

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FERNANDA HECK SCHNEIDER

JACQUELINE DA LUZ SCHULTZ

LUÍSA ROCHA WIERZBICKI

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA ANCORAGEM DO REFORÇO DE  
FIBRAS DE CARBONO EM VIGAS SUBMETIDAS À FLEXÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

FERNANDA HECK SCHNEIDER  
JACQUELINE DA LUZ SCHULTZ  
LUÍSA ROCHA WIERZBICKI

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA ANCORAGEM DO REFORÇO DE  
FIBRAS DE CARBONO EM VIGAS SUBMETIDAS À FLEXÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção de título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

Co-orientador: Prof. Me. Amacin Rodrigues  
Moreira

CURITIBA

2016



Ministério da Educação  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
*Campus Curitiba – Sede Ecoville*  
Departamento Acadêmico de Construção Civil  
Curso de Engenharia Civil

---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### ANÁLISE DO DESEMPENHO DA ANCORAGEM DO REFORÇO DE FIBRAS DE CARBONO EM VIGAS SUBMETIDAS À FLEXÃO

Por

FERNANDA HECK SCHNEIDER  
JACQUELINE DA LUZ SCHULTZ  
LUÍSA ROCHA WIERZBICKI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 23 de novembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador – Wellington Mazer, Dr.  
UTFPR

---

Prof. Co-orientador Amacin Rodrigues Moreira, Me.  
UTFPR

---

Prof. José Manoel Caron, Me.  
UTFPR

---

UTFPR - Deputado Heitor de Alencar Furtado, 4900 - Curitiba - PR Brasil  
[www.utfpr.edu.br](http://www.utfpr.edu.br) [dacoc-ct@utfpr.edu.br](mailto:dacoc-ct@utfpr.edu.br) telefone DACOC: (041) 3279-4500

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos, primeiramente, a nossos amados pais, por confiarem em nosso potencial e por todo o apoio ao longo dos anos, principalmente durante a realização deste trabalho. Sem o amor, suporte e paciência nada disso seria possível.

Ao orientador deste trabalho, Prof. Dr. Wellington Mazer, por ter acreditado desde o primeiro instante e não ter medido esforços em nos apoiar e incentivar no decorrer dos últimos meses.

Ao co-orientador, Prof. Me. Amacin Rodrigues Moreira, por todo incentivo e disposição sempre que necessário.

À Profa. Dra. Elisabeth Penner, por todas as instruções para o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa MC Bauchemie, pelo fornecimento da lâmina de fibra de carbono, sem a qual este trabalho não teria sido possível.

Agradecemos aos amigos, que souberam compreender a importância deste trabalho e sempre trouxeram o auxílio, conforto e motivação necessários para que conseguíssemos alcançar nosso objetivo.

A todos os familiares e amigos, que de forma direta e indireta nos conduziram a esta conquista.

Aos colegas de graduação, pela convivência e aprendizado ao longo dos últimos anos.

Agradecemos umas às outras pela confiança depositada, pela paciência que por vezes fez-se necessária e pela amizade construída.

## RESUMO

SCHNEIDER, Fernanda H.; SCHULTZ, Jacqueline da L.; WIERZBICKI, Luísa R. Análise do desempenho da ancoragem do reforço de fibras de carbono em vigas submetidas à flexão. 2016. 78f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

O reforço e a recuperação de concreto armado têm-se tornado cada vez mais frequente, devido ao envelhecimento da estrutura ou à aplicação indevida de cargas. Também há a possibilidade de a construção ter sido mal executada e/ou planejada. Por isso, existem alguns métodos de reforço estrutural, com a finalidade de readequar a estrutura em questão. Este trabalho tem como objetivo analisar o reforço de compósitos de fibras de carbono em vigas de concreto armado, submetidas ao esforço de flexão simples, avaliando a aplicação de carga centralizada em vigas biapoiadas. Foram utilizadas vigas de referência sem reforço, vigas apenas com reforços laminados e vigas com lâminas e ancoragem do tipo “U”. Para isso, foi feito um estudo teórico sobre o assunto, posteriormente, a aplicação dos reforços, para então a realização dos ensaios. Com a obtenção dos dados, puderam ser feitas as comparações do método escolhido com valores teóricos calculados e entre os diferentes tipos de aplicações. Com a finalização do estudo, foi possível concluir que o reforço para a flexão simples é eficiente e que se faz desnecessária a aplicação da ancoragem extra, já que a lâmina por si só, neste caso, possui comprimento suficiente para cumprir a função de ancoragem reta. É muito importante que haja novos estudos na área, com outros métodos e análises diferentes, pois as pesquisas em concreto armado reforçados ainda são muito recentes e escassas.

Palavras-chave: Concreto armado. Reforço estrutural. Compósitos de fibra de carbono. Flexão simples. Ancoragem.

## ABSTRACT

SCHNEIDER, Fernanda H.; SCHULTZ, Jacqueline da L.; WIERZBICKI, Luísa R. Analysis of performance of the anchoring carbon fiber reinforcement beams subjected to bending. 2016. 78f. Completion of course work (Graduation) – Civil Engineering Superior Course. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The reinforcement and recovery of reinforced concrete has become increasingly frequent due to the aging of the structure or the improper application of loads. There is also the possibility that the construction may have been poorly executed and/or planned. Therefore, there are some methods of structural reinforcement, in order to re-adjust the structure in question. This study aims to analyze the reinforcement of carbon fiber composites in reinforced concrete beams subjected to the simple bending stress, evaluating the application of centralized load in bi-supported beams. Were used reference beams without reinforcement, beams with only rolled reinforcements and beams with blades and "U" type anchoring. For that, a theoretical study was made about the subject, afterwards, the application of reinforcements, for then the realization of the tests. By the obtaining of the data, the comparisons of the chosen method with calculated theoretical values and between the different types of applications could be made. With the conclusion of the study, it was possible to conclude that the reinforcement for the simple flexion is efficient and that the application of the extra anchorage is not necessary, since the blade alone is of sufficient length to fulfill the function of straight anchorage. It is very important that there be new studies in the area, with other methods and different analyzes, since reinforced concrete research is still very recent and scarce.

Keywords: Reinforced concrete. Structural reinforcement. Carbon fiber composites. Simple bending. Anchoring.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Hipóteses para reconversão de estruturas com desempenho insatisfatório .....	20
Figura 2 – Diagrama tensão-deformação para fibras e metais.....	24
Figura 3 – Fibra de vidro em formato de manta .....	25
Figura 4 – Imagem ilustrativa da manta de fibra de aramida.....	26
Figura 5 – Exemplo de aplicação de manta de fibra de carbono em reforço estrutural .....	27
Figura 6 – Ampliação em microscópio eletrônico do sistema <i>MBrace</i> <sup>TM</sup> .....	29
Figura 7 – Diagramas tensão-deformação dos sistemas CFC .....	33
Figura 8 – Detalhamento do sistema de reforço estrutural com fibra de carbono.....	35
Figura 9 – Tensão interna e distribuição de tensões no estado-limite último.....	38
Figura 10 – Terminações recomendadas para as lâminas de CFC.....	44
Figura 11 – Domínios de estado-limite último (ELU) de uma seção transversal.....	47
Figura 12 – Indicação da posição da linha neutra e diagramas de deformação .....	47
Figura 13 – Viga biapoiada com uma carga concentrada central.....	50
Figura 14 – Esquema de ensaio a flexão de três pontos em viga de concreto armado .....	52
Figura 15 – Detalhamento da armadura na seção transversal das vigas .....	53
Figura 16 – Detalhamento da aplicação da lâmina de CFC nas vigas do Grupo 2.....	54
Figura 17 – Detalhamento da aplicação da lâmina e manta de CFC nas vigas do Grupo 3 .	54
Figura 18 – Corte da lâmina de CFC .....	59
Figura 19 – Corte da manta de CFC.....	59
Figura 20 – Arredondamento dos ângulos retos na região de aplicação da ancoragem .....	60
Figura 21 – Mistura dos componentes da resina epóxi .....	60
Figura 22 – Aplicação da resina epóxi e posicionamento das lâminas.....	61
Figura 23 – Retirada de possíveis bolhas de ar da interface resina-lâmina.....	61
Figura 24 – Aplicação de resina epóxi na região do posicionamento da ancoragem .....	62
Figura 25 – Imprimação e retirada das possíveis bolhas de ar na interface manta-resina ...	62
Figura 26 – Vigas do Grupo 2 após a execução do reforço.....	63
Figura 27 – Vigas do Grupo 3 após a execução do reforço.....	63
Figura 28 – Viga posicionada para início do rompimento.....	64
Figura 29 – Esquema de ensaio à flexão de 3 pontos nas vigas do Grupo 2 .....	64
Figura 30 – Esquema do deslocamento vertical monitorado .....	65
Figura 29 – Detalhe da disposição do relógio comparador e célula de carga.....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Deslocamentos verticais médios .....	67
Tabela 2 – Carga de ruptura e tipo de ruptura .....	68
Tabela 3 – Valores médios de carga de ruptura.....	68
Tabela 4 – Carga e deslocamento vertical no momento de aparecimento de fissuras .....	69
Tabela 5 – Carga aplicada no início da delaminação .....	70
Tabela 6 – Cálculo do Módulo de rigidez à carga de 30 kN .....	71
Tabela 7 – Momentos Fletores .....	72
Tabela 8 – Relação percentual entre a carga de ruptura e a carga a partir da qual se inicia a fissuração .....	73
Tabela 9 – Comparação entre momento de cálculo e momento médio experimental.....	74

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Deslocamento vertical médio em função da carga aplicada .....	67
Gráfico 2 – Carga de ruptura média.....	69
Gráfico 3 – Momento Fletor Máximo .....	72

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades Típicas das Fibras de Carbono à Tração .....	32
Quadro 2 – Características dos Sistemas CFC.....	32

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_{\text{conc}}$	Coeficiente de dilatação térmica do concreto
$\alpha_{\text{aço}}$	Coeficiente de dilatação térmica do aço
$\xi_{fu}$	Deformação específica máxima permissível na fibra de carbono
$\xi_{fc}$	Deformação específica da fibra de carbono à tração;
$\xi_b$	Deformação específica na fibra de carbono considerada no reforço para o carregamento máximo
$\xi_{bi}$	Deformação específica pré-existente quando da aplicação do reforço de fibra de carbono.
$\xi_c$	Deformação específica do concreto
$\xi_s$	Deformação específica do aço
$x$	Altura da linha neutra
$d$	Altura útil da seção
$k_x$	Relação de deformação entre aço e concreto
$M_{\text{maj.máx}}$	Momento fletor máximo que atuará na viga (majorado)
$M_{\text{resist}}$	Momento resistente à flexão
$F_c$	Força resultante da seção comprimida do concreto
$F'_s$	Força resultante da seção da armadura de compressão
$F_s$	Força resultante da seção da armadura de tração
$F_f$	Força resultante da seção tracionada de fibra de carbono
$b_w$	Largura da seção retangular
$\psi$	Coeficiente de redução da força no CFC
$f_c$	Resistência à compressão do concreto.
$f_{ck}$	Resistência característica do concreto à compressão
$\gamma_c$	Coeficiente de ponderação da resistência do concreto
$A'_s$	Área da seção transversal da armadura de compressão
$f'_s$	Resistência da tensão de compressão no aço
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço;
$f_y$	Resistência do aço à tração
$f_{yk}$	Resistência característica do aço à tração
$\gamma_s$	Coeficiente de ponderação da resistência do aço
$A_s$	Área da armadura de tração da seção transversal
$f_s$	Resistência da tensão de tração no aço
$A_f$	Área da seção transversal da fibra de carbono;
$f_f$	Resistência à compressão na fibra de carbono;

$\xi_f$	Deformação específica da fibra de carbono
$E_f$	Módulo de elasticidade da fibra de carbono
$h$	Altura seção transversal
$M_{maj}$	Momento majorado
$\Phi$	Fator de redução aplicado à contribuição da fibra de carbono em função da recente existência da fibra de carbono.
$d''$	Distância entre bordo mais comprimido e o centroide da armadura de compressão;
$M_{cr}$	Momento crítico
$l_{t,max}$	Comprimento de ancoragem
$t_{fc}$	Espessura da lâmina de fibra de carbono
$f_{ct,m}$	Resistência média à tração do concreto
$M$	Momento fletor
$z$	Distância entre as resultantes de tração e compressão
$c$	Espessura de cobrimento adotada
$\phi_t$	Diâmetro da armadura transversal
$\phi$	Diâmetro da armadura longitudinal
$\mu$	Momento fletor relativo
$f_{cd}$	Resistência de cálculo do concreto à compressão
$f_{ck}$	Resistência característica do concreto à compressão
$\omega$	Taxa mecânica da armadura
$M_k$	Momento fletor característico
$P_k$	Carga característica resistente
$\rho$	Taxa geométrica de armadura longitudinal de tração
$A_c$	Área de concreto da seção transversal
$\sigma_{sd}$	Tensão de tração na armadura
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço
$P_1$	Carga centrada aplicada
$D_1$	Descolamento máximo da flecha
$l$	Comprimento do vão
$W_E$	Trabalho total das forças externas
$E$	Módulo de elasticidade
$I$	Momento de inércia da seção transversal

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3 JUSTIFICATIVA.....	15
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>17</b>
2.1 CONCRETO .....	17
2.1.1 Vida Útil e Durabilidade .....	18
2.2 RECUPERAÇÃO E REFORÇO .....	20
2.3 COMPÓSITOS.....	22
2.3.1 Fibra de vidro.....	24
2.3.2 Fibras de aramida.....	25
2.3.3 Fibra de carbono.....	26
2.3.4 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras (FRP) .....	27
2.4 COMPÓSITOS ESTRUTURADOS COM FIBRA DE CARBONO (CFC).....	28
2.4.1 Propriedades dos Compósitos Estruturados com Fibra de Carbono .....	30
2.4.2 Processo Construtivo do Sistema Compósito.....	33
2.4.3 Aplicação do Sistema CFC .....	35
2.5 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO COM FIBRAS DE CARBONO.....	37
2.5.1 Dimensionamento pelo Estado-Limite Último .....	38
2.5.2 Determinação do Momento Fletor Resistente do Reforço .....	40
2.5.3 Considerações Adicionais para Dimensionamento do Reforço .....	43
2.5.4 Comprimento de Aderência do Sistema CFC .....	45
2.6 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS BIAPOIADAS.....	45
2.6.1 Deformações na flexão.....	50
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>51</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS VIGAS.....	52
3.1.1 Capacidade Resistente da Viga de Referência .....	54
3.1.2 Capacidade Resistente da Viga com reforço em CFC.....	56
3.1.3 Cálculo do Comprimento de Aderência do Sistema CFC .....	58
3.2 APLICAÇÃO DO REFORÇO .....	58
3.3 DETALHAMENTO DOS ENSAIOS.....	64

<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>67</b>
<b>5 ANÁLISE E DISCUSSÕES.....</b>	<b>71</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo relatos históricos, o ser humano, pela necessidade de abrigo, desenvolveu suas primeiras técnicas construtivas com construções em madeira entre 10.000 a.C. e 4.000 a.C. As primeiras construções em pedra mais relevantes conhecidas são as pirâmides do Egito, por volta de 2.500 a.C. Tais técnicas construtivas foram sendo aperfeiçoadas e desenvolvidas com o passar do tempo. Surgiram, então, as estruturas metálicas, que não passavam de barras de ferro fundido sobrepostas. Graças ao avanço tecnológico, com a descoberta do cimento no século XX, surgiu o concreto, uma “pedra” artificial, resistente, econômica, cuja principal vantagem é a de ser moldável de acordo com sua finalidade. Associando-se barras metálicas ao concreto, teve-se o concreto armado, um elemento ainda mais resistente aos esforços solicitantes (BEBER, 2003).

As estruturas de concreto estão presentes em praticamente todas as construções e, por isso, o conhecimento de seu comportamento se faz cada vez mais necessário (BEBER, 2003).

Quando da sua concepção, as estruturas têm uma expectativa de vida útil, qualquer que seja o material escolhido, que irá depender do tipo e da necessidade especificada. Algumas vezes, esta capacidade de atendimento ao desempenho requisitado é afetada e a estrutura tem sua vida útil diminuída, seja por erros na etapa de projeto, durante a execução, condições de utilização inadequadas (como por exemplo, o incremento de carga) ou falta de manutenção e acompanhamento dos sistemas construtivos. Assim, as estruturas que possuem comportamento abaixo dos limites mínimos normatizados apresentarão manifestações patológicas, por meio das quais se podem identificar as causas do problema estrutural e definir uma solução adequada para intervenção (SOUZA e RIPPER, 2009).

Ao ocorrer um incremento de carga, surgem esforços como momentos fletores, força cortante, força normal e outras solicitações, que, como não previstos no momento do cálculo da estrutura, comprometerão seu desempenho e exigirão reforços estruturais (BALAGURU et al., 2008).

Existem diversas técnicas como possíveis soluções para restauração das condições mínimas necessárias de desempenho estrutural. A escolha dependerá das condições manifestadas e do tipo de estrutura (SOUZA e RIPPER, 2009).

Dentre elas, tem-se a opção de reforço estrutural externo em vigas de concreto armado fazendo uso de compósitos de fibra de carbono.

Segundo Balaguru et al. (2008), a fibra de carbono vem sendo utilizada pela indústria naval, aeroespacial e automobilística há mais de seis décadas. Já o uso dos compósitos na construção civil, data de aproximadamente três décadas, ou seja, seu uso ainda é recente. Porém, com o início dos anos 80, iniciaram-se muitos estudos na área, a fim de demonstrar a eficiência do uso de compósito de fibra de carbono no reforço estrutural. O reforço em vigas, fazendo-se uso desta técnica, apesar de seu custo relativamente elevado, vem ganhando cada vez mais espaço, principalmente devido à facilidade de aplicação e a suas excelentes propriedades, como elevada rigidez e baixa corrosão (BALAGURU et al., 2008).

### 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é analisar o desempenho das ancoragens do reforço de compósitos de fibras de carbono, em vigas submetidas ao esforço de flexão simples.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono submetidas à flexão simples.

Analisar a aderência entre a lâmina de compósito de fibra de carbono e o substrato de concreto armado.

Estudar a eficiência da ancoragem feita com manta de fibra de carbono nas extremidades.

Verificar o aumento de rigidez da estrutura devido ao reforço de compósito de fibra de carbono.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Em meados da década de 90 na cidade de Tóquio, o governo japonês tomou a decisão de preparar as construções existentes para as constantes ameaças

sísmicas, em particular no sistema viário. A partir de um acordo entre as entidades públicas e privadas daquele país, deu-se início ao estudo de reforço das estruturas com utilização de compósitos de fibra de carbono, buscando os melhores resultados de um material muito resistente, de fácil aplicação e que não gera problemas de durabilidade às estruturas de concreto, como por exemplo, a corrosão nas armaduras (SOUZA e RIPPER, 2009).

Portanto, o estudo deste produto, na indústria da Construção Civil, é um passo importante para a busca incessável por novas tecnologias, que sejam cada vez mais simples, resistentes e duráveis, reabilitando as estruturas de concreto que tiveram sua funcionalidade comprometida (SOUZA e RIPPER, 2009).

Em primeira análise, utilizando o reforço estrutural de compósitos de fibras de carbono, pode-se melhorar o desempenho à flexão das vigas, portanto, aumentar a capacidade resistente da estrutura de concreto armado.

Segundo Souza e Ripper (2009), a aplicação em vigas exige elevado cuidado no desenvolvimento dos detalhes que devem ser utilizados para o sistema de amarração do compósito.

Devido ao caráter recente das pesquisas sobre o tema e a difusão do uso dos compósitos de fibra de carbono como técnica de reforço estrutural, o mercado tem a necessidade de novos estudos e aplicações na área, assim como, de profissionais capacitados e conhecedores do assunto.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados conceitos, informações, características e estudos encontrados na literatura disponível sobre o assunto em questão, sendo dividido em subitens, com a seguinte sequência: concreto, recuperação e reforço, compósitos, compósitos estruturados com fibras de carbono (CFC), dimensionamento à flexão com fibras de carbono e dimensionamento de vigas biapoiadas.

### 2.1 CONCRETO

O início dos registros a respeito do uso do concreto, em sua forma mais primitiva, remonta ao Império Egípcio e Romano. Sua história confunde-se com a do cimento, que, adicionado de água, atua como aglomerante necessário para união dos materiais constituintes do concreto, costumeiramente pedra e areia, denominados agregados. Já em sua forma mais moderna, o cimento foi patenteado em 1824, por James Parker e Joseph Aspdin, com a denominação de Cimento Portland (CARVALHO e FILHO, 2014; GRAZIANO, 2005).

Historicamente, o concreto armado é atribuído a Lambot, francês que construiu, em meados de 1800, um pequeno barco em concreto armado, exibido em uma feira de exposição em Paris, no ano de 1850, sendo patenteado em 1855. No entanto, foi Joseph Monier que, em 1867, fez o primeiro uso prático do concreto armado (CARVALHO e FILHO, 2014; GRAZIANO, 2005).

O concreto é o material de construção mais utilizado, segundo Mehta e Monteiro (2008). Os autores afirmam que existem três razões principais para tal fato: a primeira refere-se à excelente resistência do concreto à água, diferentemente da madeira e aço comum; a segunda é a facilidade com a qual elementos estruturais de concreto podem ser obtidos, por meio de uma variedade de formas e tamanhos, devido à consistência plástica que o material apresenta no estado fresco; e a terceira é o baixo custo e a rápida disponibilidade do material.

O concreto é obtido pela mistura adequada de cimento, agregado fino, agregado graúdo e água. Em algumas situações, são incorporados produtos

químicos, ou outros componentes, como microsilica, polímeros, entre outros (CARVALHO e FILHO, 2014; NEVILLE e BROOKS, 2013).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), concreto armado é o concreto que normalmente contém barras de aço e que é projetado levando-se em conta que os dois materiais atuam juntos na resistência aos esforços solicitantes.

Desta forma, os dois materiais, aço e concreto, devem trabalhar solidariamente, o que é possível devido às forças de aderência entre a superfície do aço e concreto, pois as barras de aço tracionadas (armadura tracionada) só funcionam quando, pela deformação do concreto que as envolve, começam a ser alongadas, característica das armaduras passivas (CARVALHO e FILHO, 2014).

É interessante ressaltar que a excelente relação entre o concreto e o aço advém, além da boa aderência, da proximidade entre seus coeficientes de dilatação térmica ( $\alpha_{\text{conc}} = 1.10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  e  $\alpha_{\text{aço}} = 1,2.10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) e também ao fato de que o concreto, ao envolver o aço, o protege satisfatoriamente, em condições normais, contra oxidação e altas temperaturas (CARVALHO e FILHO, 2014).

### 2.1.1 Vida Útil e Durabilidade

Por vida útil de um material entende-se o período durante o qual suas propriedades permanecem acima dos limites mínimos normatizados. Já desempenho é o comportamento em serviço de cada produto ao longo de sua vida útil, que irá depender do resultado das etapas de projeto, construção e manutenção (ABNT NBR 6118, 2014; SOUZA e RIPPER, 2009).

A durabilidade é a capacidade de que o concreto seja capaz de suportar as condições para as quais foi projetado durante a vida da estrutura. A falta de durabilidade pode ser causada por agentes externos advindos do meio ou por agentes internos ao concreto. As causas podem ser físicas, mecânicas ou químicas. As físicas vêm da ação do congelamento e das diferenças entre as propriedades térmicas do agregado e da pasta de cimento, as mecânicas estão associadas principalmente à abrasão e as químicas podem ser: ataques por sulfatos, ácidos, água do mar e cloretos, que induzem à corrosão eletroquímica da armadura (NEVILLE e BROOKS, 2013).

A durabilidade está também diretamente relacionada à manutenção adequada da estrutura, ou seja, ao conjunto de rotinas que tenham por finalidade o prolongamento da vida útil da obra, a um custo compensador. Em termos de manutenção, fica clara a corresponsabilização, pois proprietário, investidor e usuário deverão sempre estar dispostos a suportar o custo com o sistema de manutenção concebido pelos projetistas, que deverá ter sido respeitado e viabilizado pelo executor (SOUZA e RIPPER, 2009).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que fornece regras, diretrizes ou características mínimas para atividades ou para seus resultados, destaca na NBR 6118:2014 – Projeto e execução de estruturas de concreto armado, a preocupação com a qualidade e durabilidade das estruturas, apresentadas na seção 5, Requisitos gerais de qualidade da estrutura e avaliação da conformidade do projeto e na seção 6, Diretrizes para a durabilidade de estruturas de concreto.

As normas e regulamentos permitem aos responsáveis individualizar, convenientemente, modelos de durabilidade para as suas construções, a partir da definição de classes de exposição das estruturas e de seus componentes em função da deterioração a que estarão submetidas. Para cada caso ou combinação de casos, as classes de exposição indicarão níveis de risco ou parâmetros mínimos a serem observados como condição primeira para que se consiga uma construção durável. Assim estarão definidos (SOUZA e RIPPER, 2009):

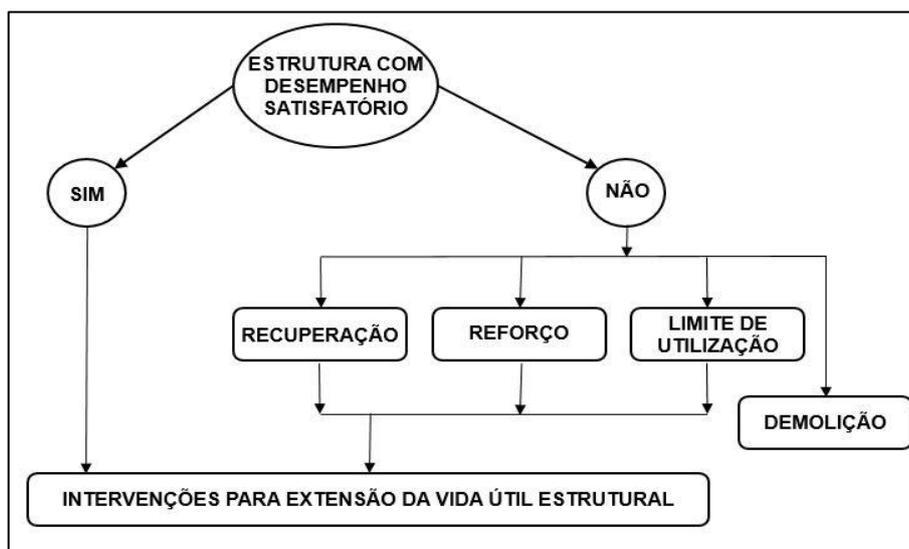
- a) Dosagem mínima de cimento;
- b) Fator água/cimento máximo;
- c) Classe de resistência mínima do concreto;
- d) Cobrimento mínimo das barras das armaduras;
- e) Método de cura.

Com a observância destes limites mínimos, espera-se que o desempenho das estruturas, de um modo geral, e atendidas as questões dimensionais, seja no seu todo durável. Apesar disto, devido a inevitáveis falhas involuntárias e casos de imperícia, tem sido constatado que algumas estruturas acabam por ter desempenho insatisfatório, se confrontadas com as finalidades a que se propunham (SOUZA e RIPPER, 2009).

## 2.2 RECUPERAÇÃO E REFORÇO

A recuperação ou o reforço de estruturas de concreto armado com manifestações patológicas envolve inicialmente um detalhado estudo a fim de auxiliar na escolha da solução mais adequada para a situação. Deve-se considerar, além das questões técnicas, a relação custo/benefício do tratamento escolhido. Além disso, deve-se ter o trabalho pós-recuperação, pois é desta maneira que pode ser analisada a eficácia da melhoria (VALENTE et al., 2009).

Para reestabelecer as condições iniciais das estruturas danificadas, faz-se uso da recuperação, para promover adequações da capacidade resistente das estruturas, em função do uso, faz-se necessário o reforço da construção (REIS, 2001). A exigência de intervenções para reestabelecer o desempenho da estrutura deve respeitar os pontos de vista técnicos, econômicos e socioambientais, levando em consideração o disposto por Souza e Ripper (2009), de acordo com a Figura 1. Assim, se o desempenho da estrutura for considerado insatisfatório, deve-se analisar o caso de se fazer a recuperação ou o reforço da estrutura ou a limitação de seu uso, para, então, realizar as intervenções que prolongarão a vida útil da construção. Caso não seja possível nenhuma das alternativas, faz-se necessário a demolição da construção.



**Figura 1 – Hipóteses para reconversão de estruturas com desempenho insatisfatório**

Fonte: Adaptado de Souza e Ripper (2009).

De acordo com Cánovas (1988), há danos estruturais localizados e de baixa importância que são indiferentes ao restante da estrutura. Desta maneira, sua recuperação é realizada de forma imediata, sem precisar esperar resultados de análises e pesquisas. Porém, existem outros defeitos que exigirão um estudo completo da obra, com a necessidade de um projeto de recuperação da estrutura, no qual há uma avaliação das condições da estrutura existente a ser reparada, as soluções cabíveis e as proteções adicionais.

A fim de verificar a integridade estrutural, a capacidade de carga e suas condições de deterioração, alguns autores (CARMONA FILHO, 2000; ANDRADE, 1992; KAY, 1992) indicam dividir o processo em duas etapas. Na primeira fase, as dimensões e propriedades gerais da estrutura são determinadas através da realização de ensaios com materiais, tais como profundidade de carbonatação, presença de cloretos e qualidade do concreto, entre outros. Todos os sintomas visuais devem ser registrados, inclusive o cobrimento do concreto em pontos singulares, para a observação direta das armaduras.

Na segunda fase, os aspectos singulares são analisados em detalhes. Uma inspeção minuciosa pode quantificar a dimensão da deterioração e classificar todos os elementos da construção, sendo que é muito importante planejar e providenciar os meios de acesso a todos os elementos a serem inspecionados, bem como a disponibilidade de energia, água e outros meios necessários para a realização dos trabalhos (REIS, 2001).

Helene (1992) pontua que a escolha dos materiais e técnicas de correção esteja de acordo com o diagnóstico e as exigências de funcionamento, tem-se como exemplo, os casos onde os elementos estruturais têm a necessidade de serem colocados em carga após algumas horas de execução da correção, possivelmente deverá ser utilizado sistemas a base de epóxi ou poliéster. Se os prazos forem maiores, é conveniente utilizar argamassas ou grautes de base mineral.

Para a recuperação dos elementos estruturais faz-se emprego de alguns materiais, dependendo da análise realizada. Dentre eles, podem-se destacar alguns mais utilizados (PIANCASTELLI, 1998 apud REIS, 2001):

- a) Argamassas e concretos usuais;
- b) Concreto com polímeros;
- c) Concreto com sílica ativa;
- d) Concreto com cinza volante e escória de alto forno;

- e) Concreto com fibras;
- f) Adesivos e “*primers*”;
- g) Materiais para injeção;
- h) Graute;
- i) Mastiques e selantes;
- j) Aditivos;
- k) Pinturas de proteção;
- l) Compósitos reforçados com fibras.

### 2.3 COMPÓSITOS

Compósitos são combinações macroscópicas entre materiais distintos que possuem uma interface diferente entre si. Muitos dos compósitos conhecidos são formados pela combinação de dois componentes. O componente principal é chamado de matriz e envolve o outro componente, chamado disperso. A matriz une os macrocomponentes e é quem dá forma ao compósito, enquanto que os dispersos determinam sua estrutura interna (BEBER, 2003).

Segundo Callister (2008), conforme o tipo de componente disperso, os compósitos classificam-se em três grupos:

- a) Particulares, quando reforçados por partículas (componentes que apresentam a mesma dimensão em todas as dimensões);
- b) Fibrosos, quando reforçados por fibras (elevada relação diâmetro/comprimento);
- c) Compósitos estruturais.

As propriedades e comportamento dos compósitos dependem, basicamente, da natureza, forma, geometria, arranjo estrutural, interação entre os componentes e proporção matriz e disperso (CALLISTER, 2008)

A interação entre os componentes resulta em novas propriedades para compósito, que são oriundas das propriedades individuais de cada material.

Tanto o concreto simples quanto o concreto armado são compósitos, onde a matriz é o aglomerante e o componente disperso é do tipo partícula: agregados miúdo e graúdo para o primeiro tipo e mais o aço, para o segundo (CALLISTER, 2008).

De acordo com Hollaway (1993) apud Beber (2003), um dos compósitos de maior interesse é o reforçado com fibras, também conhecido como *fibre reinforced polymers* (FRP). As fibras proporcionam melhor resistência e rigidez aos materiais do ponto de vista estrutural. Elas suportam o máximo possível do esforço aplicado, enquanto a função principal da matriz é ligar as fibras e transmitir as cargas externas para as mesmas através das tensões tangenciais na interface fibra/matriz.

A matriz de um compósito é responsável pela união das fibras, servindo como um meio de transmissão e distribuição das solicitações externas para as fibras. Ela também serve como uma proteção para as fibras, formando uma “barreira” entre elas e o ambiente e evitando, assim, desgaste devido à abrasão, umidade, oxidação e agentes agressivos (CALLISTER, 2008; BEBER, 2003).

Para Hollaway (1993) apud Beber (2003), uma matriz polimérica deve:

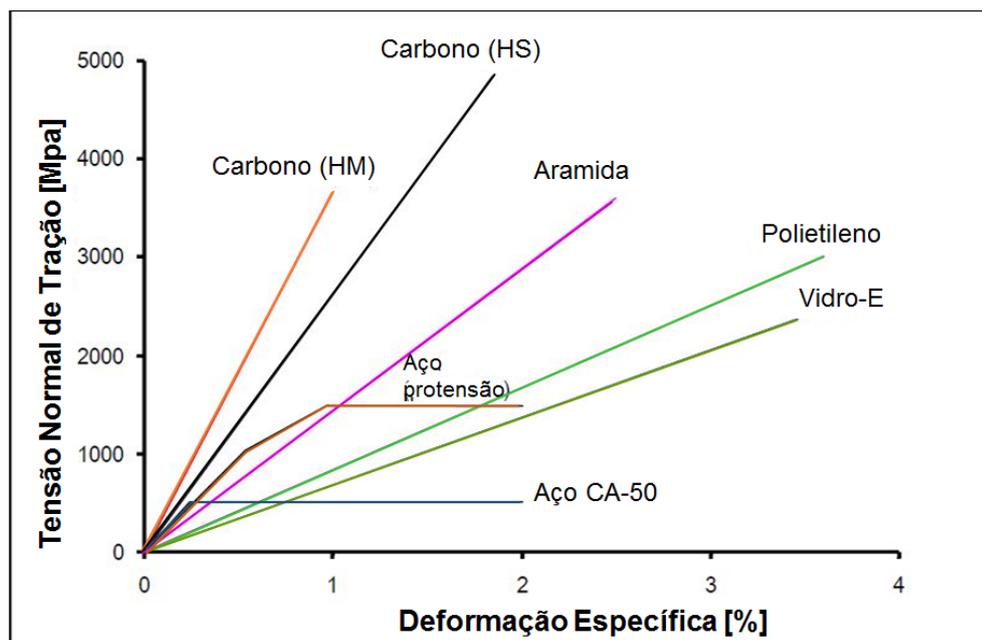
- a) Unir as fibras e proteger a superfície ao longo de toda sua vida útil;
- b) Ordenar as fibras de maneira a evitar a propagação de fissuras e que resultam em ruptura do compósito;
- c) Transferir as tensões integralmente para as fibras;
- d) Ser compatível com a fibra, química e termicamente.

São muitas as matrizes disponíveis que podem ser empregadas para a fabricação de um FRP. Segundo Beber (2003), elas podem ser de origem termorrígida ou termoplástica.

A termorrígida, quando curada pela ação do calor ou tratamento químico, transforma-se em um produto insolúvel devido à sua estrutura molecular tridimensional (FIORELLI, 2002).

A termoplástica pode ser fundida e reciclada, devido à sua estrutura molecular mais simples. Porém, devido a essa característica, não são adequadas a serem empregadas onde se necessita de alta resistência ou onde há exposição ao intemperismo (FIORELLI, 2002).

Fibras são materiais filamentosas, nas quais há uma razão comprimento/diâmetro em torno de 100 (ASTM, 1995). Elas são muito resistentes aos esforços de tração, o que direciona o alinhamento das moléculas, melhorando a atração intermolecular. As propriedades mecânicas dos vários tipos de fibras são apresentadas na Figura 2, comparando-as com alguns metais.



**Figura 2 – Diagrama tensão-deformação para fibras e metais**  
 Fonte: Beber (2003).

Há um grande número de fibras conhecidas no mercado, principalmente fibras de vidro, aramida, carbono, e as demais, como aço, polipropileno e sintéticas (náilon e poliéster) (MALUCELLI, 2004).

A escolha da fibra depende das características desejadas. Como observado na Figura 3 fibras com módulo de elasticidade menor (polipropileno e polietileno) são capazes de absorver grande energia, tendo grande resistência ao impacto e tenacidade, mas não contribuem com o aumento de resistência do compósito. Já fibras com elevado módulo de elasticidade (vidro, carbono, aço) produzem compósitos com elevada resistência à tração (MALUCELLI, 2004).

### 2.3.1 Fibra de vidro

As fibras de vidro são produzidas tendo como base a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e adição de óxido de cálcio, boro, sódio e alumínio. Esses materiais são amorfos e sua cristalização ocorre após tratamento intenso com altas temperaturas (FIORELLI, 2002). As fibras de vidro são disponibilizadas comercialmente na forma de manta, como apresentado na Figura 3.



**Figura 3 – Fibra de vidro em formato de manta**  
**Fonte: Central Fibra (2016).**

Segundo Hull (1995) apud Fiorelli (2002), as fibras de vidro se dividem em três categorias:

- a) E (*electrical*): alta resistência, alto módulo de elasticidade e boa condutividade elétrica, para aplicações usuais;
- b) C (*chemical*): alta resistência à corrosão, utilizadas para acabamento de superfícies;
- c) S (*high tensile strength*): alto módulo de elasticidade e resistência a altas temperaturas. Utilizadas para aplicações de alto desempenho.

### 2.3.2 Fibras de aramida

São fibras orgânicas derivadas da poliamida aromática que apresentam uma relação resistência/densidade (resistência específica) muito grande (FIORELLI, 2002).

A maior propriedade das fibras de aramida é a tenacidade, contribuindo para um bom desempenho em situações de impacto de veículos e, desta forma, sendo utilizadas principalmente na indústria aeroespacial e automobilística (BEBER, 2003; FIORELLI, 2002). Na Figura 4, pode-se observar aplicação de fibra de aramida.



**Figura 4 – Imagem ilustrativa da manta de fibra de aramida**  
**Fonte: Catálogo Dynatech (2016).**

As fibras de aramida apresentam resistências da ordem de 3000 MPa e módulo de elasticidade entre 60 GPa e 120 GPa, muito utilizadas devido à resistência ao fogo e ao excelente desempenho sob elevadas temperaturas (HOLLAWAY e LEEMING, 1999 apud BEBER, 1999),

### 2.3.3 Fibra de carbono

De acordo com Schwartz (1984) apud Beber (2003), as fibras de carbono se caracterizam por apresentarem baixo peso, alta resistência e grande rigidez e facilidade de se associarem a outros materiais.

Beber (2003) afirma que os valores do módulo de elasticidade e da resistência dependem da orientação (paralelismo entre os eixos) das fibras, que as tornam rígidas e resistentes. E ainda, que a rigidez das fibras é proporcional a energia de aquecimento, ou seja, serão mais rígidas quanto maior a for a energia de aquecimento despendida ao filamento de carbono. Na Figura 5 é possível verificar a aplicação de manta de fibra de carbono como reforço estrutural.



**Figura 5 – Exemplo de aplicação de manta de fibra de carbono em reforço estrutural**  
Fonte: Techniques (2016).

A produção comercial das fibras de carbono pode ser realizada de três formas distintas (MACHADO, 2002):

- a) Através do alcatrão (PITCH), subproduto da destilação do petróleo;
- b) Através das fibras precursoras de poliacrilonitril (PAN);
- c) Através das fibras de *rayon*.

O processo de fabricação consiste na oxidação destas fibras precursoras, seguido do processamento a elevadas temperaturas (entre 1000°C e 1500°C para as fibras de carbono). A partir desse processo térmico, as fibras resultantes apresentam os átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, o que confere elevada resistência mecânica ao produto (MACHADO, 2002).

#### 2.3.4 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras (FRP)

Os polímeros reforçados com fibras (FRP) apresentam como principal vantagem a possibilidade de reforço de materiais que não apresentam desempenho e vida útil satisfatórios quando sozinhos (BEBER, 1999).

Para Hollaway e Leeming (1999) apud Beber (1999), as matrizes e fibras dos polímeros interagem e redistribuem as tensões oriundas das solicitações externas e

tornam os polímeros capazes de suportar tensões mais elevadas do que seus componentes de maneira individual. As propriedades dos compósitos dependem do tipo e quantidade de fibra, as quais ainda podem ser orientadas em qualquer direção para que se obtenha resistência e rigidez desejadas. As principais formas de orientação são:

- a) Unidirecional, com todas as fibras na mesma direção;
- b) Bidirecional, alinhadas perpendicularmente em duas direções;
- c) Aleatória, com as fibras distribuídas em várias direções ao longo do plano.

Como principais propriedades dos compósitos de FRP, pode-se citar alta resistência e rigidez, resistência à fadiga (principalmente em fibras de carbono orientadas de maneira unidirecional) e pequena deformação de ruptura (BEBER, 2003).

De acordo com o Instituto Americano de Concreto, *ACI Comittee 440-2R* (2008), os produtos de polímeros reforçados com fibras (PRF) utilizados para o reforço de estruturas de concreto são constituídos por fibras contínuas, geralmente de vidro, aramida ou carbono, sendo esta última o escopo de estudo deste trabalho.

## 2.4 COMPÓSITOS ESTRUTURADOS COM FIBRA DE CARBONO (CFC)

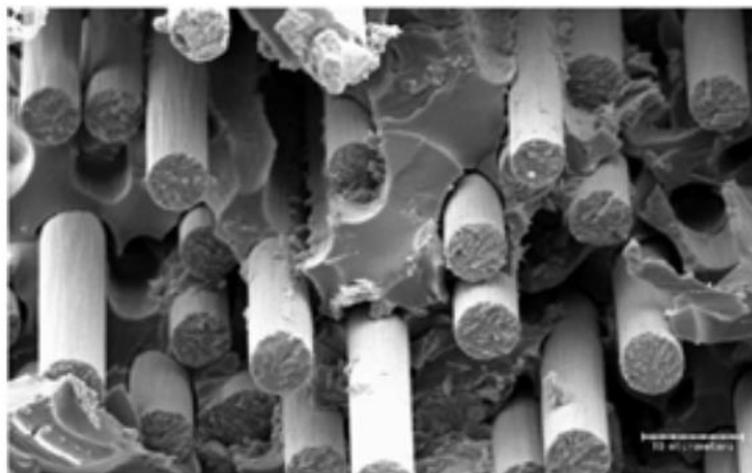
Com o avanço tecnológico e desenvolvimento dos compósitos, descobriu-se que mantas, tecidos e laminados de fibras de carbono dispostas de forma unidirecional, contínua e com matrizes em resina epóxi poderiam substituir, de maneira satisfatória, as tradicionais chapas de aço no reforço de estruturas (BEBER, 2003).

O alto custo inicial da produção dos materiais poliméricos avançados aliado à existência de poucos estudos e informações técnicas adequadas limitaram, durante muitos anos, o uso dos compósitos estruturados com fibra de carbono na indústria da construção civil. A utilização dos polímeros reforçados com fibras teve início nos anos 50 e começaram a ser produzidos industrialmente apenas em 1982 (MACHADO, 2002).

Os sistemas compósitos estruturados com fibras de carbono são construídos com dois elementos distintos e fundamentais: a matriz polimérica e o elemento estrutural, constituído pelas fibras de carbono (MACHADO, 2002).

Esquemáticamente, em um sistema composto estruturado, os bastonetes representam as fibras de carbono imersas na matriz polimérica. Em materiais plásticos, as fibras (armaduras) são responsáveis pela resistência mecânica do sistema, sendo que a matriz polimérica é responsável pela transferência das tensões de cisalhamento ao substrato de concreto para o sistema compósito (MACHADO, 2002).

Na Figura 6 é possível visualizar uma ampliação em microscópio eletrônico da matriz polimérica do sistema compósito estrutural *MBrace™*. Observa-se que as fibras de carbono do tecido se encontram totalmente tomadas pelas resinas da matriz polimérica.



**Figura 6 – Ampliação em microscópio eletrônico do sistema *MBrace™***  
Fonte: Machado (2002).

O polímero reforçado com fibra de carbono, conhecido também como *carbon fibre reinforced polymers* (CFRP) ou compósito reforçado com fibra de carbono (CFC) apresenta uma combinação de baixo peso próprio, grande durabilidade, alta resistência e rigidez. Tais propriedades mecânicas fazem do CFC um dos materiais mais utilizados atualmente para reforço de estruturas (FIORELLI, 2002). Segundo Beber (2003), o CFC se sobressai em relação aos outros tipos de compósitos por apresentar maior relação entre resistência/rigidez e peso próprio, e também pelo fato

das propriedades das fibras não se alterarem em presença de umidade, além de possuir versatilidade de aplicações e apresentar boa relação custo-benefício.

O emprego dos sistemas CFC pode ser feito com segurança para reabilitação ou restauração de elementos estruturais de concreto armado, que sofreram enfraquecimento ou fragilização devido a manifestações patológicas específicas e para reforço de elementos em boas condições estruturais, a fim de permitir um incremento de carga solicitante, geralmente para permitir mudanças de destinação e minimizar eventuais riscos decorrentes de vícios de projeto ou de construção. Contudo, é necessário que os engenheiros estruturais estudem a real viabilidade da recomendação da aplicação de CFC para reforço estrutural antes da decisão final (MACHADO, 2002).

#### 2.4.1 Propriedades dos Compósitos Estruturados com Fibra de Carbono

Ao contrário de outros materiais, como o aço, as propriedades mecânicas dos compósitos plásticos variam de um produto para outro, a depender do volume, do tipo de fibra e resina, da orientação das fibras e também do controle de qualidade realizado durante a produção (MACHADO, 2002).

As propriedades dos CFC estão atreladas aos seus materiais constituintes, sendo eles, segundo o *ACI Comittee 440-2R (2008)*, as resinas, tais como os imprimadores primários (*primers*), os reguladores de superfície (*putties*) os saturantes, os adesivos, os revestimentos protetores e as fibras, que os estruturam.

As resinas mais comumente usadas, à base de epoxídicos, estéres de vinil e poliésteres, devem apresentar como características básicas: a compatibilidade e aderência ao substrato e ao próprio compósito, a resistência às condições ambientais, ter uma vida útil compatível à da fibra, além de satisfazer as propriedades mecânicas desejadas (*ACI Comittee 440-2R, 2008; MACHADO, 2002*).

Os imprimadores primários (*primers*) são utilizados para penetrar a superfície do concreto, promovendo uma melhor ligação entre a resina de saturação e o adesivo, têm a função de criar uma ponte de aderência (*ACI Comittee 440-2R, 2008; MACHADO, 2002*).

Os regularizadores de superfície (*putties*) preenchem as pequenas falhas (vazios) no substrato, tornando a superfície lisa a fim de proporcionar melhor

aplicação do compósito, além de evitar a formação de bolhas durante a cura (ACI *Comitte* 440-2R, 2008; MACHADO, 2002).

As resinas de saturação “molham” as fibras de reforço, as mantêm no lugar e são responsáveis pela transferência das tensões de cisalhamento entre o concreto e o sistema compósito. Para atingir este objetivo é fundamental que as resinas possuam: baixa retração durante a cura, estabilidade quanto à ação de agentes químicos, aderência às fibras e módulo de elasticidade da ordem de 2000 MPa (ACI *Comitte* 440-2R, 2008; MACHADO, 2002).

Os adesivos unem as fibras ao substrato de concreto, além de ligar as múltiplas camadas de compósito (ACI *Comitte* 440-2R, 2008; MACHADO, 2002).

Os revestimentos protetores, como o próprio nome indica, têm a função de proteger a superfície colada dos sistemas compósitos de potenciais efeitos danosos que possam advir do meio ambiente (ACI *Comitte* 440-2R, 2008; MACHADO, 2002).

De forma geral os compósitos plásticos têm como uma das principais vantagens seu baixo peso específico, variando de 15 kN/m<sup>3</sup> a 20 kN/m<sup>3</sup>, ou seja, são de quatro a cinco vezes mais leves que o aço, característica que facilita o transporte e o manuseio (ACI *Comitte* 440-2R, 2008; MACHADO, 2002).

De acordo com Machado (2002), os polímeros reforçados que utilizam a fibra de carbono como elemento resistente apresentam características como:

- a) Extraordinária resistência mecânica;
- b) Extraordinária rijeza;
- c) Bom comportamento à fadiga e à atuação de cargas cíclicas;
- d) Elevada resistência a ataques químicos diversos;
- e) Não são afetados pela corrosão por se tratar de um produto inerte;
- f) Estabilidade térmica e reológica;
- g) Extrema leveza, devido ao baixo peso específico do sistema, da ordem de 18 kN/m<sup>3</sup>, chegando-se ao ponto de não se considerar o seu peso próprio nos reforços.

No que concerne ao comportamento à compressão dos CFC, o ACI *Comitte* 440-2R (2008) assegura que este material não é indicado para uso como reforço à compressão por não apresentar bons resultados de resistência a este esforço. Suas propriedades são descritas no Quadro 1.

<b>Tipo da Fibra de Carbono</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Resistência Máxima de Tração (MPa)</b>	<b>Deformação de Ruptura (%)</b>
De uso geral	220 – 235	< 3790	>1,2
Alta Resistência	220 – 235	3790 – 4825	>1,4
Ultra alta resistência	220 – 235	4825 – 6200	>1,5
Alto módulo	345 – 515	> 3100	>0,5
Ultra alto módulo	515 – 690	> 2410	>0,2

**Quadro 1 – Propriedades Típicas das Fibras de Carbono à Tração**  
**Fonte: Adaptado de Machado (2002).**

A resistência última de tração de alguns sistemas CFC disponíveis comercialmente está representada no Quadro 2 a seguir (MACHADO, 2002).

<b>Sistema CFC</b>	<b>Peso da Fibra (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistência de Tração do Laminado Curado (N/m)</b>
Lâmina unidirecional de alta resistência	300	700
Lâmina unidirecional de carbono de uso geral	300	500
Lâmina unidirecional de carbono com alto módulo	300	600

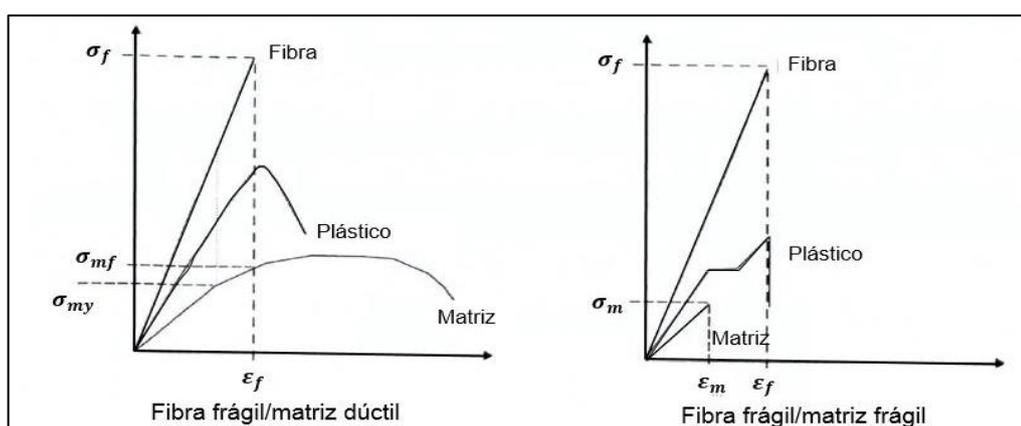
**Quadro 2 – Características dos Sistemas CFC**  
**Fonte: Adaptado de Machado (2002).**

O coeficiente de dilatação térmica do CFC é diferente nas suas direções longitudinal e transversal e irá depender do tipo de fibra, da resina e do volume de fibra no compósito. Para um compósito unidirecional de fibra de carbono típico o coeficiente de dilatação na direção longitudinal varia de  $-10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  a  $0/^{\circ}\text{C}$  e na direção transversal é entre  $22 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  e  $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . É possível verificar que esta característica intrínseca do CFC apresenta o sinal negativo, ou seja, o material sofre contração com incremento de temperatura e dilatação com a diminuição da temperatura (ACI *Comitte* 440-2R, 2008; MACHADO, 2002).

A temperatura a partir da qual o CFC começa a perder parte de suas propriedades e sofre redução do módulo de elasticidade, devido a mudanças na estrutura molecular, é chamada de temperatura de transição vítrea ( $T_c$ ). O valor desta temperatura pode variar de acordo com o tipo de resina, geralmente na faixa

de 80°C a 100°C, no CFC, a fibra de carbono pode continuar resistindo a alguma carga longitudinal até que se atinja a temperatura limite (aproximadamente 1500°C). No entanto, a partir de temperaturas da ordem de 240°C, devido à redução da força de transferência por meio da ligação (“cola”) entre as fibras, as propriedades de tração do compósito são reduzidas. Segundo experimentos, a redução da resistência à tração chega a 20% (ACI *Comitte* 440-2R, 2008; MACHADO, 2002).

Assim, os sistemas compostos CFC devem trabalhar segundo o critério da fibra com ruptura frágil e matriz polimérica com ruptura dúctil. Dessa maneira, descarta-se a possibilidade de que o sistema CFC entre em colapso devido à ruptura frágil da matriz, possibilidade de ocorrência. Estas propriedades estão representadas nos diagramas da Figura 7.



**Figura 7 – Diagramas tensão-deformação dos sistemas CFC**  
**Fonte: Machado (2002).**

De acordo com Machado (2002), a matriz polimérica deve, obrigatoriamente, ter um alongamento de ruptura muito maior que o alongamento da fibra de carbono, para possibilitar que a mesma continue com a capacidade de carga depois da tensão na fibra ter chegado a sua tensão de ruptura (limite de resistência).

#### 2.4.2 Processo Construtivo do Sistema Compósito

Segundo Machado (2002), os compósitos de fibra de carbono são aderidos externamente às estruturas de concreto armado que necessitam de reforço. Dessa forma, é de fundamental importância que a superfície onde será aplicado o CFC esteja íntegra e o mais regular possível, pois torna mais eficiente a transferência de

tensões entre o reforço e o concreto. Se essa condição de integridade não for atendida, faz-se necessária a recuperação do substrato de concreto, para que ele esteja apto para receber o reforço.

Todas as patologias identificadas após avaliação do substrato devem ser corrigidas. A patologia mais comum é a corrosão das armaduras, que exige não só a recuperação das mesmas, como também a remoção e composição das superfícies do concreto que estão degradadas. As causas devem ser identificadas e corrigidas para que, após a recuperação, não voltem a se manifestar (MACHADO, 2002).

Além das trincas existentes na estrutura de concreto a ser reforçada, toda fissura com abertura maior que 0,25 mm deve ser recuperada. Fissuras com essa abertura, quando expostas ao meio ambiente, podem causar corrosão na armadura. Elas podem ser corrigidas através de injeção de resina e seladores (MACHADO, 2002).

Para Machado (2002), quando o CFC é aplicado com o objetivo de reforço para esforços de flexão e cisalhamento de vigas, lajes e pilares de concreto armado, a colagem deve ser executada de maneira eficiente para que a transferência de esforços entre os meios aderidos seja a desejada. Os tipos de aplicação de CFC são classificados como:

- a) Predominância da condição crítica de colagem do CFC: deve ser feita a limpeza da superfície, para completa remoção de partículas sólidas não aderidas, poeiras, substâncias oleosas e eventuais recobrimentos do substrato, que podem interferir na aderência. Se o CFC recobrir mais de uma das laterais da peça, as quinas devem ser arredondadas para evitar a concentração de tensões nas fibras e evitar “vazios” causados por falhas na colagem.
- b) Predominância da condição crítica de contato íntimo: quando há confinamento de peças de concreto armado. As irregularidades da superfície devem ser corrigidas, para que a superfície não apresente concavidades ou convexidades e ela possa ser “envelopada”, garantindo a eficiência do CFC.

### 2.4.3 Aplicação do Sistema CFC

Com o substrato de concreto recuperado, inicia-se a aplicação do sistema de compósito de fibra de carbono.

A primeira etapa é a aplicação dos imprimadores primários (*primers*), que penetrarão nos poros do substrato de modo a gerar uma “ponte de aderência” na superfície do concreto. A aplicação do imprimador é feita apenas na área de aplicação da fibra (MACHADO, 2002). Conforme apresentado na Figura 8, pode-se observar as camadas da aplicação da manta de fibras de carbono.

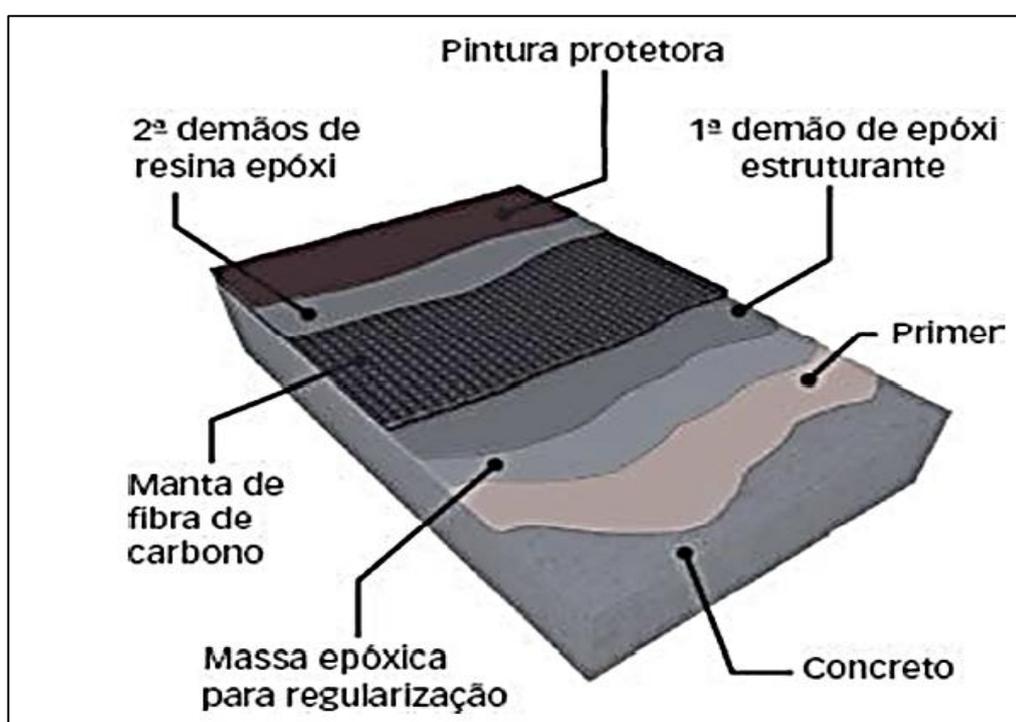


Figura 8 – Detalhamento do sistema de reforço estrutural com fibra de carbono  
Fonte: Corsini, 2012.

Em seguida, é feita a aplicação do regularizador de superfície (*puttie*). Essa massa regularizadora faz com que a superfície seja desempenada de forma contínua. Quanto maior a irregularidade da superfície, maior o consumo da massa regularizadora. A pasta é apenas aplicada sobre a área imprimada na etapa anterior. A etapa de regularização admite pequena ondulação sem que ocorra diminuição da eficiência do CFC, desde que esse valor esteja dentro dos limites

estabelecidos pelo fornecedor do compósito, e isso se deve à flexibilidade do sistema (MACHADO, 2002).

As dimensões dos compósitos da fibra de carbono (lâmina e manta) são definidas em projeto. As fibras são cortadas previamente, em bancadas, com instrumentos apropriados (régua metálica, tesouras de aço, faca de corte ou estilete). Assim que cortada, a fibra é aderida à peça que será reforçada. Há duas formas de realizar a adesão: a fibra pode ser saturada na bancada, e será transportada e posicionada na peça de concreto imediatamente, ou pode ser saturada diretamente na peça. O tempo de aplicação da resina saturante é de, no máximo, 30 minutos. Dentro desse tempo podem ser realizados ajustes no posicionamento da fibra. (MACHADO, 2002).

As execuções práticas demonstraram que a aplicação das fibras saturadas em bancada apresenta melhor trabalhabilidade e economia de resina, porém, apresenta limitação no comprimento da lâmina a ser transportada (da ordem de 3,5 a 4,0 m) (MACHADO, 2011).

Assim que a lâmina/manta é colocada na peça, com orientação correta das fibras, deve ser feita a eliminação das bolhas de ar, com pequenos roletes de aço, que empurram as bolhas para as extremidades das lâminas.

No caso da aplicação de mantas de CFC, a manta instalada recebe, sobre ela, uma imprimação com resina saturante, para garantir que a fibra esteja completamente “imersa”. Cada camada de manta exige duas imprimações, uma antes da aplicação e outra depois. Essa etapa é repetida, sucessivamente, conforme a quantidade de camadas necessárias para o reforço da estrutura (MACHADO, 2002).

Terminada essa etapa, a aplicação do compósito CFC está concluída. Porém, em muitos casos, sejam por motivos estéticos ou para proteção mecânica/química do compósito, é executado o um revestimento estético ou protetor (MACHADO, 2002).

Após conclusão da aplicação do sistema CFC, as condições reais de aplicação precisam ser verificadas. A mais básica e “simples” é a inspeção visual, seguida de testes de arranchamento, que verificam a aderência do sistema à superfície de concreto (MACHADO, 2011).

## 2.5 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO COM FIBRAS DE CARBONO

Para um correto dimensionamento do reforço, fazendo-se uso do CFC devem-se adotar, segundo Machado (2002), alguns conceitos básicos e considerações, sendo eles:

- a) Todos os estudos e cálculos devem ser realizados com base nas estruturas reais, ou seja, consideram-se as dimensões de seção existentes, assim como, a quantidade e distribuição de aço;
- b) Devem-se usar as propriedades e características mecânicas dos materiais utilizados na execução;
- c) Prevalecem os critérios de Bernoulli, ou seja, as seções planas permanecem planas após a ocorrência dos carregamentos e as deformações são linearmente proporcionais à sua distância à linha neutra;
- d) A resistência à tração do concreto é desprezada;
- e) A deformação específica do concreto não pode ultrapassar os parâmetros de dimensionamento da ABNT, que é de 0,0035 cm/cm, ou para dimensionamento segundo o *ACI Committee 440-2R* (2008), 0,0030 cm/cm;
- f) A deformação é considerada linear até a ruptura do sistema compósito CFC;
- g) A aderência entre o sistema compósito CFC e o substrato é considerada perfeita.

No momento da aplicação o CFC não está sujeito a nenhuma tensão, porém o mesmo não ocorre com o substrato, que já está submetido a tensões decorrentes das diversas solicitações, sejam elas peso próprio, forças de protensão ou cargas de instalação. Assim, para definir a qual tensão o reforço será submetido, é necessário que se conheça previamente o nível de tensão na superfície do substrato e, a partir disso, saber-se-á também a deformação preexistente na superfície do concreto (MACHADO, 2002).

A deformação específica máxima permissível na fibra de carbono ( $\xi_{fu}$ ), segundo Machado (2002), será dada pela equação (1):

$$\xi_{fc} = (\xi_b - \xi_{bi}) \leq \xi_{fu} \quad (1)$$

Onde,

$\xi_{fc}$  = deformação específica da fibra de carbono à tração;

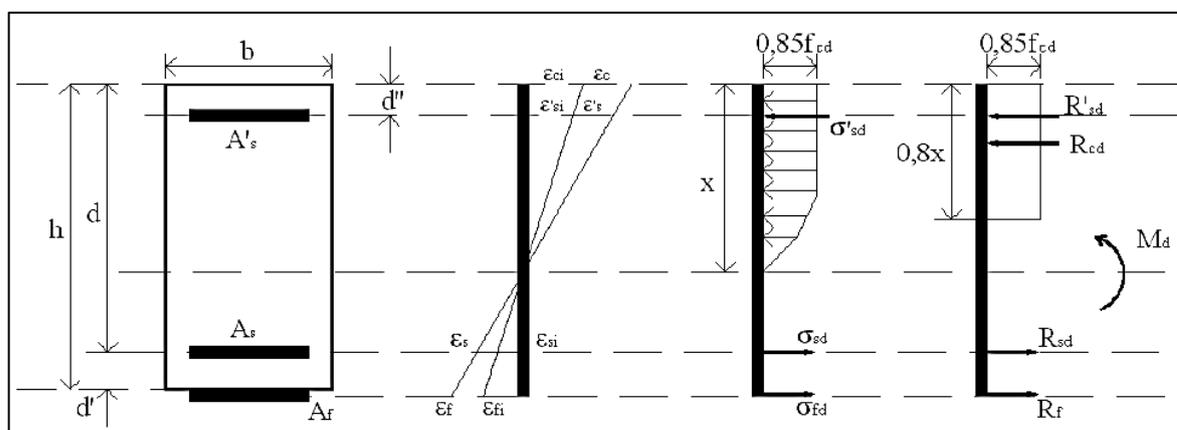
$\xi_b$  = deformação específica na fibra de carbono considerada no reforço para o carregamento máximo;

$\xi_{bi}$  = deformação específica pré-existente quando da aplicação do reforço de fibra de carbono.

De acordo com Machado (2002) é importante ressaltar que o aumento da capacidade de resistência da seção à flexão, acarreta em um acréscimo no esforço cortante, e, portanto, deve-se realizar também a verificação da capacidade resistente da seção a este último. Inclusive, caso necessário, é preciso também definir um reforço ao cisalhamento. Desta forma, o máximo carregamento é definido em função das rupturas ao cisalhamento e flexão.

### 2.5.1 Dimensionamento pelo Estado-Limite Último

O ACI *Committee* 440-2R (2008) recomenda que o reforço à flexão com CFC seja determinado pelo método do estado-limite último, o qual estabelece que a capacidade resistente à flexão deve ser maior do que a solicitação da estrutura. A tensão interna e distribuição de tensões para uma seção retangular sob flexão no estado-limite último são apresentadas na Figura 9, na qual também é possível observar que o diagrama não-linear de tensões pode ser aproximado para um retângulo de altura  $0,8x$ :



**Figura 9 – Tensão interna e distribuição de tensões no estado-limite último**  
**Fonte: Machado (2002).**

Machado (2002) analisa os modos de ruptura a flexão para a situação particular na qual se atingem as deformações máximas para o concreto ( $\xi_c = 0,0035$ ) e para o aço ( $\xi_s = 0,010$ ). Nesta situação, a partir da equação (2), têm-se:

$$x = k_x \cdot d \quad (2)$$

$$k_x = \frac{\xi_c}{\xi_c + \xi_s} = \frac{3,5}{3,5 + 10} = 0,259 \sim 0,260$$

Onde,

$x$  = distância da linha neutra ao ponto de maior encurtamento da peça fletida;

$d$  = altura útil.

Com esta constatação avaliam-se três possibilidades:

- Quando  $k_x = 0,26$ , situação na qual o concreto e aço se rompem no mesmo instante;
- Quando  $k_x < 0,26$ , a ruptura irá iniciar pelo aço;
- Quando  $k_x > 0,26$ , a ruptura irá iniciar pelo concreto.

Configurando assim os seguintes tipos de ruptura à flexão (MACHADO, 2002):

- Ruptura por escoamento do aço antes do esmagamento do concreto;
- Ruptura por escoamento do aço antes da ruptura do sistema CFC;
- Ruptura por esmagamento do concreto antes da ruptura por escoamento do aço;
- Ruptura do sistema compósito CFC antes da ruptura por escoamento do aço.

Machado (2002) considera que nos casos a) e b), nos quais a ruptura se inicia pelo aço, peças subarmadas, o reforço com fibra de carbono pode ser feito com maior facilidade.

Para o dimensionamento do reforço com sistemas compósitos de fibra de carbono em uma viga de concreto armado, devem ser realizadas as seguintes verificações (MACHADO, 2002):

- determina-se o momento fletor máximo que atuará na viga (majorado),

$$M_{\text{maj.máx}};$$

- b) A partir das informações construtivas, propriedades dos materiais e das características geométricas da viga a ser reforçada determina-se o momento resistente à flexão,  $M_{resist}$ ;
- c) Faz-se a comparação entre os resultados obtidos em a) e b), se  $M_{maj.máx} > M_{resist}$  a viga necessita de reforço, caso contrário, apenas a estrutura existente supre as necessidades;
- d) Após a análise feita em c), constatando-se que a viga necessita de reforço, é necessário determinar o modo de ruptura por meio da equação (2), o qual irá determinar o método de cálculo.

A partir destas determinações, adota-se o seguinte procedimento: primeiramente, em conformidade com o modo de ruptura, é arbitrada uma profundidade para a linha neutra ( $x$ ). Em seguida, calculam-se as deformações específicas dos materiais, admitindo-se que esta variação seja linear, como já citado no início desta seção. Conhecidas as deformações, devem ser calculadas as tensões atuantes nos diversos materiais e fazer as verificações do equilíbrio entre elas. Se o momento resistente encontrado no sistema reforçado for maior que o momento solicitante máximo  $M_{maj.máx}$ , o processo está completo. Este procedimento é iterativo e deve ser repetido quantas vezes for necessário para alcançar os objetivos (MACHADO, 2002).

### 2.5.2 Determinação do Momento Fletor Resistente do Reforço

De acordo com Machado (2002), o momento resistente da viga de concreto armado com reforço de fibra de carbono é constituído de força resultante da seção comprimida do concreto ( $F_c$ ), força resultante da seção da armadura de compressão ( $F'_s$ ), força resultante da seção tracionada da armadura ( $F_s$ ) e força resultante da seção tracionada de fibra de carbono ( $F_f$ ). A determinação destas forças resultantes é feita por meio dos seguintes passos:

Componente de compressão no concreto ( $F_c$ ) é dado pela equação (3):

$$F_c = 0,8 \cdot x \cdot b_w \cdot \psi \cdot f_c \quad (3)$$

Onde,

$b_w$  = largura das vigas de seção retangular;

$\psi$  = coeficiente de redução da força no CFC;

$f_c$  = resistência à compressão do concreto.

Sendo  $f_c$  dado pela equação (4):

$$f_c = \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \quad (4)$$

Onde,

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão;

Componente de compressão no aço ( $F'_s$ ) é dado pela equação (5):

$$F'_s = A'_s \cdot f'_s \quad (5)$$

Sendo,

$A'_s$  = área da seção transversal da armadura de compressão;

$f'_s$  = resistência da tensão de compressão no aço.

Considerando,

$$f'_s = \xi'_s \cdot E_s < f_y = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \text{ sendo } \gamma_s = 1,15 \quad (6)$$

Onde,

$E_s$  = módulo de elasticidade do aço;

$f_y$  = resistência do aço à tração;

$f_{yk}$  = resistência característica do aço à tração.

Componente de tração no aço ( $F_s$ ) é dado pela equação (7):

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad (7)$$

Onde,

$A_s$  = área da seção transversal da armadura de tração;

$f_s$  = resistência da tensão de tração no aço.

$$f_s = \xi_s \cdot E_s < f_s = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \text{ sendo } \gamma_s = 1,15 \quad (8)$$

Componente de tração na fibra ( $F_f$ ) é dado pela equação (9):

$$F_f = A_f \cdot f_f \quad (9)$$

$$f_f = \xi_f \cdot E_f = (\xi_b - \xi_{bi})E_f$$

$$\xi_f = \frac{\xi_c}{x} (h - x) - \xi_{bi} = \xi_c \left( \frac{h - x}{x} \right) - \xi_{bi}$$

$$F_f = E_f \cdot f_f \left[ \xi_c \left( \frac{h - x}{x} \right) - \xi_{bi} \right] \quad (10)$$

Onde,

$A_f$  = área da seção transversal da fibra de carbono;

$f_f$  = resistência à compressão na fibra de carbono;

$\xi_f$  = deformação específica da fibra de carbono;

$E_f$  = módulo de elasticidade da fibra de carbono.

Finalmente, a majoração do momento ( $M_{maj}$ ) é dada pela equação (11):

$$M_{maj} = F_s (d - 0,4x) + F'_s (0,4x - d'') + \Phi F_f (h - 0,4x) \quad (11)$$

Sendo,

$d''$  = distância entre bordo mais comprimido e o centroide da armadura de compressão;

$\Phi$  = fator de redução aplicado à contribuição da fibra de carbono em função da recente existência da fibra de carbono. O ACI *Comitê* 440-2R (2008) recomenda para este fator o valor de 0,85.

Segundo Machado (2002) é necessário fazer a verificação do equilíbrio das forças, o equilíbrio interno é satisfeito se, e somente se:

$$x = \frac{F_s + F_f}{F_c + F'_s} \quad (12)$$

Ao se satisfazer simultaneamente as equações (10) e (12), a profundidade da linha neutra é encontrada e caracteriza-se o equilíbrio interno das forças e a compatibilidade entre as deformações (MACHADO, 2002).

Machado (2002) indica também a necessidade do estudo da deformação máxima que pode ser admitida em um reforço à flexão com CFC em função do número de camadas a fim de prevenir a delaminação do revestimento ou descolamento do sistema CFC.

Além das verificações já citadas, é necessário analisar, segundo Machado (2002), se a redução da ductibilidade, que ocorrerá devido à aderência do sistema compósito CFC, é considerável ou se pode ser desprezada. Esta verificação deve ser feita, por meio da verificação do nível de deformação do aço, também pelo estado-limite último. De acordo com o ACI *Comitte* 318 (1995) *apud* Machado (2002), uma adequada ductibilidade é obtida se a deformação do aço ao nível de esmagamento do concreto ou ruptura do sistema seja a uma razão de pelo menos 0,005.

### 2.5.3 Considerações Adicionais para Dimensionamento do Reforço

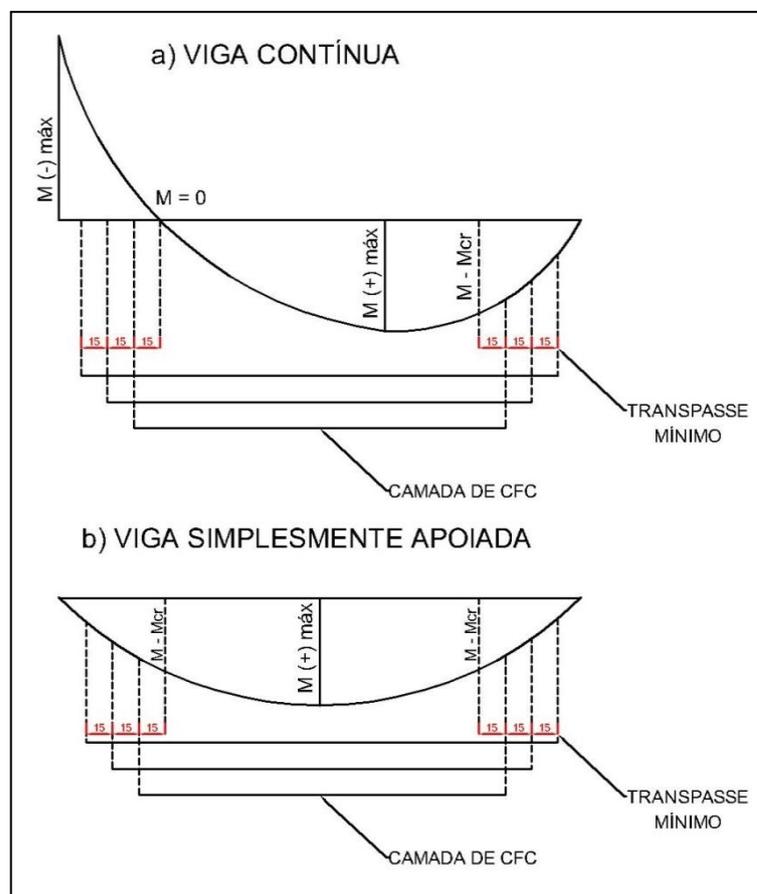
Como existe transferência de tensões entre o concreto e o reforço, pode ser que ocorra a delaminação do CFC, ou seja, o descolamento das fibras de carbono, antes que seja atingida a tensão de ruptura do concreto, “sendo que em geral este fenômeno de descolamento é obtido para cargas significativamente superiores às de serviço” (PIVATTO, 2014).

De acordo com Machado (2002), as causas mais frequentes de descolamento do reforço são fissuras por cisalhamento, irregularidades superficiais, ruptura por cisalhamento interfacial e a elevada tensão do recobrimento do concreto. O concreto não é capaz de absorver as tensões normais e de cisalhamento interfaciais, assim o compósito se descola da base, mantendo aderida apenas uma fina camada de concreto.

Deve-se calcular a área necessária para a colagem do sistema de compósito baseada no cisalhamento horizontal e na resistência à tração do substrato. Segundo o ACI *Comitte* 440-2R (2008), devido ao fato de que a delaminação ou ruptura da colagem serem ocorrências frágeis, é recomendado a utilização de um fator de redução da resistência da cola utilizada.

As condições de delaminação nos reforços de sistemas compósitos aderidos externamente à base se iniciam nas regiões em que existem fissuras de flexão na estrutura de concreto armado e se propaga até a extremidade da lâmina colada do compósito de fibra de carbono. Esta delaminação pode ser também causada pelas tensões normais desenvolvidas na lâmina aplicada do CFC (MACHADO, 2002).

O ACI *Comitte* 440-2R (2008) adota as seguintes recomendações para a determinação dos pontos críticos no CFC aderido, evitando as ocorrências de descolamento, conforme demonstrado na Figura 10.



**Figura 10 – Terminações recomendadas para as lâminas de CFC**

Fonte: Adaptado de Machado (2002).

- Para vigas contínuas, deve-se estender a lâmina aplicada em pelo menos 15 cm (6") após o ponto de inflexão (onde o momento é nulo) para o caso de apenas uma camada de reforço, já se for mais de uma, seguir esta mesma recomendação para a última camada e defasar 15 cm para cada camada a mais, conforme indicado na Figura 10a;
- Para vigas simplesmente apoiadas, aplicam-se as mesmas recomendações gerais, porém, o ponto de análise não será no momento nulo, mas no momento fletor de fissuração da peça,  $M_{cr}$  (momento crítico), de acordo com a Figura 10b.

#### 2.5.4 Comprimento de Aderência do Sistema CFC

Segundo explica Machado (2002), faz-se a distribuição apropriada dos esforços de adesão seguindo um triângulo que se inicia com valor zero e cresce conforme uma variação inclinada chegando ao valor da resistência à tração do concreto e decresce novamente acompanhando a mesma lei de variação até o valor zero.

Outra maneira para o cálculo do comprimento de ancoragem necessário para um sistema CFC é fornecida por Róstasy (1998) apud Machado (2002), de acordo com a equação (13):

$$l_{t,max} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_{fc} \cdot t_{fc}}{f_{ct,m}}} \quad (13)$$

Sendo,

$l_{t,max}$  = comprimento de ancoragem;

$t_{fc}$  = espessura da lâmina de fibra de carbono;

$f_{ct,m}$  = resistência média à tração do concreto, encontrada pela equação (14):

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}, \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa} \quad (14)$$

O comprimento desenvolvido necessário à tração de um sistema CFC aderido externamente está baseado numa suposta distribuição de esforços de tração mobilizados no CFC (MACHADO, 2002).

#### 2.6 DIMENSIONAMENTO DE VIGAS BIAPOIADAS

O dimensionamento das armaduras para vigas deve ser realizado de acordo com as definições da NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Neste trabalho, restringe-se o estudo a vigas de seção transversal retangular, bi apoiadas, sujeitas a esforço de flexão normal, simples e pura e executadas em concreto com resistência característica de até 50 MPa. Para concretos com esta

resistência a NBR 6118:2014, no item 14.6.4.3 (Limites para redistribuição de momentos e condições de ductilidade), estabelece que a razão entre a altura útil ( $d$ ) e a posição da linha neutra ( $x$ ) deve ser igual ou menor a 0,45, a fim de proporcionar o adequado comportamento dúctil em vigas, como apresentado é na inequação (15):

$$x/d \leq 0,45 \quad (15)$$

A NBR 6118:2014 estabelece também, quatro domínios de deformação no estado-limite último (ELU) para uma seção transversal, conforme é apresentado na Figura 12. Segundo Carvalho e Filho (2014), o domínio 1 é caracterizado por ter apenas o aço atuando como seção resistente, sem a participação do concreto e pela localização da linha neutra que fica fora da seção transversal. No domínio 2 a seção resistente é formada pelo aço tracionado e pelo concreto comprimido, porém este último não alcança a ruptura, ou seja, sua deformação de ruptura ( $\varepsilon_c$ ) é menor do que 3,5‰.

A partir do domínio 3 a NBR 6118:2014 considera que a ruptura convencional se dá pelo encurtamento-limite do concreto. A mesma norma indica como domínio 3, aquele no qual a ruptura do concreto se dá juntamente com o escoamento do aço, situação ideal por possibilitar o aproveitamento máximo dos dois materiais, neste domínio o estado limite último (ELU) é caracterizado por  $\varepsilon_c = 3,5\text{‰}$  e  $\varepsilon_s = 10\text{‰}$ . Geralmente os domínios 2 e 3 são chamados de subarmados.

O domínio 4 é desaconselhável, chamado de superarmado, ele possui armadura em excesso, de forma que ela não atingirá seu desempenho máximo, pois o concreto romperá antes. No domínio 4a a flexão é composta com armaduras comprimidas e no domínio 5 há compressão não uniforme, sem tração (CARVALHO e FILHO, 2014). Segundo a NBR 6118:2014, está associada ao domínio 4 a ruptura frágil da estrutura, como é possível verificar na Figura 11.

Abaixo, na Figura 12, é possível averiguar a representação de uma seção retangular de uma viga com indicação da posição da linha neutra, bem como, seus diagramas de deformação específica.

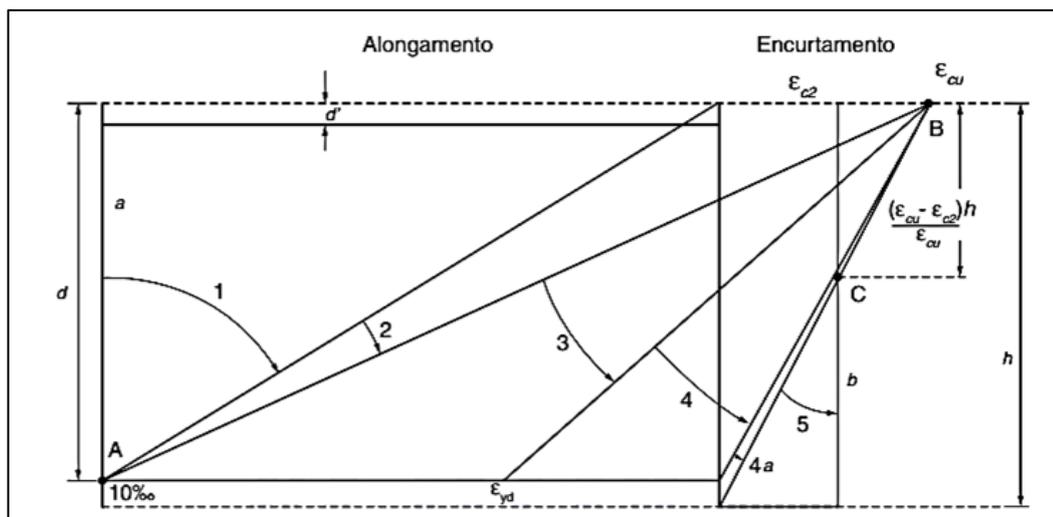


Figura 11 – Domínios de estado-limite último (ELU) de uma seção transversal  
Fonte: NBR 6118:2014 (2014).

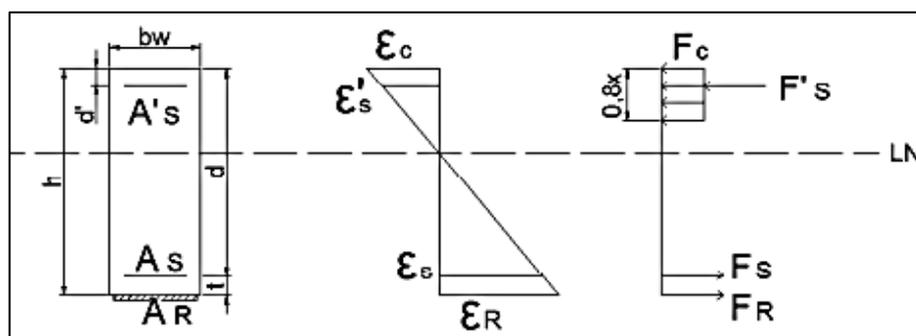


Figura 12 – Indicação da posição da linha neutra e diagramas de deformação  
Fonte: Adaptado de Machado (2002).

De acordo com Carvalho e Filho (2014), para o dimensionamento deve-se considerar primeiramente o equilíbrio de forças atuantes normais ( $F$ ) à seção transversal e dos momentos das forças internas em relação ao centro de gravidade da armadura ( $M_d$ ), conforme as equações (16) e (17):

$$\sum F = 0 \rightarrow F_s - F_c = 0 \rightarrow F_s = F_c \quad (16)$$

$$\sum M = M_d \rightarrow M_d = F_c \cdot z \quad (17)$$

Onde,

$M$  = momento fletor.

$z$  = distância entre as resultantes de tração e compressão.

A partir das equações (16) e (17), obtém-se:

$$M_d = F_s \cdot z \quad (18)$$

$$z = d - 0,4 \cdot x \quad (19)$$

Sendo ( $d$ ) a altura útil, obtida pela seguinte equação:

$$d = h - c - \phi_l - \phi/2 \quad (20)$$

Dados,

$h$  = altura seção transversal.

$c$  = espessura de cobertura adotada.

$\phi_l$  = diâmetro da armadura transversal.

$\phi$  = diâmetro da armadura longitudinal.

Para Pfeil (1975), o cálculo do momento fletor relativo ( $\mu$ ) pode ser calculado por meio da equação (21) e a taxa mecânica da armadura ( $\omega$ ), a partir da equação (24):

$$\mu = \frac{M_d}{f_{cd} \cdot b_w \cdot d^2} \quad (21)$$

$$f_{cd} = 0,85 \cdot (f_{ck}/\gamma_c) \quad (22)$$

Sendo,

$\gamma_c$  = coeficiente de ponderação da resistência do concreto (o valor usual para o concreto é 1,4, segundo a NBR 6118:2014).

$f_{cd}$  = resistência de cálculo do concreto à compressão.

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto à compressão.

$b_w$  = largura da seção transversal.

$$\omega = \rho \frac{f_c}{f_s} \quad (23)$$

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} \quad (24)$$

$$\omega = y/d \quad (25)$$

$$x = 1,25 \cdot y \quad (26)$$

Sendo,

$\rho$  = taxa geométrica de armadura longitudinal de tração.

$A_s$  = área de armadura longitudinal da seção transversal.

$A_c$  = área de concreto da seção transversal.

$f_{yd}$  = resistência de cálculo do aço à tração.

$x$  = altura da linha neutra.

Têm-se a equação (27) como relação entre a taxa mecânica da armadura ( $\omega$ ) e o momento fletor relativo ( $\mu$ ):

$$\omega^2 - 2\omega + 2\mu = 0 \quad (27)$$

Fazendo-se uso das equações (24), (25) e (26), determina-se a posição da linha neutra ( $x$ ), e assim, é possível determinar o domínio no qual trabalha a peça e efetuar o cálculo da resultante das tensões de compressão. Desta forma, o próximo passo se dá pela verificação do domínio que será atingido pela peça no estado limite último (ELU). Para tal, Carvalho e Filho (2014) indicam a equação (28):

$$\varepsilon_s = \frac{d-1,25y}{1,25y} \cdot 3,5\text{‰} \quad (28)$$

Para  $\varepsilon_{yd} \leq \varepsilon_s \leq 10\text{‰}$  utiliza-se  $\sigma_{sd} = f_{yd}$ , já quando  $\varepsilon_s \leq \varepsilon_{yd}$  deve-se calcular a tensão de tração na armadura ( $\sigma_{sd}$ ) em função do módulo de elasticidade do aço ( $E_s$ ) e da deformação específica encontrada ( $\varepsilon_s$ ), como é representado nas equações (29) e (30):

$$\sigma_{sd} = f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s \quad (29)$$

$$\sigma_{sd} = E_s \cdot \varepsilon_s \quad (30)$$

Onde:

$\gamma_s$  = coeficiente de ponderação da resistência do aço.

A partir das definições anteriores, é possível fazer o dimensionamento da área mínima de armadura necessária ( $A_s$ ), por meio da equação (31):

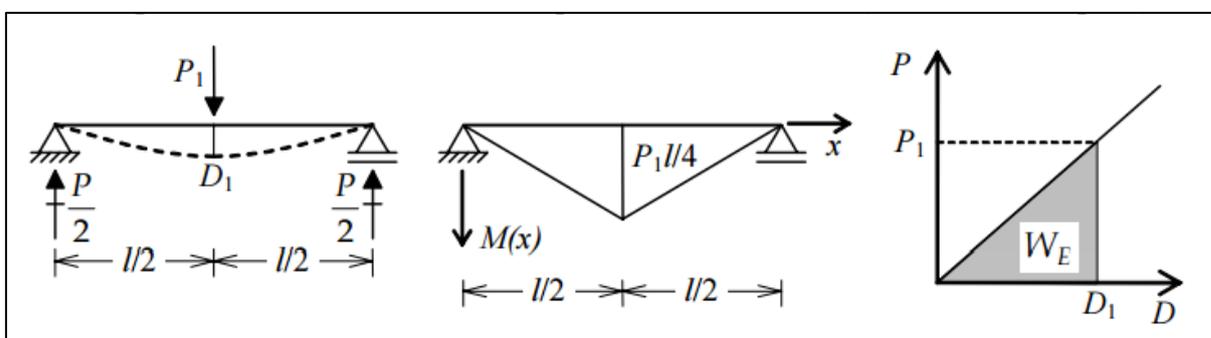
$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot \sigma_{sd}} \quad (31)$$

Ao final, deve ainda realizar as verificações de armadura mínima, prescritas pela NBR 6118:2014, e definir a quantidade e diâmetro das barras de acordo com o dimensionamento realizado.

### 2.6.1 Deformações na flexão

O trabalho mecânico realizado por cargas aplicadas em uma estrutura é igual à energia de deformação interna armazenada nela. Se as cargas forem retiradas lentamente, o trabalho vai ser recomposto, assim como ocorre na compressão e descompressão de uma mola (MARTHA, 2015).

A aplicação direta desse princípio é demonstrada abaixo na determinação do deslocamento no ponto central da viga mostrada na Figura 13, submetida a uma força vertical  $P_1$  aplicada no meio do vão. Deseja-se calcular o deslocamento vertical  $D_1$  no ponto de aplicação da carga. É desprezada a energia de deformação por cisalhamento em presença da energia de deformação por flexão. O diagrama de momentos fletores da viga para esse carregamento também está mostrado na Figura 13 (MARTHA, 2015).



**Figura 13 – Viga biapoiada com uma carga concentrada central**  
 Fonte: Martha, 2015

Assim, considerando um comportamento linear para a estrutura, o trabalho total das forças externas para esse exemplo é:

$$W_E = 1/2 P_1 D_1 \quad (32)$$

Por sua vez o momento fletor é dado por:

$$M = \frac{P_1 \cdot l}{4} \quad (33)$$

Como não existem esforços axiais nessa estrutura e a energia de deformação por cisalhamento é desprezada, a energia de deformação elástica é função apenas do efeito de flexão. Sendo assim, igualando o trabalho externo com a energia de deformação interna, chega-se a:

$$1/2 P_1 D_1 = 1/2 \int_0^l M^2 / EI dx \quad (34)$$

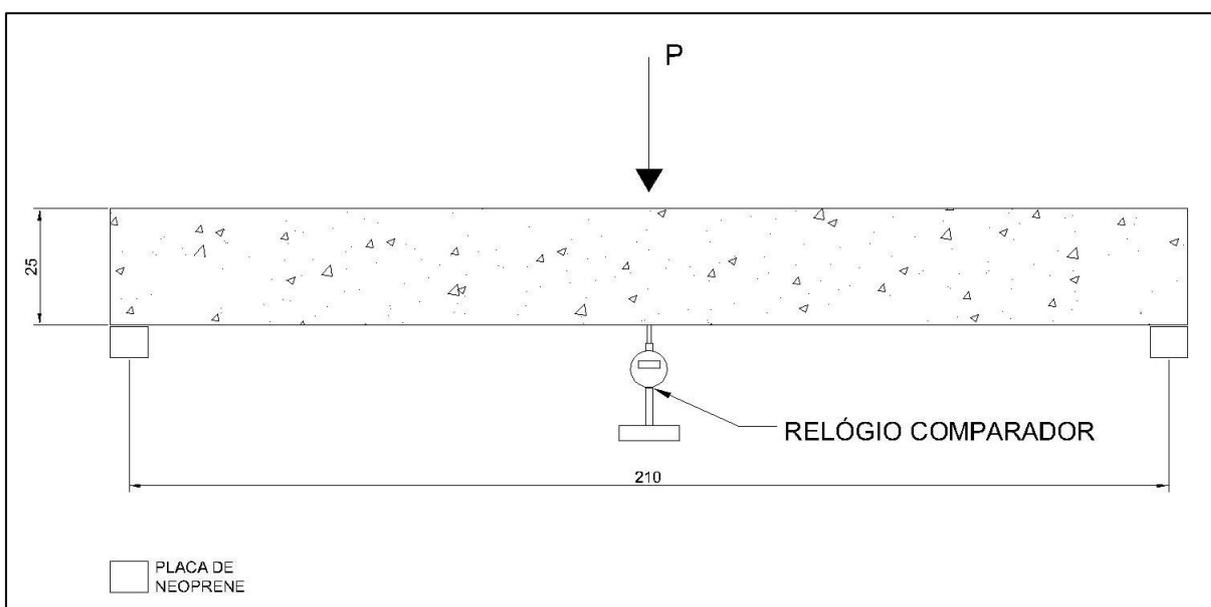
Finalmente, o deslocamento vertical do ponto central é dado por:

$$D_1 = \frac{P_1 l^3}{48EI} \quad (35)$$

Observa-se que a utilização do princípio da conservação de energia possibilitou o cálculo do deslocamento vertical do ponto central dessa viga.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de alcançar os objetivos do estudo, foram realizados ensaios de flexão simples reta de três pontos em vigas de concreto armado, com e sem aplicação de reforço à flexão com CFC. O referido ensaio consiste em submeter cada viga simplesmente apoiada a esforços de flexão simples, por meio da aplicação de uma carga centrada. A representação esquemática do ensaio é apresentada na Figura 14.



**Figura 14 – Esquema de ensaio a flexão de três pontos em viga de concreto armado**  
**Fonte: Autoria própria.**

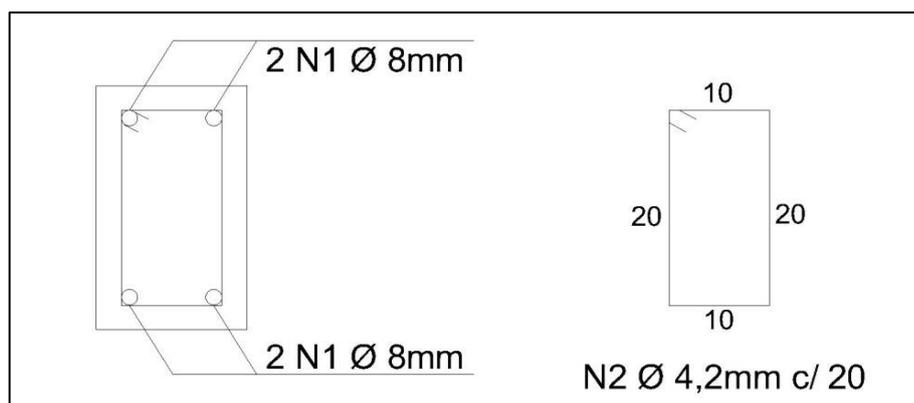
Durante o experimento, monitoraram-se os deslocamentos ocorridos no centro das vigas, fazendo-se uso de um relógio comparador, aparelho de grande precisão, no caso deste experimento, digital, para medições da ordem de um micrometro.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS VIGAS

As vigas que tiveram o desempenho à flexão analisado, com e sem aplicação do reforço de sistemas CFC, foram moldadas há aproximadamente três anos, no laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como objeto

de estudo de um trabalho de Iniciação Científica. As vigas mencionadas foram executadas com materiais disponíveis no mercado, os quais têm como características principais, estipuladas na época da realização, conforme detalhamento da Figura 15.

- Concreto usinado com resistência característica aos 28 dias de 25 MPa (C25);
- Armadura longitudinal composta por 4 barras, com bitola de 8 mm cada, em aço CA-50;
- Armadura transversal composta por estribos com bitola de 4,2 mm, espaçados a cada 20 cm, em aço CA-60;
- Dimensão máxima do agregado de 19mm.



**Figura 15 – Detalhamento da armadura na seção transversal das vigas**  
**Fonte: Autoria própria.**

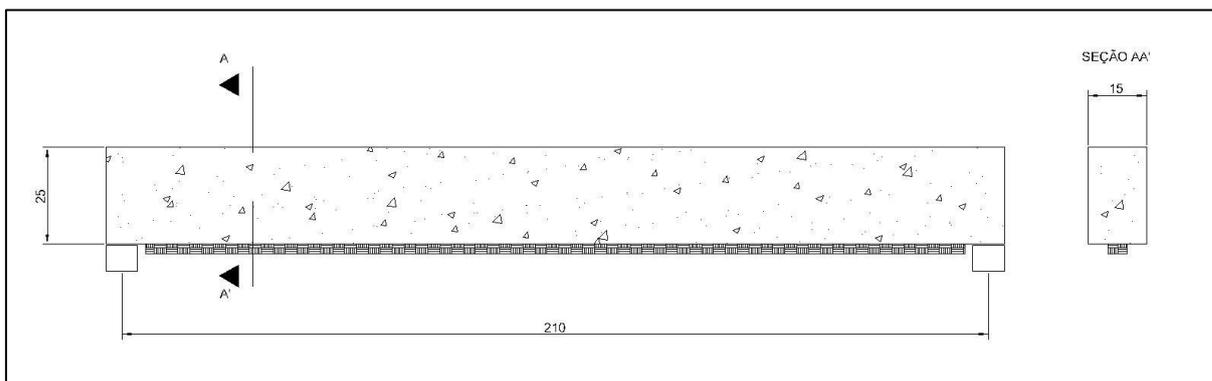
Como características construtivas do elemento foram adotadas:

- Cobrimento da armadura de 2,50 cm;
- Comprimento total entre apoios de 210 cm;
- Dimensões da seção transversal: 15 cm de largura e 25 cm de altura.

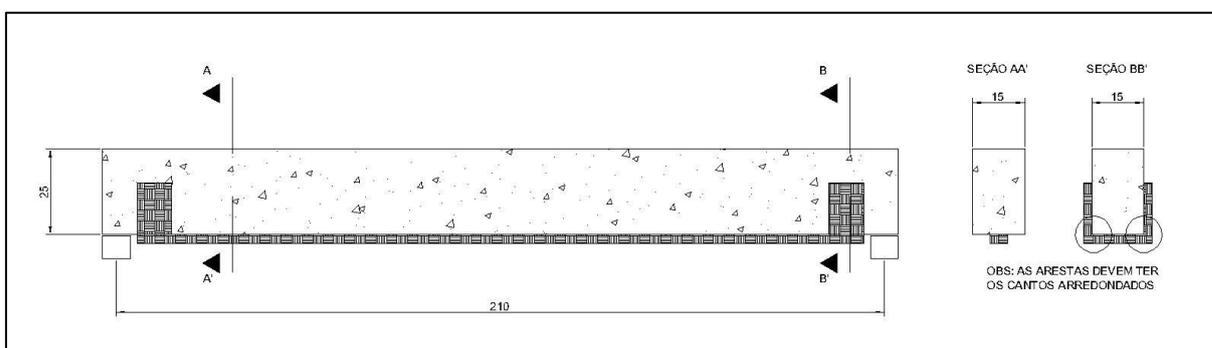
Para efeito de realização dos ensaios e análise dos resultados obtidos, as vigas foram divididas em três grupos, sendo cada um composto por três unidades:

- Grupo 1: formado pelas vigas de referência, nas quais não será aplicado o reforço;
- Grupo 2: inclui as vigas com aplicação de uma camada de lâmina de fibra de carbono com comprimento de 1,65 m, MC Bauchemie - MC-DUR CFK, com ancoragem reta, conforme a Figura 16;

- c) Grupo 3: compostos pelas vigas com aplicação de uma camada de lâmina de fibra de carbono com comprimento de 1,65 m, MC Bauchemie - MC-DUR CFK e um incremento de ancoragem em cada lateral com manta de fibra de carbono, com comprimento de 55 cm e largura de 8 cm, S&P Carbon Sheet, conforme a Figura 17;



**Figura 16 – Detalhamento da aplicação da lâmina de CFC nas vigas do Grupo 2**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 17 – Detalhamento da aplicação da lâmina e manta de CFC nas vigas do Grupo 3**  
**Fonte: Autoria própria.**

A aplicação da manta de fibra de carbono foi realizada pelas autoras do estudo, respeitando as orientações descritas no capítulo 2.4.3 e também as indicações dos fabricantes.

### 3.1.1 Capacidade Resistente da Viga de Referência

A fim de realizar a determinação do momento fletor máximo resistente esperado nas vigas de referência, foram utilizados os procedimentos para cálculo da

capacidade de carga citados no capítulo 2.6, porém como neste caso deseja-se obter o valor mais próximo do real obtido em ensaio retiraram-se todos os coeficientes de ponderação considerados para o concreto e aço.

A partir dos dados referentes aos materiais utilizados na execução, apresentados no item 3.1, toma-se o seguinte procedimento:

Dados:

Armadura longitudinal existente = 1,006 cm<sup>2</sup> (2 barras de aço CA-50 com bitola de 8 mm);

Armadura transversal existente = Estribos de aço CA-60 com bitola de 4,2 mm espaçados a cada 20 cm;

Base ( $b_w$ ) = 15 cm;

Altura ( $h$ ) = 25 cm;

Concreto C25, porém para efeitos de dimensionamento foi considerada a resistência obtida no ensaio de esclerometria que foi de 32 MPa.

a) Cálculo da altura útil ( $d$ ), a partir da equação (20):

$$\begin{aligned} d &= h - c - \phi_l - \phi/2 \\ d &= 25 - 2,5 - 0,42 - (0,8/2) \\ d &= 21,68 \text{ cm} \end{aligned}$$

b) Aplica-se na equação (24) as características das vigas, como é demonstrado abaixo:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{A_s \cdot f_{yk}}{A_c \cdot f_{ck}} = \frac{1,006 \cdot 50}{15 \cdot 21,68 \cdot 0,85 \cdot 3,2} \\ \omega &= 0,0569 \end{aligned}$$

c) Utilizando a equação (25) e (26) encontra-se o valor da altura da linha neutra ( $x$ ):

$$\begin{aligned} \omega &= y/d \\ 0,0569 &= y/21,68 \\ y &= 1,23 \text{ cm} \\ x &= 1,25 \cdot y \\ x &= 1,54 \text{ cm} \end{aligned}$$

- d) Executa-se a verificação quanto a compatibilidade de deformações específicas, fazendo uso da equação (28):

$$\varepsilon_s = \frac{d - 1,25y}{1,25y} \cdot 3,5\text{‰}$$

$$\varepsilon_s = \frac{21,68 - 1,54}{1,54} \cdot 3,5\text{‰}$$

$$\varepsilon_s = 45,75 \text{‰}$$

- e) A partir do valor obtido em “d)” adota-se  $\varepsilon_s = 10\text{‰}$  e  $\varepsilon_c < 3,5\text{‰}$ , satisfazendo as delimitações do domínio 2, assim utiliza-se  $\sigma_{sd} = f_{yd}$  e aplica-se a equação (27) e (21) e obtém-se o momento máximo resistente característico.

$$\omega^2 - 2 \cdot \omega + 2 \cdot \mu = 0$$

$$0,0569^2 - 2 \cdot 0,0569 + 2 \cdot \mu = 0$$

$$\mu = 0,0552$$

$$\mu = \frac{M_k}{f_{ck} \cdot b_w \cdot d^2}$$

$$M_k = 0,0552 \cdot 0,85 \cdot 3,2 \cdot 15 \cdot 21,68^2$$

$$M_k = 10,59 \text{ kN.m}$$

- f) Por fim, obtém-se o valor de carga a qual viga deve resistir:

$$P_k = 4 \times \frac{M}{L}$$

$$P_k = 4 \times \frac{10,59}{2,10}$$

$$P_k = 20,17 \text{ kN}$$

### 3.1.2 Capacidade Resistente da Viga com reforço em CFC

A fim de realizar a determinação do momento fletor máximo resistente esperado nas vigas com reforço de compósito em fibra de carbono, foram utilizados os procedimentos para cálculo da capacidade de carga citados no capítulo 2.5,

porém como neste caso, tem-se conhecimento da estrutura existente e deseja-se conhecer o momento que ela resistirá, será realizado o processo inverso.

A partir dos dados referentes aos materiais utilizados na execução, apresentados no item 3.1, toma-se o seguinte procedimento:

- a) Cálculo da força resultante da seção tracionada da armadura ( $F_s$ ):

$$F_s = A_s \times f_y = 1 \times 50 = 50 \text{ kN}$$

- b) Cálculo da força resultante da seção tracionada da fibra de carbono ( $F_f$ ):

$$F_f = A_f \times f_f = (10 \times 0,0165) \times 397,0 = 32,8 \text{ kN}$$

- c) Cálculo da força resultante da seção comprimida do concreto ( $F_c$ ):

$$F_c = F_s + F_f = 82,8 \text{ kN}$$

- d) Com esses valores, é possível o cálculo da linha neutra ( $x$ ):

$$x = \frac{F_s + F_f}{0,8 \times b_w \times h / \psi}$$

$$x = \frac{82,8 \times 10}{0,8 \times 15 \times 25 / 1,4}$$

$$x = 3,86 \text{ cm}$$

- e) Cálculo do momento resistente característico esperado pela seção a partir do reforço:

$$M_k = M_s + M_f$$

$$M_k = F_s(d - 0,4x) + F_f(h - 0,4x) \times 1,2$$

$$M_k = 50(20 - 0,4 \times 3,86) + 32,8(25 - 0,4 \times 3,86) \times 1,2$$

$$M_k = 18,46 \text{ kN.m}$$

- f) Também é possível calcular o momento fletor relativo ( $\mu$ ):

$$\mu = \frac{M_k}{f_{ck} \cdot b_w \cdot d^2}$$

$$\mu = \frac{1846}{82,8 \times 15 \times 21,68^2}$$

$$\mu = 0,00316$$

g) Por fim, obtém-se o valor de carga que a viga deveria resistir:

$$P_k = 4 \times \frac{M}{L}$$

$$P_k = 4 \times \frac{18,46}{2,10}$$

$$P_k = 35,16 \text{ kN}$$

### 3.1.3 Cálculo do Comprimento de Aderência do Sistema CFC

Também se faz necessário o cálculo do comprimento de aderência das fibras de carbono à superfície de concreto da viga, de acordo com o item 2.5.4, têm-se:

$$l_{t,max} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_{fc} \cdot t_{fc}}{f_{ct,m}}}$$

$$l_{t,max} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{228 \times 10^4 \times 0,0165}{14,035}}$$

$$l_{t,max} = 36,2 \text{ cm}$$

Deve-se levar em consideração as características das vigas e do reforço aplicados na estrutura estudada.

## 3.2 APLICAÇÃO DO REFORÇO

Com a finalidade de concretizar o estudo das vigas dos grupos 2 e 3, fez-se necessário a aplicação do reforço com lâmina de fibra de carbono na face a ser tracionada e ancoragem com manta de fibra de carbono nas extremidades das vigas do grupo 3, conforme já apresentado na Figura 17.

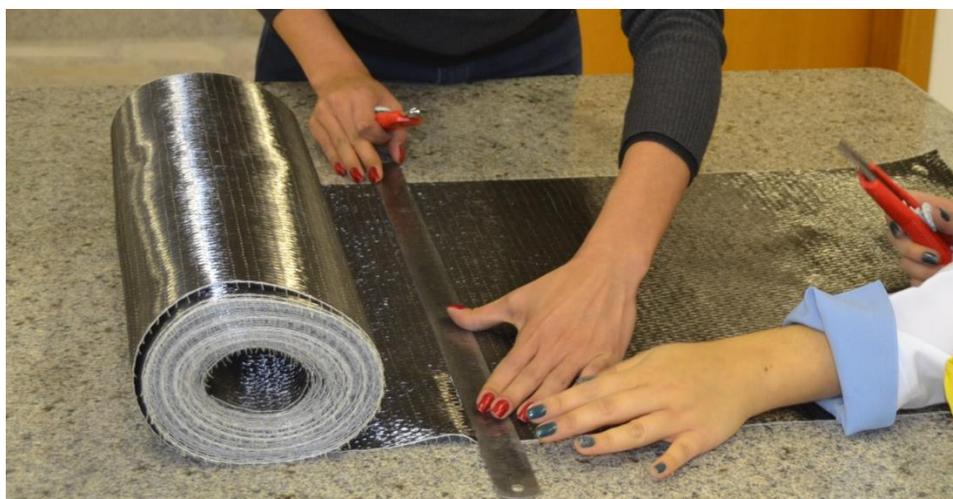
A lâmina de fibra de carbono utilizada é produzida pela empresa MC Bauchemie, cada embalagem possui um rolo de lâmina com 5 cm de largura e 10

metros de extensão. Devido às dimensões de vão das vigas, a lâmina foi dividida em seis pedaços com comprimento de 1,65 metros cada e para o corte foi utilizado um estilete comum, como pode ser observado na Figura 18.

A manta de fibra de carbono utilizada na ancoragem é produzida pela S&P Clever Reinforcement, para aplicação no grupo 3, foram utilizadas 6 tiras de manta de CFC com 8 cm de largura por 55 cm comprimento, cortadas com tesoura comum e estilete, conforme apresentado na Figura 19.

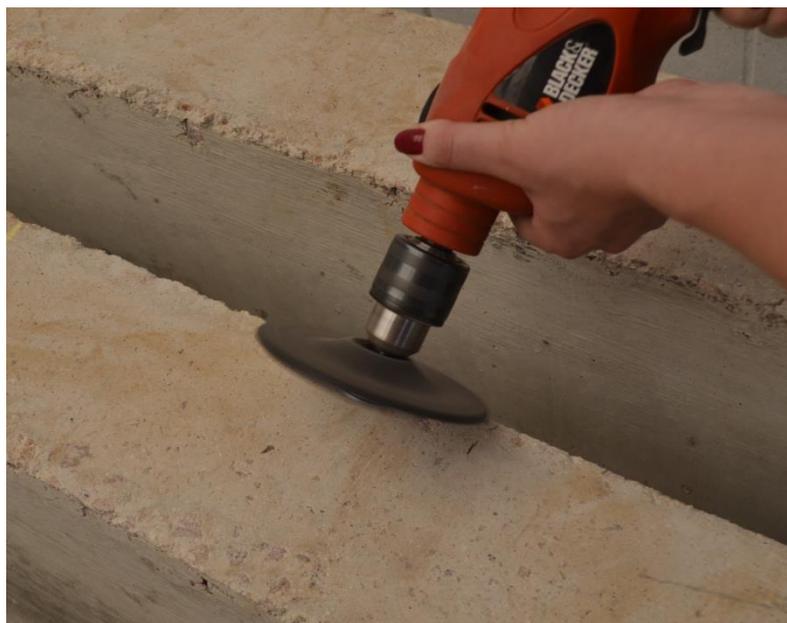


**Figura 18 – Corte da lâmina de CFC**  
Fonte: Autoria Própria.



**Figura 19 – Corte da manta de CFC**  
Fonte: Autoria Própria.

Seguindo as orientações descritas no capítulo 2.4.3, foi feito o arredondamento dos ângulos retos nos trechos onde seria aplicada a ancoragem, fazendo-se uso de uma lixadeira manual, e ainda foi realizada a mistura dos dois componentes da resina epóxi, utilizando-se um misturador elétrico, conforme Figura 20 e Figura 21.



**Figura 20 – Arredondamento dos ângulos retos na região de aplicação da ancoragem**

Fonte: Autoria Própria.



**Figura 21 – Mistura dos componentes da resina epóxi**

Fonte: Autoria Própria.

A colagem propriamente dita da lâmina de CFC foi feita aplicando-se uma camada da resina epóxi, com aproximadamente 2 mm de espessura, na região central ao longo do comprimento da viga, conforme é demonstrado na Figura 22, em seguida é posicionada a lâmina sobre a resina e, então, retiram-se as possíveis bolhas de ar que tenham ficado na interface resina-lâmina, fazendo-se uso de uma espátula plástica, de acordo com o exposto na Figura 23.



**Figura 22 – Aplicação da resina epóxi e posicionamento das lâminas**  
Fonte: Autoria Própria.



**Figura 23 – Retirada de possíveis bolhas de ar da interface resina-lâmina**  
Fonte: Autoria Própria.

Além da lâmina, nas amostras do Grupo 3, foi aplicada a manta de CFC atuando como ancoragem nas extremidades das vigas, a execução se deu de forma bem semelhante a anterior. Primeiramente foi aplicada uma camada de resina epóxi na região, conforme pode ser observado na Figura 24, posteriormente é posicionada a manta de CFC e feita a retirada do ar fazendo-se uso de um rolo de nylon. Nesta etapa utiliza-se também uma resina saturante para imprimação, como é demonstrado na Figura 25.



**Figura 24 – Aplicação de resina epóxi na região do posicionamento da ancoragem**  
Fonte: Autoria Própria.



**Figura 25 – Imprimação e retirada das possíveis bolhas de ar na interface manta-resina**  
Fonte: Autoria Própria.

Concluída a aplicação da lâmina e mantas nas vigas dos grupos 2 e 3, a configuração do reforço se deu conforme é apresentado na Figura 26 e na Figura 27.



**Figura 26 – Vigas do Grupo 2 após a execução do reforço**  
Fonte: Autoria Própria.



**Figura 27 – Vigas do Grupo 3 após a execução do reforço**  
Fonte: Autoria Própria.

Posteriormente à aplicação da lâmina e manta de CFC nas vigas dos grupos 2 e 3, respeitou-se o tempo de cura da resina epóxi, as vigas ficaram em repouso durante quinze dias no laboratório da UTFPR.

### 3.3 DETALHAMENTO DOS ENSAIOS

O ensaio de ruptura das vigas foi realizado após quinze dias da aplicação, conforme descrito no item 3.2. Durante os ensaios, cada viga foi apoiada em suas extremidades e submetida a esforços de flexão simples, conforme esquematizado na Figura 14, por meio de uma carga concentrada, chamado ensaio de flexão de três pontos. A Figura 28 e a Figura 29 representam a disposição das vigas na prensa antes do início do ensaio. Em cada apoio, as vigas foram dispostas sobre uma placa de neoprene, cuja finalidade é permitir deslocamentos e rotações.

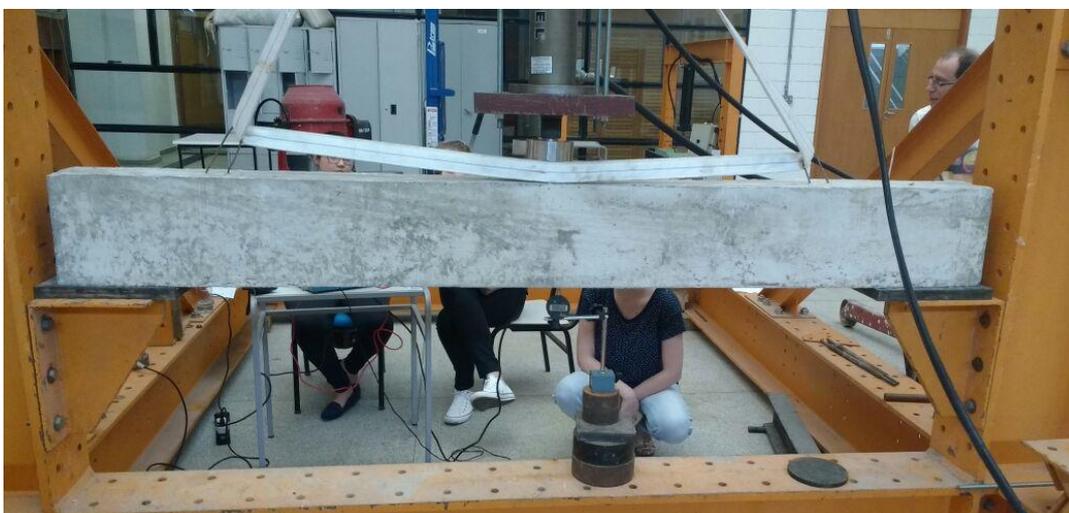


Figura 28 – Viga posicionada para início do rompimento  
Fonte: Autoria Própria.

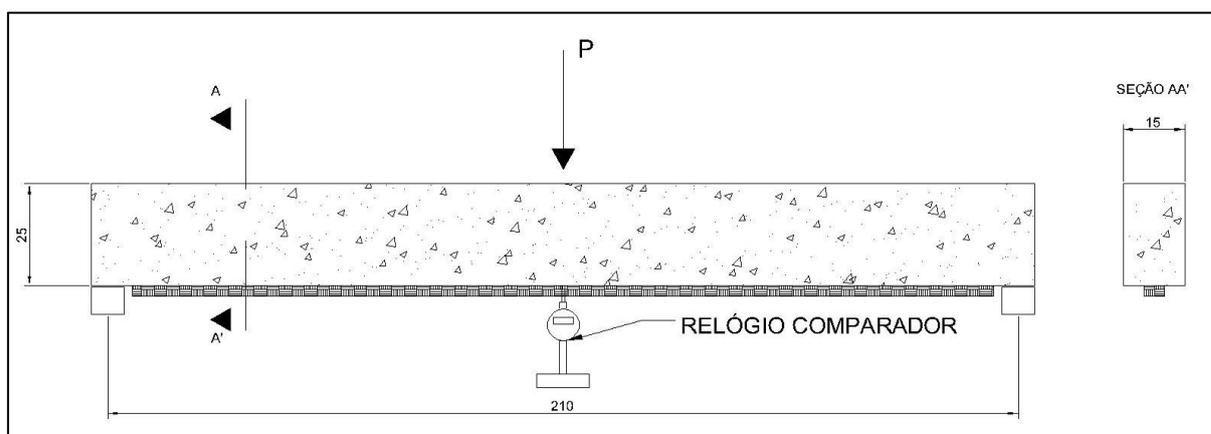
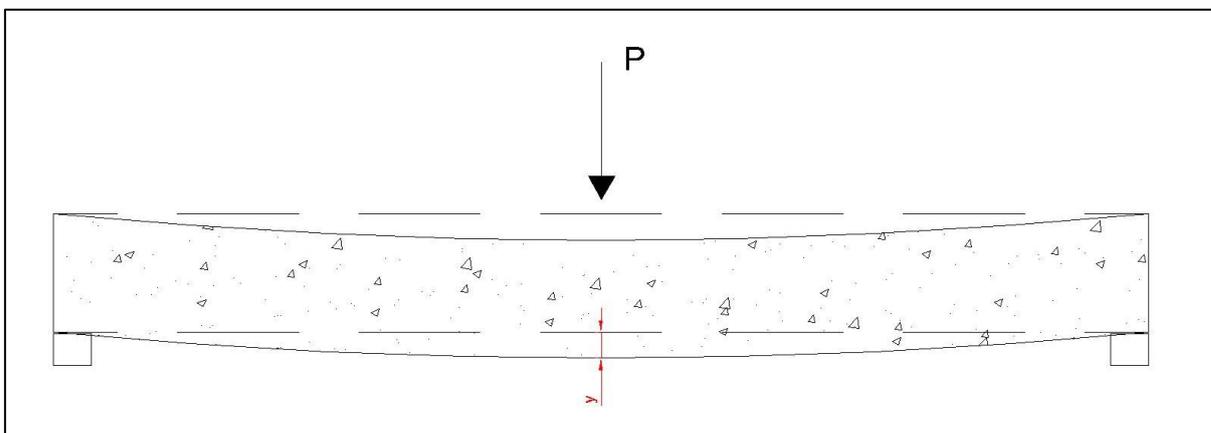


Figura 29 – Esquema de ensaio à flexão de 3 pontos nas vigas do Grupo 2  
Fonte: Autoria Própria.

Os ensaios foram realizados tendo a carga aplicada manualmente, por meio de um macaco hidráulico. Para a obtenção dos deslocamentos específicos, utilizou-se um relógio comparador localizado no centro da face tracionada de todas as vigas amostradas, conforme demonstrado na Figura 30. Foram realizadas leituras do deslocamento no centro das vigas a cada 5 kN de incremento de carga centrada aplicada, conforme esquema da Figura 31.



**Figura 30 – Detalhe da disposição do relógio comparador e célula de carga**  
**Fonte: Autoria Própria.**



**Figura 31 – Esquema do deslocamento vertical monitorado**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Para a aquisição de dados provenientes da célula de carga, fez-se uso do *software* AQDados. As intensidades das forças foram medidas com uma célula de carga com capacidade para 500 kN, conectadas ao aquisitor, que repassava os dados obtidos ao *software*. As primeiras vigas submetidas aos ensaios pertenciam ao grupo 1, seguidas das vigas dos grupos 3 e 2.

Além dos deslocamentos, foram registrados os valores de carga nos quais se observaram as primeiras fissuras, a carga em que ocorreu a delaminação do reforço e a carga em que se deu o rompimento da viga.

Para as vigas de referência (grupo 1), o relógio comparador foi retirado assim que foram observadas as primeiras fissuras. Para as vigas dos grupos 2 e 3, o aparelho foi retirado com o valor de carga de 40kN. Após, seguiu-se com o incremento de carga até a ruptura da viga.

## 4 RESULTADOS

Em decorrência do monitoramento dos deslocamentos verticais ao longo do ensaio de flexão simples reta de cada viga, aquisitou-se os dados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Deslocamentos verticais médios

Carga Aplicada (kN)	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 3		
	V1 (mm)	V2 (mm)	V3 (mm)	V7 (mm)	V8 (mm)	V9 (mm)	V4 (mm)	V5 (mm)	V6 (mm)
10	0,93	0,76	0,88	0,5	0,63	0,3	0,56	0,49	0,53
15	1,5	1,65	1,79	0,86	1,26	0,63	1,05	0,92	1,13
20	1,96	2,45	2,58	1,38	1,61	0,95	1,78	1,3	1,64
25	2,79	3,34	3,38	1,66	2,05	1,44	2,24	1,76	2,21
30	-	4,75	4,36	2,7	2,69	2,11	2,99	2,57	2,95
35	-	-	5,52	3,56	3,64	2,96	4,1	3,41	3,08
40	-	-	-	4,39	4,59	3,83	4,93	4,18	4,73

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos deslocamentos verticais médios para cada grupo de vigas, pode-se elaborar um gráfico e estabelecer uma linha de tendência, neste caso de primeiro grau, a fim de facilitar a visualização, conforme pode ser observado no Gráfico 1.

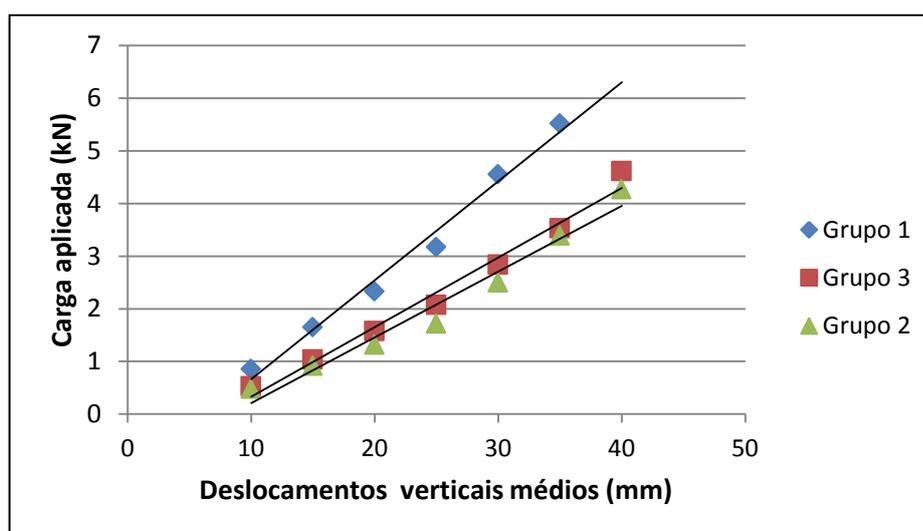


Gráfico 1 – Deslocamento vertical médio em função da carga aplicada  
Fonte: Autoria própria.

A aplicação da carga ao longo do tempo para cada peça foi dada conforme descrito na metodologia. Para proporcionar a comparação entre as vigas dos diferentes grupos, foram coletados os dados de carga aplicada na ruptura e tipo de ruptura ocorrida para cada uma das vigas, de acordo com o apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 – Carga de ruptura e tipo de ruptura**

<b>Grupo</b>	<b>Viga</b>	<b>Carga de ruptura (kN)</b>	<b>Tipo de Ruptura</b>
1	V1	46,3	Flexão
	V2	40,6	Flexão
	V3	42,8	Flexão
2	V7	52,6	Flexão
	V8	48,3	Flexão
	V9	61,4	Flexão
3	V4	56,8	Flexão
	V5	49,4	Flexão
	V6	61,5	Flexão

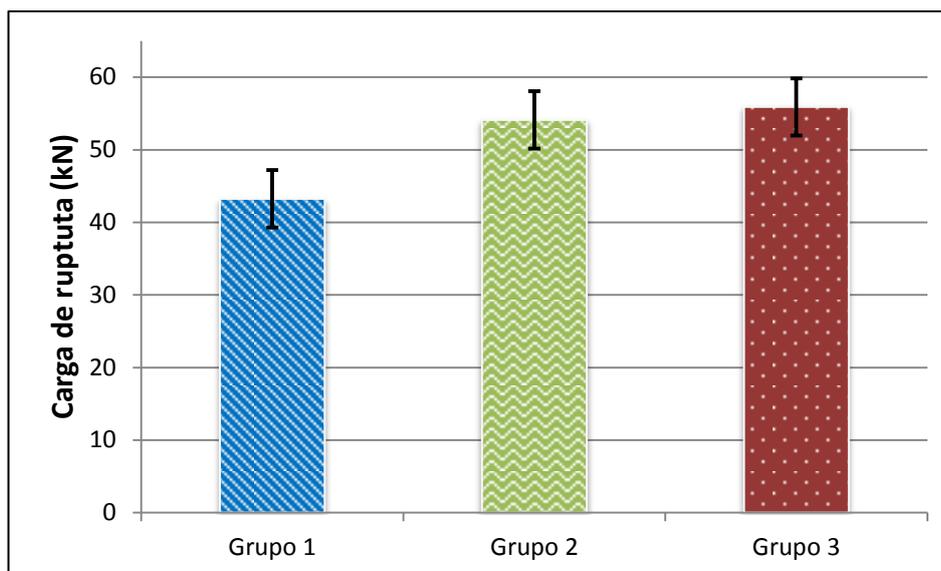
**Fonte: Autoria Própria.**

A partir dos dados apresentados na Tabela 2, determinaram-se os valores médios para cada grupo de vigas, expostos na Tabela 3 e Gráfico 2.

**Tabela 3 – Valores médios de carga de ruptura**

<b>Média dos Grupos</b>	<b>Carga de ruptura (kN)</b>
1	43,2
2	54,1
3	55,9

**Fonte: Autoria Própria.**



**Gráfico 2 – Carga de ruptura média**  
**Fonte: Autoria própria.**

Como descrito, ao longo do ensaio controlou-se visualmente o momento em que ocorreu a abertura de fissuras, obtendo, assim, os dados apresentados na Tabela 4:

**Tabela 4 – Carga e deslocamento vertical no momento de aparecimento de fissuras**

Grupo	Viga	Carga no momento da fissura (kN)	Média de Carga (kN)	Deslocamento vertical na abertura de fissura (mm)	Média de Deslocamento (mm)
1	V1	25,0	20,3	2,79	2,34
	V2	19,0		2,45	
	V3	17,0		1,79	
2	V7	31,0	29,3	2,70	2,29
	V8	25,0		2,05	
	V9	32,0		2,11	
3	V4	34,0	30,7	2,99	2,32
	V5	28,0		1,76	
	V6	30,0		2,21	

**Fonte: Autoria própria.**

Obtiveram-se, ainda, os valores de carga para os quais houve início do descolamento da lâmina de fibra de carbono, conforme é apresentado na Tabela 5:

**Tabela 5 – Carga aplicada no início da delaminação**

<b>Grupo</b>	<b>Viga</b>	<b>Carga no início da delaminação (kN)</b>	<b>Média de Carga (kN)</b>
Grupo 2	V7	35	31
	V9	27	

**Fonte: Autoria própria.**

Não foi verificada, em nenhuma das amostras, a ruptura do reforço de fibra de carbono, a delaminação ocorreu antes em todos os casos.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÕES

Em relação aos resultados apresentados na Tabela 1, é verificado, ao comparar as vigas do grupo 1 e as do grupo 2, que houve uma diminuição significativa no deslocamento vertical obtido, ou seja, com a aplicação do reforço de lâmina de fibra de carbono na parte inferior das vigas ocorre um aumento da rigidez da peça. A fim de quantificar tal acréscimo, calculou-se, a partir da equação 35, o módulo de rigidez para a carga de 30 kN nos três grupos de estudo, sendo os resultados apresentados na Tabela 6:

**Tabela 6 – Cálculo do Módulo de rigidez à carga de 30 kN**

Grupo	Viga	Deslocamento vertical (mm)	Média de Deslocamento (mm)	Média do módulo de rigidez (kN.m <sup>2</sup> )
1	V1	-	4,555	1097
	V2	4,75		
	V3	4,36		
2	V7	2,7	2,50	2000
	V8	2,69		
	V9	2,11		
3	V4	2,99	2,837	1762
	V5	2,57		
	V6	2,95		

**Fonte: Autoria própria.**

O incremento de rigidez, observado na Tabela 6, é um dos benefícios observados com o uso do reforço com lâmina de fibra de carbono, porém deve-se ter cuidado para que a rigidez não seja ampliada a ponto de ocorrer uma ruptura frágil do elemento, o que não é desejado.

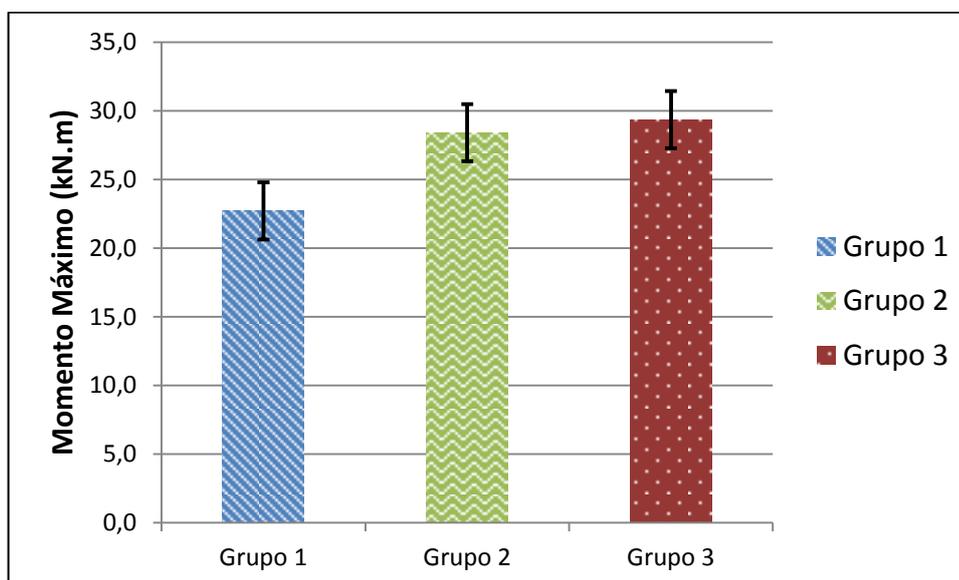
Quanto ao comparativo dos deslocamentos verticais obtidos nos grupos 2 e 3, não se considera expressiva a diminuição ocorrida, haja vista que os valores médios são muito próximos, conforme é apurado no Gráfico 1, ou seja, para as vigas deste estudo, não há grandes vantagens, em relação a rigidez, no uso da ancoragem de manta de fibra de carbono. Acredita-se que tal fato ocorre por já haver um comprimento de ancoragem reta suficiente nas vigas do grupo 2.

A partir das cargas máximas de ruptura obtidas no ensaio, apresentadas na Tabela 2, calcularam-se, utilizando a equação 33, os valores de momento fletor máximo resistente para cada viga, os valores obtidos são apresentados na Tabela 7 e no Gráfico 3:

**Tabela 7 – Momentos Fletores**

Grupo	Viga	Momento Máximo (kN.m)	Momento Máximo Médio (kN.m)
1	V1	24,3	22,7
	V2	21,3	
	V3	22,5	
2	V7	27,6	28,4
	V8	25,4	
	V9	32,2	
3	V4	29,8	29,3
	V5	25,9	
	V6	32,3	

Fonte: Autoria própria



**Gráfico 3 – Momento Fletor Máximo**

Fonte: Autoria própria.

Com esta análise para cada grupo de vigas, conclui-se que houve aumento significativo da resistência à flexão simples reta com o uso do reforço de lâmina de

fibra de carbono na parte inferior das vigas no grupo 2 em relação às vigas do grupo 1, resultado que já era esperado. Porém, do grupo 2 para o grupo 3 não se considera expressivo o aumento ocorrido, como é observado no Gráfico 3, ou seja, quanto ao aumento de resistência à flexão simples reta não foi vantajoso, para esta configuração de peça e reforço, o uso da ancoragem com manta de fibra de carbono.

O incremento de resistência ocorrido demonstra que a aplicação do reforço nas vigas concreto armado, grupos 2 e 3, divide com as barras de aço existentes as tensões de tração aplicadas.

Com a finalidade de analisar o desempenho do reforço e ancoragem com fibra de carbono em relação ao aparecimento de fissuras, calculou-se a relação percentual entre a carga de ruptura e a carga a partir da qual se inicia a fissuração, conforme pode ser observado na Tabela 8:

**Tabela 8 – Relação percentual entre a carga de ruptura e a carga a partir da qual se inicia a fissuração**

<b>Grupo</b>	<b>Carga de ruptura (kN)</b>	<b>Carga no momento da fissura (kN)</b>	<b>Percentual (%)</b>
1	43,2	20,3	47%
2	54,1	29,3	54%
3	55,9	30,7	55%

**Fonte: Autoria própria.**

Constata-se que houve moderada melhora na performance das vigas dos grupos 2 e 3 em relação as do grupo 1, quanto ao surgimento de fissuras. Já comparando os resultados obtidos para os grupos 2 e 3, não se considera expressivo o aumento ocorrido na razão.

Com os dados obtidos ainda é possível contrapor os resultados de momento fletor máximo de cálculo e o momento fletor máximo experimental, como apresentado na Tabela 9:

**Tabela 9 – Comparação entre momento de cálculo e momento médio experimental**

<b>Grupo</b>	<b>Momento calculado (kN.m)</b>	<b>Momento médio experimental (kN.m)</b>	<b>Razão entre momento experimental e calculado</b>
1	10,59	22,7	2,1
2	18,46	28,4	1,6
3	18,46	29,3	1,6

**Fonte: Autoria própria.**

A partir desta análise, apura-se que os momentos fletores experimentais foram maiores que os de cálculo em todos os grupos, tal fato, deve-se ao uso de coeficientes de majoração das cargas atuantes no cálculo dos momentos e ainda, ao uso, no momento do cálculo, de uma tensão de escoamento do aço de 500 MPa, que é um valor de referência, porém o aço pode resistir mais. Para a obtenção de resultados mais próximos dos reais é possível realizar ensaio de tração no aço. Ainda como sugestão para uma melhor análise aconselha-se fazer o estudo com um maior número de vigas e assim, fazer uma análise de dados expúrios retirando possíveis valores que fogem a curva.

Nas vigas do grupo 3, com o uso de ancoragem, não houve o descolamento total da lâmina, ela ainda ficou colada nas extremidades, mesmo após a ruptura. A delaminação ocorreu na interface entre a resina epóxi e o concreto, devido ao surgimento de uma força de cisalhamento, a qual ocorre pela diferença abrupta de ordem grandeza entre o módulo de elasticidade do concreto e o módulo de elasticidade da fibra de carbono.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da realização deste estudo, foi possível analisar a eficiência da ancoragem do reforço de compósitos de fibra de carbono em vigas de concreto submetidas ao esforço de flexão simples reta.

As vigas reforçadas com CFC suportaram cargas mais elevadas que as vigas de referência. Observou-se que o aumento da resistência à flexão das vigas do grupo 2, com uma camada de lâmina e do grupo 3, com uma camada de lâmina e incremento de ancoragem lateral com manta de fibra de carbono, foi cerca de 25% superior à resistência apresentada pelas vigas sem reforço. Constatou-se também que as vigas do grupo 1 apresentaram fissuras muito superiores às das vigas dos outros grupos. Sendo que entre os grupos 2 e 3 o resultado obtido foi semelhante.

Com o rompimento, pôde-se analisar a aderência entre o compósito de fibra de carbono e o substrato de concreto armado. Em todos os casos, o rompimento do reforço se deu na interface entre a resina epóxi e o concreto, resultando no descolamento da lâmina – mesmo que não totalmente. Atribui-se o descolamento devido ao surgimento de uma força de cisalhamento na parte tracionada da viga, dada pela diferença das ordens de grandeza entre o módulo de elasticidade do concreto e o módulo de elasticidade da fibra de carbono.

Estudando o comportamento das vigas do grupo 3, com incremento de ancoragem, verificou-se que estas apresentaram resistências de ruptura levemente maiores, cerca de 3%, em relação as do grupo 2. Sendo assim, o aumento da capacidade de carga não foi expressivo, fato este que pode ser atribuído ao comprimento de ancoragem reta, existente no grupo 2, já ser o suficiente para resistir aos esforços solicitantes, não justificando, para este caso, o uso da ancoragem do tipo “U” feita com manta de fibra de carbono.

Ao comparar os deslocamentos verticais ocorridos, averiguou-se que houve diminuição dos valores encontrados nos grupos 2 e 3 em relação aos do grupo 1. Assim, conclui-se que ocorreu, nas vigas com o reforço de CFC, aumento de rigidez das peças. No entanto, comparando-se apenas as vigas com reforço, nota-se que não houve variação expressiva no módulo de rigidez, fato que foi evidenciado pela pequena diferença entre os deslocamentos verticais nos grupos 2 e 3.

Os resultados obtidos se deram dentro do esperado e atenderam às expectativas, uma vez que houve aumento da capacidade de carga e redução do

deslocamento vertical conforme a aplicação de reforço com CFC. Contudo, para este caso, não se considera viável o uso de ancoragem extra, que geraria gastos e mão-de-obra desnecessários.

Como sugestão para trabalhos futuros e ampliação dos estudos na área de reforço estrutural com compósitos de fibra de carbono, aponta-se:

- Aplicação do reforço com CFC fazendo-se uso de outros métodos;
- Análise do desempenho do reforço com CFC a esforços de cisalhamento e torção;
- Estudo de outras formas de ancoragem do reforço à flexão com CFC;
- Verificação do desempenho da interface resina epóxi e concreto, pesquisando novas técnicas que possam melhorar a aderência e evitar a delaminação.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **Standart test method for tensile properties of polymer matrix composite materials**. ASTM D3039-95, 1995.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440-2R-08 **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**. Detroit, July 2008.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução de Carmona Filho, A; Helene, P. São Paulo: Pini, 1992. 104p.

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

BALAGURU, P.; NANNI, A.; GIANCASPRO, J. **FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures**: a guide to fundamentals and design for repair and retrofit. New York, 2008.

BEBER, Andriei J. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono**. 1999. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

\_\_\_\_\_. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CALLISTER; William D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. Traduzido por Sérgio Murilo Stamile Soares. 7a Edição. Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e científicos, 2008. 705 p.

CÁNOVAS, Manuel F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988. 522 p.

CARMONA FILHO, A. **Patologia das estruturas de concreto**. São Paulo: Curso CIPERC da ABCP, 2000. 98p. (Notas de aula).

CARVALHO, Roberto C.; FILHO, Jasson R. de Figueiredo. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos, SP: EDUFSCar, 2014. 415 p.

CENTRAL FIBRA. **Manta de fibra de vidro – S. José**: catálogo. São José, 2016. Disponível em: <<http://centralfibra.com.br/produtos/manta-fibra-de-vidro-300>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

CORSINI, R. **Reforço de estruturas com fibra de carbono**. Disponível em: <<http://www.infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/20/artigo271667-1.aspx>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

DYNATECH Catálogo. **Fibra aramida**. Guarulhos, 2016. Disponível em: <<http://www.dynatech.ind.br/fibra-aramida>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

FIORELLI, Juliano. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

GRAZIANO, Francisco P. **Projeto e execução de estruturas de concreto armado**. São Paulo: CTE; O Nome da Rosa, 2005. 160 p.

HELENE, Paulo. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1992.

KAY, T. **Assessment and renovation of concrete structures**. London: Longman Scientific & Technical, 1992. 224 p.

MACHADO, Ari de P. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2002.

\_\_\_\_\_. **Manual de Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. 1. ed. São Paulo: VIAPOL, 2011.

MALUCELLI, Adriano. **O uso de fibras na construção civil**. 2004. 91 f. Monografia (Especialização em Gerenciamento de Obras) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

MARTHA, Luiz F. **Métodos básicos da análise de estruturas**. 1.ed. PUC-RIO, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

NEVILLE, Adam M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

PFEIL, Walter. **Concreto armado**: dimensionamento. 2. ed., rev. e atual. Rio de Janeiro: LTC, 1975. 368 p.

PIVATTO, Amanda B. **Reforço estrutural à flexão para viga biapoiada de concreto armado por chapas metálicas e compósito reforçado com fibras de carbono**. 2014. 126 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

REIS, Lília Siqueira N. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2001. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

SOUZA, Vicente C. M. de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. 5. tiragem. São Paulo: PINI, 2009.

TECHNIQUES. **Reforço estrutural com fibra de carbono**. Curitiba, 2016. Disponível em: < <http://techniques.com.br/reforco-estrutural-com-fibra-de-carbono/>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

VALENTE, Ana Paula; SILVA, Adriano; CALIXTO, José. **Análise dos processos de recuperação de patologias**: trincas e impermeabilização. Construindo, Belo Horizonte, v.1, n.2, p. 7-11, jul./dez. 2009.