. Os modelos analíticos propostos são diversos e, em alguns casos, contraditórios.

4.2.1.1. Configurações de um reforço ao esforço transverso

Segundo Machado (2010), as configurações mais comuns para a utilização das lâminas de fibra de carbono são as apresentadas a seguir:

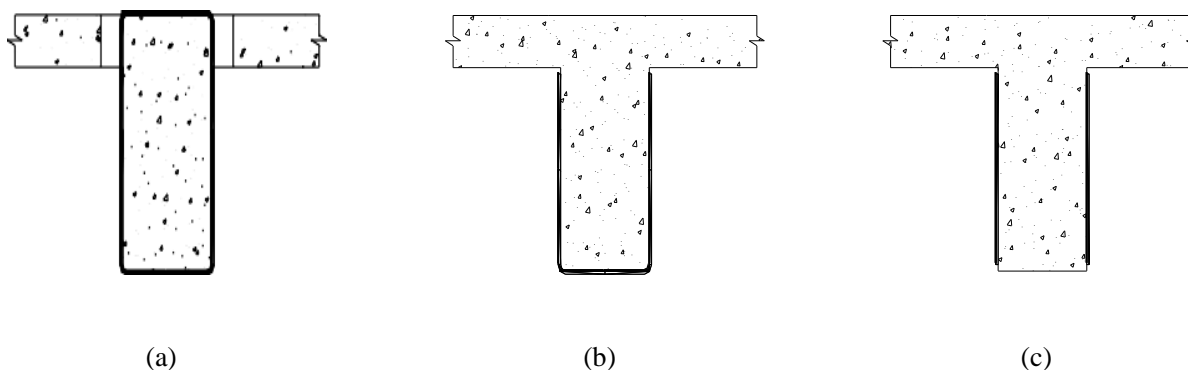


Figura 12. – Configurações possíveis ao esforço transverso (Fonte: Machado, 2010).

a) Envolvimento total da secção transversal:

A configuração indicada na figura 12a corresponde ao envolvimento total da secção transversal com as lâminas de fibra de carbono. Em vigas que não possuem lajes em sua parte superior ou inferior é a configuração mais empregada. Entretanto, caso exista a laje, superior ou inferior, essa solução nem sempre é economicamente viável de ser executada devido à necessidade de demolições e recomposições localizadas na laje que está incorporada á viga, para permitir a criação de “rasgos”

que permitam a passagem da fibra pela laje para se completar o envolvimento da peça. Muitas vezes condições extremas de dimensionamento obrigam à execução dos rasgos, tornando esse tipo de envolvimento a única solução possível (MACHADO, 2010).

Segundo Beber (2003), o método mais eficiente de reforço ao esforço transversal é o envolvimento total – *wrapping*, ou seja, o completo envolvimento da secção transversal da viga, como ilustra a figura 12a. Contudo, em algumas situações, esta pode não se constituir em uma alternativa viável do ponto de vista prático. A presença de uma laje ou outro elemento, contíguo à viga, frequentemente impede que seja possível envolver o topo da secção. Uma alternativa seria perfurar a laje e envolver a secção com tiras ou bandas de reforço. Esta alternativa é, porém, igualmente bastante complicada e onerosa.

b) Envolvimento tipo “U”:

A disposição indicada na figura 12b corresponde ao envolvimento denominado de “U” e que abrange apenas três lados do elemento (duas laterais e o fundo) de betão. Essa disposição geralmente é imposta pela existência de laje na parte superior da viga e pela não conveniência ou impossibilidade da abertura de rasgos na mesma para permitir a passagem da fibra. Essa é uma solução de fácil execução e que permite razoável incremento na resistência nominal de esforço transversal da peça. Essa solução é mais eficiente quando utilizada nas regiões em que ocorrem momentos positivos do que nas regiões em que ocorrem momentos negativos, devido ao facto de que nessas últimas as fissuras de tracção se iniciam no topo das secções, nas proximidades da face inferior das lajes, facto que pode interferir na condição de controlo do início da formação da fissura (MACHADO, 2010).

De acordo com Beber (2003), o método mais comum de reforço ao esforço transversal caracteriza-se pela colagem do reforço nas laterais e base da secção, conforme a figura 12b. Este método é denominado “U” *wrap*, isto é, envolvimento tipo “U”. Trata-se de uma alternativa prática e bastante eficiente no aumento da resistência ao esforço transversal. O envolvimento tipo “U” é altamente eficiente nas regiões de momento positivo. Nas regiões de momento negativo, porém, as fissuras de esforço transversal iniciam no topo da secção, próximo à laje. Como o reforço está posicionado abaixo da laje, este pode não ser capaz de evitar o início e a propagação destas fissuras.

Uma vez iniciadas, existe uma grande chance de que estas fissuras se propaguem ao longo de toda a secção sem que o reforço tenha qualquer efeito.

c) Envolvimento nas laterais:

A configuração da figura 12c ocorrerá sempre que não se puder envolver totalmente a secção transversal e nem o fundo das peças, limitando a aplicação das lâminas de fibra de carbono às duas laterais da viga. Embora de todas as configurações seja a menos eficiente, ainda assim é possível a sua aplicação mesmo com as limitações de ancoragem características dessa solução (MACHADO, 2010).

Segundo Beber (2003), em algumas situações, ainda, pode não ser possível envolver a base da viga. Nestes casos é possível simplesmente colar o reforço em ambos os lados, conforme a figura 12c. A eficiência desta configuração, porém, é limitada e por conta de possíveis problemas de ancoragem.

4.2.1.2. Critérios para a seleção de uma configuração de reforço ao esforço transversal

De acordo com Beber (2003), a seleção de uma configuração de reforço ao esforço transversal, para uma determinada situação deve estar baseada nos seguintes aspectos:

- Acesso ao local, verificando a possibilidade de acesso ao perímetro da viga para a execução de um eventual reforço por envolvimento total da secção transversal;
- A necessidade ou finalidade do reforço quanto à tipologia do carregamento (monotônico ou cíclico);
- Magnitude do incremento de resistência ao esforço transversal necessário;
- Disponibilidade de recursos materiais (tipos de compósitos) e recursos financeiros.

Baseado em resultados experimentais disponíveis, pode-se afirmar que o reforço ao esforço transversal com compósitos de CFC colados somente nas laterais é o mais suscetível ao deslocamento, enquanto que o completo envolvimento da secção transversal representa a metodologia mais eficiente. Por sua vez, o envolvimento tipo “U” apresenta um desempenho intermediário entre estes.

4.2.1.3. Princípios gerais de dimensionamento:

O princípio geral de dimensionamento ao esforço transversal considera que o betão comprimido fornece a resistência primária ao esforço transversal e que, a resistência adicional ao esforço transversal deve ser fornecida através de uma armadura transversal, geralmente sob a forma de estribos internos. Alguns dos resultados de pesquisas disponíveis até o momento apontam que a mesma metodologia pode ser empregada no caso do reforço externo. Entretanto, seu comportamento e mecanismo de funcionamento não se apresentam, ainda, completamente claros e existe a necessidade de maior investigação nessa área (BEBER, 2003).

Já foi amplamente demonstrada que o mecanismo de resistência ao esforço transversal de uma viga sem armadura transversal, particularmente o engrenamento dos agregados, funcionará até que as fissuras apresentem uma abertura excessiva. Portanto, na presença de armadura transversal, a viga passa a resistir a forças de esforço transversal, desde que as deformações na armadura transversal não sejam tão grandes (isto é, os estribos não entrem em escoamento). Portanto, antes, ou após o escoamento da armadura transversal, é possível fazer a superposição dos efeitos destas duas acções (BEBER, 2003).

Assim, a resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado pode ser obtida através da soma das parcelas de resistência do betão, da armadura transversal (interna) e do reforço externo, como pode ser observado através da equação que se segue (BEBER, 2003):

$$V_r = V_c + V_{sw} + V_f \text{ [kN]}$$

Onde:

V_r = Resistência ao esforço transversal da viga reforçada;

V_c = Contribuição do betão;

V_{sw} = Contribuição da armadura transversal (interna);

V_f = Contribuição do reforço externo.

4.2.1.3.1. *Contribuição do betão:*

A resistência ao esforço transversal do betão atribui-se aos efeitos de engrenamento dos agregados e de pino da armadura longitudinal, na porção fissurada, e a resistência à tracção da diagonal na porção não-fissurada da viga. Apresenta-se, a seguir, algumas abordagens para a determinação desta resistência, adoptadas por códigos normativos de projecto de estruturas de betão armado e formulações empíricas, oriundas de programas experimentais (BEBER, 2003).

a) REBAP/2014

De acordo com o REBAP, a parcela resultante da contribuição do betão, V_{cd} , deve ser determinado do modo seguinte:

Em geral:

$$V_{cd} = \tau_1 * b_w * d$$

Em que:

τ_1 – tensão relacionada com os valores de cálculo do esforço transversal e do momento torsor resistente ($\tau_1=0,60f_{ctd}$).

b_w – largura da alma da secção; no caso de esta não ser constante, dever-se-á tomar para valor de b_w a menor largura existente numa altura de três quartos da altura útil da secção, contada a partir da armadura longitudinal de tracção;

d – altura útil da secção.

b) NBR 6118/2003

De acordo com Beber (2003), a norma apresenta dois modelos de cálculo possíveis, o da treliça clássica modificada e a treliça generalizada. No primeiro, denominado modelo 1, o ângulo da diagonal comprimida de betão é igual a 45° e a contribuição do betão, V_c , é considerada constante. Já para o modelo 2, a inclinação da diagonal comprimida pode variar entre 30° e 45° e a contribuição do betão é reduzida.

Para a determinação desta contribuição, pode-se empregar a seguinte formulação:

$$V_c = 0,0835 * \sqrt[3]{f_c^2} * b_w * d \quad [\text{kN}]$$

Onde:

f_c = Resistência à compressão do betão;

b_w = Largura da viga;

d = Altura útil da viga.

c) ACI Code (1995)

Segundo Beber (2003), a norma norte-americana sugere uma forma simplificada para a determinação da contribuição do betão para a resistência ao esforço transversal, V_c . Através da equação seguinte determina-se a contribuição do betão.

$$V_c = 0,05270 * \sqrt{f_c} * b_w * d \quad [\text{kN}]$$

Onde:

f_c = Resistência à compressão do betão;

b_w = Largura da viga;

d = Altura útil da viga.

4.2.1.3.2. Contribuição da armadura transversal:

Segundo Beber (2003), a função principal dos estribos é transferir esta solicitação de cisalhamento através da fissura. Como a fissuração no betão ocorre sob acção de tensões na diagonal tracionada relativamente baixas, a tensão nos estribos, neste instante, é bastante pequena. Portanto pode-se verificar que os estribos não evitam as fissuras inclinadas e não são importantes até que estas fissuras comecem a se desenvolver.

A presença de estribos é benéfica, dentro do mecanismo de resistência de uma viga sob vários aspectos. Os estribos contribuem para à resistência a tracção em função dos seguintes aspectos:

- Melhoria da contribuição do efeito de pino. Um estribo pode, de forma efectiva, apoiar uma barra longitudinal que é atravessada por uma fissura de flexão e esforço transversal, próxima ao estribo;
- Suprir as tensões de tracção por flexão em blocos pela diagonal de compressão, resultado da acção de treliça;
- Limar a abertura de fissuras diagonais dentro do regime elástico, portanto preservando e melhorando a transferência do esforço transversal por engrenamento dos agregados;
- Garantir o confinamento, quando os estribos estão espaçados proximamente, melhorando a resistência à compressão nas regiões particularmente afectadas pela acção de arco;
- Prevenir a ruptura da ligação quando as fissuras se desenvolvem nas zonas de ancoragem por causa do efeito de pino e forças de ancoragem.

Assim, a contribuição da armadura transversal, de acordo com a NBR 6118, pode ser determinada através da seguinte formulação (BEBER, 2003):

$$V_{sw} = 0,90 * \frac{A_{sw} * d}{s} * f_{yw} * (\cotg\theta + \cotg\alpha) * \text{sena} \quad [\text{kN}]$$

Onde:

A_{sw} = Área da secção transversal de um estribo;

d = Altura útil da viga;

s = Espaçamento dos estribos medido segundo o eixo longitudinal da peça;

f_{yw} = Tensão de escoamento da armadura transversal;

θ = Ângulo de inclinação da diagonal comprimidas (biela) em relação ao eixo longitudinal da peça;

α = Ângulo de inclinação dos estribos em relação ao eixo longitudinal da peça.

Considerando que o ângulo de inclinação da diagonal comprimida (θ) igual à 45° e os estribos verticais ($\alpha=90^\circ$) obtém-se, a partir da seguinte equação (BEBER, 2003):

$$V_{sw} = 0,90 * \frac{A_{sw} * d}{s} * f_{yw} \quad [\text{kN}]$$

De acordo com o REBAP, o valor de V_{wd} deve ser determinado pela expressão:

$$V_{wd} = 0,90 * d * \frac{A_{sw}}{s} * f_{syd} * (1 + \cot\alpha) * \text{sen}\alpha$$

Em que:

d – Altura útil da secção;

A_{sw} – Área da secção da armadura de esforço transversal (no caso de estribos, compreende os vários ramos de estribos);

s – Espaçamento das armaduras de esforço transversal;

f_{syd} – Valor de cálculo da tensão de cedência ou da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% do aço das armaduras do esforço transversal;

α – Ângulo formado pelas armaduras de esforço transversal com o eixo do elemento ($45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$).

4.2.1.3.3. Contribuição do reforço externo:

De acordo com Beber (2003), o critério de ruptura para o reforço ao esforço transversal é determinada muito mais pela eficiência da ancoragem do que pela resistência à tracção do compósito.

Segundo Beber (2003), o ACI recomenda que a contribuição do reforço externo com compósito de fibra de carbono pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$V_f = \frac{A_{fv} * \sigma_{f,e} * (\text{sen}\beta + \text{cos}\beta) * h_f}{S_f} \quad [\text{kN}]$$

Onde:

A_{fv} = Área da secção transversal de reforço ao esforço transversal $A_{fv} = 2 * n * t_f * W_f$;

$\sigma_{f,e}$ = Tensão efectiva no reforço.

Assim, o ACI propõe, uma tensão efectiva, oriunda de uma deformação específica efectiva (BEBER, 2003).

$$\sigma_{f,e} = \epsilon_{f,e} * E_f \quad [\text{kN/cm}^2]$$

Para o caso de envolvimento total da secção transversal, este modelo propõe uma limitação na deformação efectiva (0,4%), com a finalidade de preservar o funcionamento do mecanismo de engrenamento dos agregados (BEBER, 2003).

$$\epsilon_{f,e} = 0,004 \leq 0,075 * \epsilon_{f,u}$$

Por outro lado, para as configurações de reforço de envolvimento tipo ‘‘U’’ e somente nas laterais, observou-se que o modo de ruptura predominante é o deslocamento do reforço. Assim, as tensões de aderência devem ser analisadas com o intuito de determinar a deformação efectiva que pode ser alcançada. Esta deformação específica efectiva é determinada através de um coeficiente de redução K_v (BEBER, 2003).

$$\epsilon_{f,e} = K_v * \epsilon_{f,u} \leq 0,004$$

Através da expressão que se segue, pode-se determinar este coeficiente de redução, que é função da resistência do betão, da configuração do reforço e rigidez do compósito (BEBER, 2003).

$$K_v = \frac{K_1 * K_2 * L_e}{1190 * \epsilon_{f,u}}$$

O comprimento de ancoragem efectivo, L_e , pode ser determinado através da seguinte equação:

$$L_e = \frac{161,2}{(n * t_f * E_f)^{0,58}} \quad [\text{cm}]$$

Segundo Beber (2003), a consideração da resistência do betão e da configuração de reforço é alcançada através dos coeficientes de modificação K_1 e K_2 , respetivamente.

$$K_1 = 0,516 * \sqrt[3]{f_c^2}$$

$$K_2 = \frac{h_f - L_e}{h_f} \text{ envolvimento tipo "U"}$$

$$K_2 = \frac{h_f - 2L_e}{h_f} \text{ somente nas laterais}$$

Adicionalmente, salienta-se que esta metodologia não tenha sido confirmada para o reforço em regiões submetidas à combinação de elevadas solicitações de flexão e esforço transversal, assim como em regiões de momento negativo, o valor de K_v , é considerado adequado, também, para estes casos (BEBER, 2003).

4.2.1.4. Procedimentos para o dimensionamento do reforço ao esforço transversal

De acordo com B. R. G. de Lorenzi (2018), o ACI 440.2R (ACI, 2008) recomenda que, para o cálculo do dimensionamento do reforço é necessário determinar o valor da força cortante que será resistida pelo compósito estruturado com fibras de carbono. Após definir o esforço resistido pela fibra, é possível determinar a área do compósito necessária para o reforço.

O dimensionamento do reforço ao cisalhamento da viga é calculado a partir das expressões apresentadas na tabela 5.

Item calculado	Equação
Esforço cortante da fibra de carbono	$V_{rd} = V_c + V_{sw}$ $V_c = 0,09 * (f_{ck})^{2/3} * b_w * d$ $V_{sw} = 0,9 * d * f_{yd} * \left(\frac{A_{sw}}{s}\right)$ $V_{sd} = V_{rd} + 0,85 * V_{d,fc}$
Tensão de ruptura da fibra de carbono	$f_f = k_v * f_{fu}$ $k_v = \frac{k_1 * k_2 * L_e}{11900 * \epsilon_{fu}}$ $k_1 = \left(\frac{f_{cd}}{27}\right)^{2/3}$

	$k_2 = \frac{d_{fe}}{d_f}$ $L_e = \frac{23,3}{(n*t_f*E_f)^{0,58}}$ $d_{fe} = d_f - L_e \text{ (Envolvimento tipo U)}$ $d_{fe} = d_f - 2*L_e \text{ (Apenas nas laterais)}$
Área de fibra de carbono	$\frac{W_f}{s_f} = \frac{V_{d,fc}}{2*n*t_f*f_f*d_f*(\text{sen}\beta + \text{cos}\beta)}$

Tabela 5. - Equações para o dimensionamento do Reforço ao Cisalhamento da Viga com CFC (Fonte: B. R. G. de Lorenzi, 2018).

Onde:

V_{rd} – Esforço cortante resistente de cálculo da viga;

V_c – Parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao de treliça;

V_{sw} – Parcela de força cortante resistida pela armadura transversal;

V_{sd} – Esforço cortante solicitante da viga;

$V_{d,fc}$ – Esforço cortante resistido pela fibra de carbono;

A_{sw} – Área de aço do estribo existente na viga;

s – Espaçamento dos estribos;

f_f – Tensão de ruptura da fibra de carbono;

f_{fu} – Resistência última de ruptura resistida pela fibra de carbono;

k_v – Factor de redução definido pelo ACI 440 2R-08 (ACI, 2008);

k_1 – Factor de multiplicação estabelecido em função da resistência do betão;

k_2 – Factor de multiplicação estabelecido em função da configuração adotada para o reforço;

L_e – Comprimento efectivo de aderência;

ϵ_{fu} – Deformação última da fibra de carbono, definida pelo fabricante do material;

d_f – Comprimento da lâmina de fibra de carbono, normalmente definido por $d - hf$;

W_f – Largura da lâmina de fibra de carbono;

n – Quantidade de camadas de fibras de carbono;

t_f – Espessura da lâmina de fibra de carbono;

s_f – Espaçamento entre as lâminas;

E_f – Módulo de elasticidade da fibra de carbono;

d_{fe} – comprimento efetivamente aderido da fibra de carbono;

β – Ângulo de inclinação das fibras de carbono.

5. Capítulo V – Estudo Comparativo das Técnicas e Procedimentos de Cálculo:

Este capítulo servirá de apoio ao trabalho para efeitos de análise comparativa entre as duas técnicas abordadas. Será feito o dimensionamento do reforço em uma viga genérica de modo a obter resultados que permitam fazer uma análise comparativa entre as técnicas de reforço estrutural por encamisamento da secção transversal e o reforço estrutural com compósito de fibras de carbono.

Para o efeito foi adoptada uma viga de betão armado, simplesmente apoiada com 5,00m de vão livre que apoia duas lajes maciças de betão armado que constituem o pavimento de um edifício cujo os dados são os seguintes:

Materiais: B25/A400

Espessura das lajes: $h_{laje} = 10$ cm;

Recobrimento: $a = 3$ cm (Ambiente moderadamente agressivo);

Revestimento de $1,00$ kN/m²;

Sobrecarga de $3,00$ kN/m²;

Base da viga: $b_w = 20$ cm;

Altura da viga: $h = 50$ cm;

Armadura longitudinal: $A_s = 8,04$ cm²;

Armadura transversal: $\frac{A_{sw}}{s} = 2,00$ cm²/m;

Pretende-se efectuar o reforço estrutural desta viga por encamisamento da secção transversal e com compósito de fibras de carbono.

5.1. Reforço da Viga por Encamisamento da Secção Transversal

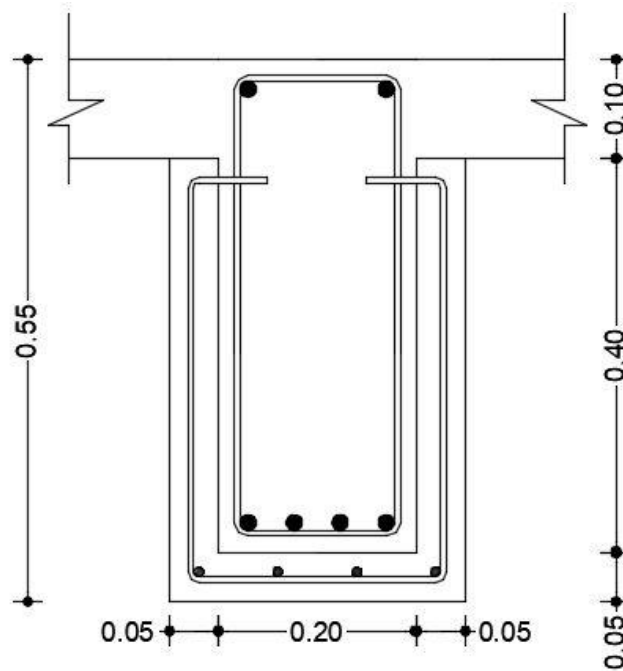


Figura 13. – Características geométricas da secção transversal da viga.

➤ Cargas na viga:

Carga Permanente: $g = g_{viga} + Pp_{betão\ adicional} = 17,50\text{ kN/m} + 0,05\text{ m}^2 \cdot 25\text{ kN/m}^3 = 18,75\text{ kN/m}$

Sobrecarga: $q = 12,90\text{ kN/m}$

➤ Esforços na viga:

$$V_{sd,g} = 46,88\text{ kN}$$

$$M_{sd,g} = 58,59\text{ kN.m}$$

$$V_{sd,q} = 32,25\text{ kN}$$

$$M_{sd,q} = 40,31\text{ kN.m}$$

➤ **Combinação Fundamental (E.L.U):**

$$M_{sd} = 1,5.M_{sd,g} + 1,5.M_{sd,q}$$

$$M_{sd} = 1,5.(58,59 + 40,31)$$

$$M_{sd} = 148,35 \text{ kN.m}$$

$$V_{sd} = 1,5.V_{sd,g} + 1,5.V_{sd,q}$$

$$V_{sd} = 1,5.(46,68 + 32,25)$$

$$V_{sd} = 118,70 \text{ kN}$$

a) Reforço a flexão:

NB: O cálculo será feito considerando duas camadas de armadura longitudinal.

1. Equilíbrio de momentos e profundidade da linha neutra:

$$\sum M_{A_S^r} = M_{sd}$$

$$F_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8 \cdot x = 0,68 \cdot 13300 \cdot 0,30 \cdot x = 2713,2 \cdot x \text{ [kN]}$$

$$z^r = d^r - 0,4 \cdot x = 0,52 - 0,4 \cdot x \text{ [m]}$$

$$F_s^i = A_S^i \cdot f_{syd}^i = 8,04 \cdot 10^{-4} \cdot 348000 = 279,79 \text{ kN}$$

$$d^r - d^i = 0,52 - 0,47 = 0,05 \text{ m}$$

$$M_{sd} = 148,35 \text{ kN.m}$$

$$2713,2 \cdot x \cdot (0,52 - 0,4 \cdot x) - 279,79 \cdot 0,05 = 148,35$$

$$0,4 \cdot x^2 - 0,52 \cdot x + 0,06 = 0$$

Então: $x = 0,13 \text{ m}$

2. Cálculo da armadura:

$$M_{rd} = \gamma_{n,M} \cdot (A_S^i \cdot z^i \cdot f_{syd}^i + A_S^r \cdot z^r \cdot f_{syd}^r)$$

$$M_{rd} = 148,35 \text{ kN.m}$$

$$\gamma_{n,M} = 0,90$$

$$A_s^i = 8,04.10E-4 \text{ m}^2$$

$$z^i = d^i - 0,4.x = 0,47 - 0,4.0,13 = 0,42 \text{ m}$$

$$f_{syd}^i = 348 \text{ MPa}$$

$$z^r = d^r - 0,4.x = 0,52 - 0,4.0,13 = 0,47 \text{ m}$$

$$f_{syd}^r = 348 \text{ MPa}$$

$$A_s^r = \frac{M_{rd}}{\gamma_{n,M} \cdot z^r \cdot f_{syd}^r} - \frac{A_s^i \cdot z^i \cdot f_{syd}^i}{z^r \cdot f_{syd}^r}$$

$$A_s^r = \frac{148,35}{0,9 \cdot 0,47 \cdot 348000} - \frac{8,04 \cdot 10^{-4} \cdot 0,42 \cdot 348000}{0,47 \cdot 348000} = 2,89 \text{ cm}^2$$

Seja: $A_s^r = 3,14 \text{ cm}^2$ [4Ø10mm]

3. Verificação da segurança da ligação:

$$\tau_2 = \frac{V_{sd}}{b^r \cdot z^r} \times \frac{A_s^r \cdot f_{syd}^r}{A_s^r \cdot f_{syd}^r + A_s^i \cdot f_{syd}^r}$$

$$\tau_2 = \frac{118,70}{0,3 \cdot 0,47} \times \frac{3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 348000}{3,14 \cdot 10E-4 \cdot 348000 + 8,04 \cdot 10E-4 \cdot 348000} = 236,44 \text{ kPa}$$

$$\tau_2 \leq \frac{2}{3} \cdot \frac{f_{ctm}}{\gamma_c} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2200}{1,5} = 977,78 \text{ kPa}$$

$$\tau_2 < \frac{2}{3} \cdot \frac{f_{ctm}}{\gamma_c} \text{ [OK!]}$$

b) Reforço ao esforço transversal:

$$V_{rd}^{m\acute{a}x} = \tau_2^i \cdot b_w^i \cdot d^i + 0,5 \cdot \tau_2^r \cdot (b_w^r - b_w^i) \cdot d^r$$

$$V_{rd}^{m\acute{a}x} = 4000 \cdot 0,20 \cdot 0,47 + 0,5 \cdot 4000 \cdot (0,30 - 0,20) \cdot 0,52 = 480 \text{ kN}$$

$$V_{sd} < V_{rd}^{m\acute{a}x} \text{ [OK!]}$$

$$V_{cd} = \tau_1^i \cdot b_w^i \cdot d^i + \tau_1^r \cdot b_w^r \cdot d^r$$

$$V_{cd} = 650 \cdot 0,20 \cdot 0,47 + 650 \cdot 0,30 \cdot 0,52 = 162,50 \text{ kN}$$

$$V_{sd} < V_{cd} \text{ [N\~{a}o \acute{e} necess\~{a}rio prever armadura espec\~{i}fica de esfor\~{c}o transversal!]}$$

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{min} = \rho \cdot b_w^r = 0,10 \cdot 0,30 = 3,00 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\text{Seja: } \frac{A_{sw}}{s} = 3,76 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ [2R}\varnothing\text{6@15cm]}$$

$$V_{rd}^r = \tau_1^r \cdot b_w^r \cdot d^r = 650 \cdot 0,30 \cdot 0,52 = 101,4 \text{ kN}$$

$$V_{rd}^i = \tau_1^i \cdot b_w^i \cdot d^i = 650 \cdot 0,20 \cdot 0,47 = 61,1 \text{ kN}$$

$$V_{rd}^r = 101,4 \text{ kN} < 2 \cdot V_{rd}^i = 122,2 \text{ kN} \text{ [OK!]}$$

5.2. Reforço da Viga com Compósito de Fibras de Carbono

➤ Cargas na viga:

Carga Permanente: $g = 17,50 \text{ kN/m}$

Sobrecarga: $q = 12,90 \text{ kN/m}$

➤ Esforços na viga:

$$V_{sd,g} = 43,8 \text{ kN}$$

$$M_{sd,g} = 54,7 \text{ kN.m}$$

$$V_{sd,q} = 32,3 \text{ kN}$$

$$M_{sd,q} = 40,3 \text{ kN.m}$$

➤ Combinação Fundamental (E.L.U):

$$M_{sd} = 1,5.M_{sd,g} + 1,5.M_{sd,q}$$

$$M_{sd} = 1,5.(54,7 + 40,3)$$

$$M_{sd} = 142,50 \text{ kN.m}$$

$$V_{sd} = 1,5.V_{sd,g} + 1,5.V_{sd,q}$$

$$V_{sd} = 1,5.(43,8 + 32,3)$$

$$V_{sd} = 114,15 \text{ kN}$$

a) Reforço a flexão:

1. Determinação do momento resistente da viga:

$$x = \frac{A_s \cdot f_{syd}}{0,68 \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{8,04 \cdot 10E-4 \cdot 348}{0,68 \cdot 0,213,3} = 0,15 \text{ m}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{syd} \cdot (d - 0,4 \cdot x) = 8,04 \cdot 10^{-4} \cdot 348000 \cdot (0,47 - 0,4 \cdot 0,15) = 114,71 \text{ kN.m}$$

$M_{Rd} < M_{sd}$ [É necessário reforço estrutural a flexão!]

2. Determinação da deformação inicial:

2.1. Equilíbrio de momentos e profundidade da linha neutra considerando apenas cargas permanentes:

$$\sum M_{A_s} = M_{sd}$$

$$F_c \cdot (d - 0,4 \cdot x) = M_{sd,g}$$

$$F_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot 0,8 \cdot x = 1808,8 \cdot x$$

$$1808,8 \cdot x \cdot (0,47 - 0,4 \cdot x) = 1,554,7$$

$$0,4 \cdot x^2 - 0,47 \cdot x + 0,045 = 0$$

Então: $x_0 = 0,11 \text{ m}$

$$\epsilon_{si} = \frac{f_{syd}}{E_s} = \frac{348}{200000} = 1,74 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{bi} = \frac{\epsilon_{si} \cdot (h - x_0)}{d - x_0} = \frac{1,74 \text{ ‰} \cdot (0,50 - 0,11)}{0,47 - 0,11} = 1,89 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{fc,b} = \frac{\epsilon_c \cdot (h - x_0)}{x_0} = \frac{3,5 \text{ ‰} \cdot (0,50 - 0,11)}{0,11} = 12,4 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{fc} = \epsilon_{fc,b} - \epsilon_{bi} = 12,4 \text{ ‰} - 1,89 \text{ ‰} = 10,51 \text{ ‰}$$

3. Dimensionamento do reforço:

Produto:	Sika Carbodur M 514
Tipo de fibra:	Carbono
Resistência ($\sigma_{fc,u}$):	3200 MPa
Módulo de Elasticidade (E_{fc}):	210 GPa
Largura:	50 mm
Espessura:	1,4 mm
Tipo:	Lâmina

Tabela 6. – Dados de fibra de carbono considerada (Fonte: Catálogo Sika - Sistemas de reforço estrutural)

$$M_{ref} = M_{sd} = 142,50 \text{ kN.m}$$

$$F_{fc1} = \frac{M_{ref} - F_c \cdot (d - 0,4x)}{(h - d)} = \frac{142,50 - 1808,8 \cdot 0,15 \cdot (0,47 - 0,4 \cdot 0,15)}{(0,50 - 0,47)} = 1041,96 \text{ kN}$$

$$F_{fc2} = \frac{M_{ref}}{(h - 0,4x)} = \frac{142,50}{(0,50 - 0,4 \cdot 0,15)} = 323,86 \text{ kN}$$

A secção não está em equilíbrio.

Então seja: $x = 0,185 \text{ m}$

$$F_{fc1} = \frac{M_{ref} - F_c \cdot (d - 0,4x)}{(h - d)} = \frac{142,50 - 1808,8 \cdot 0,15 \cdot (0,47 - 0,4 \cdot 0,185)}{(0,50 - 0,47)} = 332,91 \text{ kN}$$

$$F_{fc2} = \frac{M_{ref}}{(h - 0,4x)} = \frac{142,50}{(0,50 - 0,4 \cdot 0,185)} = 334,51 \text{ kN}$$

A secção está em equilíbrio.

$$\sigma_{fc} = E_{fc} \cdot \epsilon_{fc} = 210000 \cdot 10,51\% = 2207,1 \text{ MPa}$$

$$A_{fc} = \frac{F_{fc}}{\sigma_{fc}} = \frac{334,51 \cdot 10^4}{2207,1 \cdot 10^3} = 1,52 \text{ cm}^2$$

$$n = \frac{A_{fc}}{2 \cdot t_f \cdot W_f} = \frac{1,52}{2 \cdot 0,145} = 1 \text{ camada}$$

4. Comprimento de ancoragem:

$$l_{t,m\acute{a}x} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_{fc} \cdot t_{fc}}{2 \cdot f_{ctm}}} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{210000 \cdot 1,4}{2 \cdot 2,2}} = 180,94 \text{ mm}$$

b) Reforço ao esforço transverso:

1. Esforço cortante da fibra de carbono:

$$V_{cd} = \tau_1 \cdot b_w \cdot d = 650 \cdot 0,20 \cdot 0,47 = 61,1 \text{ kN}$$

$$V_{wd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{syd} = 0,9 \cdot 0,47 \cdot 2,82 \cdot 10^{-4} \cdot 348000 = 41,51 \text{ kN}$$

$$V_{rd} = V_{cd} + V_{wd} = 61,1 + 41,51 = 102,61 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = V_{rd} + 0,85 \cdot V_{d,fc}$$

$$V_{d,fc} = \frac{V_{sd} - V_{rd}}{0,85} = \frac{114,15 - 102,61}{0,85} = 13,58 \text{ kN}$$

2. Tensão de ruptura da fibra de carbono:

$$L_0 = \frac{2500}{(t_f \cdot E_f)^{0,58}} = \frac{2500}{(0,055 \cdot 3045 \cdot 10^4)^{0,58}} = 0,61 \text{ cm}$$

$$L_e = \frac{L_0}{\sqrt{n}} = \frac{0,61}{\sqrt{2}} = 0,43 \text{ cm}$$

$$k_1 = \left(\frac{f_{cd}}{27}\right)^{2/3} = \left(\frac{13,3}{27}\right)^{2/3} = 0,62$$

$$d_f = d - h_f = 0,47 - 0,10 = 0,37 \text{ m}$$

$$d_{fe} = d_f - L_e = 0,37 - 0,0043 = 0,37 \text{ m}$$

$$k_2 = \frac{d_{fe}}{d_f} = \frac{0,37}{0,37} = 1$$

$$\epsilon_{fc} = \frac{\sigma_{fc}}{E_{fc}} = \frac{3200}{210000} = 15,2 \text{ ‰}$$

$$k_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11900 \cdot \epsilon_{fu}} = \frac{0,62 \cdot 1 \cdot 0,43}{11900 \cdot 15,2 \cdot 10^{-3}} = 0,0015$$

$$f_f = k_v \cdot f_{fu} = 0,0015 \cdot 3200 = 48,00 \text{ MPa}$$

3. Área de fibra de carbono

$$\frac{W_f}{S_f} = \frac{V_{d,fc}}{2 \cdot n \cdot t_f \cdot f_f \cdot (\text{sen}\beta + \text{cos}\beta) \cdot d_f} = \frac{13,58}{2 \cdot 1 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 48 \cdot 10^3 \cdot (\text{sen}90^\circ + \text{cos}90^\circ) \cdot 0,37} = 0,27$$

$$S_f = \frac{W_f}{0,27} = \frac{5}{0,27} = 18,50 \text{ cm}$$

6. Capítulo VI - Conclusões e Recomendações:

6.1. Conclusão:

Problema investigado:

“ As falhas na execução e devido à utilização de estruturas de betão armado ocasionam o surgimento de problemas patológicos carecendo de reforço estrutural. ”

O reforço estrutural é uma das principais formas de recuperação e reabilitação de estruturas de betão armado, sendo que existem várias técnicas para a sua execução, dentre elas temos o reforço estrutural por encamisamento da secção transversal da estrutura de betão e o reforço estrutural com compósito de fibras de carbono, que é a técnica de reforço abordada com mais ênfase neste trabalho.

A necessidade do reforço estrutural surge devido a vários factores de carácter patológicos que afectam as construções, tais como, as falhas na execução assim como falhas devido à utilização da estrutura. Portanto com as técnicas abordadas neste trabalho, pode-se concluir que o reforço de estruturas utilizando compósito de fibras de carbono é uma técnica que atende as necessidades e exigências das construções que carecem de reforço ou reabilitação estrutural, devido as suas características de alta resistência mecânica e rápida execução, da mesma forma pode-se concluir que o reforço estrutural por encamisamento de secção transversal é uma técnica bastante utilizada devido a um maior conhecimento da técnica, baixo custo dos materiais empregues e que entretanto tem a desvantagem de haver a necessidade de alteração da geometria da peça que em muitas vezes compromete a arquitectura das construções.

A técnica de reforço com compósito de fibras de carbono possui uma grande vantagem no momento da sua aplicação, pois permite que o reforço seja executado quer em locais públicos de muita movimentação quer em locais de pouca movimentação sem a necessidade de isolamento da área de intervenção. Porém, é uma técnica ainda pouco utilizada e que possui uma desvantagem

no seu uso devido ao seu alto custo e a necessidade de mão de obra qualificada tecnicamente para a sua aplicação.

A técnica do reforço por encamisamento da secção transversal, é a mais utilizada quando se pretende reforçar estruturas em que a necessidade de carregamento não seja muito elevada, visto que este tipo de reforço resume-se basicamente em adicionar uma armadura suplementar na qual estas ficam inseridas numa camada adicional de betão, pelo que a estrutura sofre um aumento da carga permanente devido a nova camada de betão.

Também pode-se concluir que os procedimentos de cálculo e de dimensionamento dos reforços são feitos com base nas teorias semelhantes aos de um cálculo de dimensionamento de uma viga não reforçada, mas considerando a existência das componentes dos reforços referentes quer ao do reforço com fibras de carbono quer ao do reforço por encamisamento da secção transversal de betão. Porém, os procedimentos adoptados para o cálculo e dimensionamento dos reforços são feitos com base em normas internacionais, tais como o ACI 440.2R (ACI, 2008), norma americana, pelo facto de não existirem ainda normas nacionais que abordam sobre métodos ou técnicas de reforço estrutural.

Contudo pode-se concluir que entre as duas técnicas apresentadas, a técnica de reforço estrutural com compósito de fibras de carbono é a melhor solução sob ponto de vista de capacidade de resistência no incremento de cargas assim como do ponto de vista da sua aplicação em obra.

6.2. Recomendações:

Neste trabalho foram abordadas duas das várias técnicas de reforço estrutural, com destaque para o reforço estrutural utilizando compósito de fibras de carbono, que é uma técnica bastante eficiente e eficaz, devido as várias vantagens que ela possui, pelo que podemos considera-la como um avanço da tecnologia na área de construção civil, como também foi abordado sobre o reforço estrutural por encamisamento da secção transversal que é uma técnica tradicionalmente utilizada para reforçar estruturas de betão armado devido a um melhor entendimento dos técnicos de construção civil.

Contudo, sugerem algumas recomendações que podem contribuir para que principalmente a técnica de reforço estrutural com compósito de fibras de carbono seja uma opção a ser empregue na construção civil de modo a solucionar problemas mais graves de reforço estrutural nas construções. Portanto recomenda-se que haja um interesse pela técnica de reforço com compósito de fibras de carbono visto que é uma técnica bastante eficiente e eficaz do ponto de vista da capacidade estrutural bem como do ponto de vista da sua aplicação.

Do ponto de vista dos procedimentos da sua execução ou aplicação, pode-se recomendar que se desenvolvam mais métodos eficientes e evoluídos tecnicamente para se fazer a preparação do substracto do betão ao qual o reforço será aderido, uma vez que trata-se de um reforço externo na qual as condições de aderência são determinantes.

Também recomenda-se que o reforço por encamisamento da secção transversal do betão deve ser utilizado em casos de estruturas pouco solicitadas, visto que é a técnica mais acessível em termos de custos e disponibilidade de materiais.

Do ponto de vista dos procedimentos de cálculo e de dimensionamento, é recomendável que se façam estudos para que se possa desenvolver normas ou regulamentos nacionais que abordam conteúdos relativos aos diversos métodos de reforço estrutural utilizados no mercado da construção civil.

7. Referências Bibliográficas:

Igor do E. S. B., Mayane C. L., Rayani S. O. & Suzana P. G. (2018). Análise de Reforço Estrutural em Vigas de Concreto Armado Utilizando Manta de Fibra de Carbono Aplicado em Unidade de Ensino do Município de Aracruz.

FONTES, Gabriela Azevedo; CUNHA, Larissa Lisboa. Estudo do Ganho de Resistência da Aplicação de Manta de Fibras de Carbono em Vigas de Concreto Simples. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 77p. 2017.

DE LORENZI, Bruna Rafaella Gonçalves. Dimensionamento do Reforço de uma Viga de Transição em Concreto Armado com Fibras de Carbono. TCC, curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

Marcus V. C. S. & Thiago H. Lira da S. Reforço Estrutural em Estrutura de Concreto Armado.

BEBER, Andriei José. Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono. Pós-Graduação, curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

JUVANDES, Luis Filipe Pereira. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras (FRP). Monografia, curso de Licenciatura em Engenharia Civil, Universidade do Porto, 2002.

MACAHDO, Ari de Paula (2010). Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono.

MATOS, Rodrigo Valente. Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Compósitos de Fibras de Carbono: Estudo de Caso em Vigas de Transição de Edifício Residencial. Monografia, curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

SOTO, Rafael Cavalcante. Reforço e Recuperação de Vigas de Concreto Armado. TCC, curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

FORTES, Adriano S. Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento. Relatório de investigação, curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2002.

REIS, Andréa Prado Abreu. Reforço de Vigas de concreto Armado Por Meio de Barras de Aço Adicionais de Alto Desempenho. Dissertação, curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

DO NASCIMENTO, Daniel Machado; DA CRUZ, Laryssa Fernanda Figueira Marques & GOLIATH, Kíssila Botelho. Reforço Estrutural Misto Para Correção de Deformação – Estudo de Caso. Artigo científico. Curso de Engenharia Civil, Universidade Estácio de Sá.

MONTANARI, Nicolas & GONÇALVES, Peterson Erika. Fibras de Carbono Na Construção Civil. Artigo científico. Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Paraíba.

BEZERRA, Felipe de Moura; DOS SANTOS, Filipe Lima. A Utilização da Fibra de Carbono como Reforço Estrutural e sua Eficiência em Comparação com o Aço. TCC. Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, Rio Grande do Norte, 2019.

Gilberto C., Guilherme A. C. & Clarissa de A. C. Reforço Estrutural com Fibra de Carbono.

CORREIA, João Ramôa. Protecção, Reparação e Reforço de Estruturas de Betão Armado. Artigo científico, curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2011.

GOMES, Augusto & APPLETON, Júlio. Reforço de Estruturas de Betão Armado por Encamisamento das Secções. Artigo científico. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE) N° 42. Instituto Superior Técnico.

ADORNO, Felipe Vieira; DIAS, Frederico Oliveira & SILVEIRA, João Clímaco de Oliveira. Recuperação e Reforço de Vigas de Concreto Armado. Monografia. Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 2015.

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

REBAP – Regulamento de Estruturas de Betão a Armado e Pré-Esforçado.

EUROCÓDIGO 2 – Projectos de Estruturas de Betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.