

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

CARLOS EDUARDO PLÁCIDO

**ANÁLISE DO GANHO DE RESISTÊNCIA EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO REFORÇADAS COM MANTA DE
FIBRA DE CARBONO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2014

CARLOS EDUARDO PLÁCIDO

**ANÁLISE DO GANHO DE RESISTÊNCIA EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO REFORÇADAS COM MANTA DE
FIBRA DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Msc. Douglas Fukunaga Surco

CAMPO MOURÃO

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso N° 39

**ANÁLISE DO GANHO DE RESISTÊNCIA EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO
SUBMETIDAS À FLEXÃO REFORÇADAS COM MANTA DE FIBRA DE CARBONO**

por

Carlos Eduardo Plácido

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 8:00 horas do dia 11 de fevereiro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof.Me. Angelo Giovanni Bonfim
Corelhano**

(UTFPR)

Prof.Me. Adalberto R. de Oliveira

(UTFPR)

Prof.Me. Douglas Fukunaga Surco

(UTFPR)

Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Msc. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil: **Prof^o Dr. Marcelo Guelbert**

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

A minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me iluminado e me dado forças para vencer os momentos difíceis e por ter me dado graças em todos os momentos.

Agradeço também aos meus pais, José Augusto Plácido e Neuza de Paula Oliveira Plácido, por terem me apoiado e me amparado nestes longos cinco anos de faculdade, pois sem a força e os conselhos deles certamente não conseguiria fazer metade do que fiz. E também meus irmãos, André Augusto e Guilherme Agostinho, por terem servido de espelho e inspiração para mim durante a minha vida.

De forma especial, agradeço a Melina Maynara C. de Almeida, minha companheira e amor da minha vida, por ter me apoiado e me aturado nos momentos mais difíceis, e também pelas alegrias e momentos felizes que passamos juntos.

Agradeço infinitamente meu professor orientador Douglas Fukunaga Surco, por ter me auxiliado, orientado e dado as direções certas deste trabalho, pois sem ele certamente este projeto não teria sido finalizado.

Claro, agradeço aos meus amigos, Allan, Anderson Pitol, Elder e Saymon, que, pela nossa união, força de vontade, perseverança e companheirismo conseguimos vencer as dificuldades. E como não lembrar das noites de sono perdidas por provas desafiadoras. E agradeço também pelos momentos de diversão em que vivemos, churrascos que participamos, partidas de futebol, tererês, etc. E tenho certeza, que vocês serão ótimos profissionais, vencedores da vida.

Agradeço infinitamente a todos os professores que ajudaram na minha formação, pois com o ensinamento e a participação efetiva nos estudos contribuíram na minha graduação. Por fim, agradeço também a todos os colegas de sala de aula, desejando-lhes sucesso e que tenham uma carreira brilhante.

RESUMO

PLÁCIDO, Carlos Eduardo. **Análise do Ganho de Resistência em Vigas de Concreto Armados Submetidas à Flexão Reforçadas com Manta de Fibra de Carbono**. 2014. 48 folhas. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

O setor da construção civil tem passado por um momento ímpar, uma vez que este se encontra em ritmo acelerado. O desenvolvimento da tecnologia do concreto, das técnicas construtivas e implementação de sistemas computacionais para a elaboração do projeto estrutural, permitiram que se previsse com maior clareza o comportamento da estrutura. Assim, estruturas com elementos estruturais mais esbeltos estão sendo construídos, colocando, portanto, a estrutura em um grau de risco maior de surgimento de patologias. Com a necessidade de reparos em patrimônios históricos na Europa, com a preocupação da durabilidade de pontes na América do Norte, e até mesmo de sismos ocasionados no Japão, surgiram métodos não convencionais de reparos e reforços em estruturas. Um dos métodos utilizados é a fibra de carbono, pois por apresentar fácil e rápida aplicação, elevada resistência à tração, compressão, e cisalhamento, e também por ter como característica baixo peso específico. Devido a grande demanda por reparados e reforços estruturais, é necessário um estudo para melhor assegurar os engenheiros projetistas. Deste modo, este trabalho tem por objetivo mensurar o acréscimo de resistência gerado pela aplicação da manta de fibra de carbono em vigas de concreto armado. Esta análise de ganho de resistência foi feita através de ensaios mecânicos. Os resultados obtidos mostraram um grande acréscimo de resistência nos elementos estruturais, mostrando que a manta de fibra de carbono é eficiente.

Palavras-chave: Reforço; Resistência; Construção Civil; Eficiente.

ABSTRACT

PLÁCIDO, Carlos Eduardo. **Analysis of Gain Strength Concrete Beams Subjected to Bending Armed Reinforced with Carbon Fiber Blanket.** 2014. 48 sheets. Monograph Working Completion of Bachelor of Civil Engineering – Federal Technological University of Paraná. Campo Mourão, 2014.

The construction sector has experienced an odd moment, since this is fast-paced. The development of concrete technology, construction techniques and implementation of computer systems for the preparation of structural design, have enabled them to envisage more clearly the behavior of the structure. Thus, structures with thinner structural elements are being built, thus gluing the structure in a higher degree of risk for the development of pathologies. With the need of repairs to heritage sites in Europe, the durability of bridges in North America, and even caused earthquakes in Japan, emerged unconventional methods of repair and reinforcement structures. One method used is carbon fiber, because by presenting quick and easy application, high tensile strength, compression, and shear, and also have the characteristic low specific weight. Due to great demand for repaired and structural reinforcements, a study to better ensure design engineers is required. This study aims to measure the increase of resistance generated by the application plaid carbon fiber reinforced concrete beams. This strength gain was done through mechanical tests. The results showed a large increase of resistance in structural elements, showing that the blanket of carbon fiber is efficient.

Keywords: Reinforcement; Resistance; Construction; Efficient.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DIAGRAMA TENSÃO/DEFORMAÇÃO DAS FIBRAS DO SISTEMA MBRACE™.	10
FIGURA 2: GRÁFICO COMPARATIVO DO COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO COM AÇO E ALUMÍNIO.	10
FIGURA 3-REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA COMPÓSITO ESTRUTURAL DE FIBRA DE CARBONO.	11
FIGURA 4 - GRÁFICO DE SITTER.	14
FIGURA 5: GRÁFICO DE DIVERSOS PAÍSES COM OS PRINCIPAIS FOCOS DE SURGIMENTO DE PATOLOGIAS.	15
FIGURA 6-EXEMPLO DE ENSAIO DE CISALHAMENTO, ONDE (A) É CISALHAMENTO SIMPLES; (B) CISALHAMENTO DUPLO; (C) VISTA SUPERIOR.	18
FIGURA 7 – FLUXOGRAMA METODOLÓGICO.	21
FIGURA 8: ARMAÇÃO DAS ARMADURAS DOS CORPOS DE PROVA.	22
FIGURA 9: ARMADURA PRONTA PARA SER CONCRETADA.	22
FIGURA 10: BALANÇA UTILIZADA PARA A PESAGEM DOS MATERIAIS NA CONCRETAGEM DOS CORPOS DE PROVA.	23
FIGURA 11: BETONEIRA DE EIXO INCLINADO UTILIZADA PARA A MISTURA DO CONCRETO.	24
FIGURA 12: FORMAS COM AS ARMADURAS DISPOSTAS EM CIMA DA MESA VIBRATÓRIA, NA EMINÊNCIA DE SEREM CONCRETADAS.	24
FIGURA 13: REGULARIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DOS CORPOS DE PROVA COM O AUXÍLIO DE UM LIXADOR MECÂNICO.	25
FIGURA 14: DOSAGEM DA RESINA EPÓXY E DO ENDURECEDOR.	26
FIGURA 15: MISTURA DA RESINA EPÓXY AR 260 COM O ENDURECEDOR.	26
FIGURA 16: APLICAÇÃO DA PRIMEIRA CAMADA DE MATRIZ EPOXÍDICA NOS CORPOS DE PROVA.	27
FIGURA 17: APLICAÇÃO DO TECIDO DE FIBRA DE CARBONO NOS CORPOS DE PROVA COM O AUXÍLIO DE UM ROLO.	28
FIGURA 18 - PRENSA DL 30000.	29
FIGURA 19: CORPO DE PROVA COM ARMADURA DE DIÂMETRO DE 4,2MM ROMPIDO PELA MÁQUINA DE TESTES DL 30000.	29
FIGURA 20: RUPTURA POR CISALHAMENTO DO CORPO DE PROVA COM ARMADURA DE DIÂMETRO DE 4,2MM REFORÇADO COM MANTA DE FIBRA DE CARBONO.	30

FIGURA 21: RUPTURA POR CISALHAMENTO DO CORPO DE PROVA COM ARMADURA DE DIÂMETRO DE 8,0MM SEM A MANTA DE FIBRA DE CARBONO.....	30
FIGURA 22: RUPTURA POR CISALHAMENTO DO CORPO DE PROVA COM ARMADURA DE DIÂMETRO DE 8,0MM REFORÇADO COM MANTA DE FIBRA DE CARBONO.	31
FIGURA 23 - PRENSA PARA ENSAIOS DE CORPOS DE PROVA PARA VERIFICAÇÃO DO f_{ck} DO CONCRETO.	31
FIGURA 24: VIGA DE CONCRETO ARMADO COM O REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO ROMPIDA SEM HAVER DESLIZAMENTO DO REFORÇO ESTRUTURAL.....	36
FIGURA 25: ESQUEMA DE CARREGAMENTO DAS VIGAS ENSAIADAS (DIMENSÕES EM CENTÍMETROS).....	37

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: VALORES DE FC OBTIDOS PELOS 6 CORPOS DE PROVA FABRICADOS.	32
TABELA 2: RESULTADOS DE FORÇA MÁXIMA DE RUPTURA OBTIDOS NOS CORPOS DE PROVA COM AÇO DE DIÂMETRO DE 4,2MM SEM O REFORÇO ESTRUTURAL DA MANTA DE FIBRA DE CARBONO.	33
TABELA 3: VALORES OBTIDOS NO ENSAIO LABORATORIAL DA FORÇA DE RUPTURA MÁXIMA NOS CORPOS REFORÇADOS COM MANTA DE FIBRA DE CARBONO.	34
TABELA 4: RESULTADOS OBTIDOS PELA RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM AÇO DE DIÂMETRO DE 8,0MM SEM O REFORÇO DA MANTA DE FIBRA DE CARBONO.	35
TABELA 5: RESULTADO DO ENSAIO DE RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM AÇO DE 8,0MM REFORÇADOS COM MANTA DE FIBRA DE CARBONO.	35
TABELA 6: VALORES OBTIDOS PELO ENSAIO DE RUPTURA EM CORPOS DE PROVA COM ARMADURA DE DIÂMETRO DE 4,2MM.	37
TABELA 7: VALORES OBTIDOS PELO ENSAIO DE RUPTURA EM CORPOS DE PROVA COM ARMADURA DE DIÂMETRO DE 8,0MM.	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
2 OBJETIVOS	6
2.1 OBJETIVO GERAL	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3 JUSTIFICATIVA	7
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
4.1 MANTA DE FIBRA DE CARBONO	8
4.1.1 Principais Características Físicas e Mecânicas	8
4.1.1.2 Resistência à Tração	9
4.1.1.3 Comparativo entre os métodos de reforço estrutural	10
4.2 MATRIZ EPOXÍDICA	11
4.2.1 Principais Características Físicas e Mecânicas	11
4.2.1.1 Resinas	12
4.2.1.2 Imprimadores Primários e Regularizadores de Superfície	12
4.2.1.3 Resinas de Saturação	13
4.2.1.4 Revestimentos Protetores	13
4.3 CONCEPÇÕES DE REFORÇO ESTRUTURAL	13
4.3.1 Reforço Estrutural com o Compósito de Fibra de Carbono	15
4.3.2 Aplicações dos Sistemas Compósitos de Fibra de Carbono	16
4.4 ANCORAGEM DO COMPÓSITO FIBRA DE CARBONO NO SUBSTRATO (VIGA DE CONCRETO ARMADO)	17
4.5 ESCOLHA DOS SISTEMAS COMPÓSITOS ESTRUTURADOS COM FIBRAS DE CARBONO	18
5 METODOLOGIA	20
5.1 MATERIAIS	20
5.2 MÉTODOS	21
5.2.1 Elaboração dos corpos de prova	22
5.2.2 Aplicação do tecido de fibra de carbono nos corpos de prova	25
5.2.3 Ensaio para a determinação da força máxima de ruptura dos corpos de prova sem/com manta de fibra de carbono	28
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	32

6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NA RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM AÇO DE DIÂMETRO 4,2MM SEM/COM REFORÇO DE MANTA DE FIBRA DE CARBONO	33
6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NA RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM AÇO DE DIÂMETRO 8,0MM SEM/COM REFORÇO DE MANTA DE FIBRA DE CARBONO	34
6.4 ANÁLISE DA ADERÊNCIA DO TECIDO DE FIBRA DE CARBONO APLICADO NOS CORPOS DE PROVA COM AÇO DE DIÂMETRO 4,2MM E 8,0MM.....	36
6.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TAXA DE ARMADURA.....	37
7. CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Com o surgimento da necessidade de reparos em patrimônios históricos na Europa, da preocupação da durabilidade de pontes na América do Norte, de reforço estrutural devido aos sismos no Japão, e de reparos em estruturas em ambientes com elevado teor de agressividade, sistemas de reforço estrutural não convencionais surgem como alternativa para solucionar estes problemas, possibilitando o surgimento de novas técnicas de reforço e reparo estrutural.

O desenvolvimento da tecnologia do concreto, das técnicas construtivas e implementação de sistemas computacionais para a elaboração do projeto estrutural, permitiram que se previsse com maior clareza o comportamento da estrutura. Deste modo, a deterioração das estruturas, muitas vezes prematura é fruto do descaso com aspectos relativos à durabilidade, a inviabilidade de reconstrução em tempo hábil de estruturas vitais, os acidentes naturais e falhas de projeto, de detalhamento e de execução vêm aumentando a necessidade da prática do reparo e reforço das estruturas de concreto (ARAÚJO, 2002).

A primeira aplicação em campo do sistema compósito fibra de carbono como reforço estrutural no Brasil ocorreu em 1998, em Belo Horizonte, quando o Viaduto Santa Teresa, construído entre 1925 e 1927, foi reforçado com 3,80m² de laminados de fibras de carbono (MACHADO, 2002).

Os fatores importantes que influenciam na escolha das mantas de fibras de carbono de acordo com Meneguetti (2007) são: fácil aplicação, elevada resistência à tração e compressão, execução ágil, e ainda, pela leveza dos materiais a torna viável para vários tipos de reparo.

O aumento do número de aplicações dos PRF (Polímeros Reforçados com Fibras) em construções civis mobilizou a necessidade de coletar, de forma organizada, as informações sobre estes materiais. A garantia de segurança, para os projetistas e usuários destes projetos, influenciou para que várias pesquisas normativas aflorassem a partir dos anos 80, objetivando tanto o dimensionamento das estruturas quanto a caracterização dos materiais. Deste modo, muitos códigos e normas para sistemas PRF utilizados como reforço estrutural externo foram desenvolvidos nos últimos anos, principalmente na Europa, Japão, Canadá e Estados Unidos (GARCEZ, 2007).

Assim, surgiu a necessidade de pesquisas nesta área, para acompanhar o desenvolvimento destes novos materiais e se ter estimativas de ganhos de resistência fundamentados em expressivos números de ensaios laboratoriais.

Mediante a estes fatos, o objetivo deste estudo é analisar o ganho de resistência devido ao reforço estrutural do compósito de fibra de carbono em uma viga de concreto armado através de ensaios mecânicos, confrontando os resultados obtidos de outras vigas de concreto armado sem o reforço estrutural.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Mensurar o ganho de resistência em vigas de concreto armado submetidas à flexão utilizando o compósito de fibras de carbono para estruturas que necessitam de reforço estrutural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar as características físicas e mecânicas do compósito de fibra de carbono;
- Pesquisar métodos de aplicação da manta de fibra de carbono;
- Mensurar o ganho de resistência em vigas de concreto armado, onde uma parte das vigas com armadura de flexão com diâmetro de 4,2mm e outra parte com diâmetro de 8,0mm, ambas as diferentes armaduras sem/com o reforço do compósito de fibra de carbono, através de ensaios laboratoriais;
- Comparar os resultados obtidos através de ensaios laboratoriais;
- Avaliar o processo de execução do reforço com a manta de fibra de carbono.

3 JUSTIFICATIVA

A necessidade de expandir o conhecimento na utilização dos componentes de fibras de carbono no reforço de estruturas de concreto armado é importante, uma vez que algumas causas para a utilização de reparos com a manta de fibra de carbono são para corrigir falhas de concepção e execução do projeto, alteração da utilização da edificação, desgaste natural da edificação, falta de controle no limite de flechas e até necessidade de reparos em patrimônios históricos.

Segundo Beber (2003), as estruturas de concreto armado estão mais esbeltas e otimizadas em um ponto de vista estrutural e econômico, sendo mais sensíveis a qualquer defeito dos materiais, da execução ou do cálculo, podendo gerar situações de risco. Assim, o surgimento de patologias e a necessidade de reparos estruturais tornaram-se mais comuns.

De acordo com Ripper e Souza (1998), uma propriedade das fibras de carbono é o ganho de resistência à flexão, ao esforço transversal e a compressão em vigas, pilares e lajes, processo que exige cuidado no desenvolvimento de ancoragem da manta de fibra de carbono no elemento estrutural, assim como a mais detalhada análise das tensões de deslizamento na interface entre o compósito e o concreto. Desta maneira, ressalta-se a relevância no estudo de ancoragem da manta de fibra de carbono no elemento estrutural.

Conforme Machado (2002), as mantas de fibra de carbono abrangem, dentre suas características, reforçar elementos em boas condições estruturais para possibilitar o ganho de resistência devido à estrutura estar destinada a outra utilização.

Em meio a uma demanda de produtos alternativos aos métodos convencionais de reparos como armaduras metálicas, principalmente onde a estrutura do edifício esteja sujeita a ambientes corrosivos, torna-se necessário um estudo aprimorado sobre a manta de fibra de carbono, enfocando técnicas de aplicação do produto, os benefícios gerados e ainda uma análise do ganho real de resistência devido à aplicação do produto em vigas submetidas à flexão.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 MANTA DE FIBRA DE CARBONO

4.1.1 Principais Características Físicas e Mecânicas

Para as ocasiões em que o emprego de métodos convencionais, como reforços estruturais com chapas de aço, os materiais compósitos de fibras de carbono surgiram como alternativa de reforço estrutural por apresentarem elevada resistência à tração, leveza, resistência à corrosão e à fadiga e até amortecimento ao choque, chamando a atenção da indústria da construção civil (SALLABERRY, 2005).

Segundo Meneghetti (2007), os elementos constituintes de um material compósito, apesar de atuarem conjuntamente, mantêm suas propriedades individuais, ou seja, não se dissolvem nem se transformam completamente em outros, e podem ser facilmente identificados.

Construir as fibras envolve alinhar as moléculas do material. A alta resistência à tração está associada à melhoria da atração intermolecular resultante deste alinhamento, sendo as fibras de carbono caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência e grande rigidez (SCHWARTZ, 1984 apud BEBER; 2003 p.23-24).

De acordo com Garcez (2007), as fibras de carbono são elementos químicos que se apresentam como grafite em sua forma mais estável, em temperatura ambiente. Apresentam coloração escura e podem ser manipuladas durante o processo de manufatura para obter resistências ou módulos de elasticidade mais elevados. Para obter maiores módulos de elasticidade devem ser utilizadas temperaturas mais elevadas durante a fabricação, o que reduz a resistência à tração.

Segundo Machado (2002), a produção das fibras de carbono exige exposição das fibras base ao ar, seguida de um processo de carbonização de um filamento orgânico submetidas a altas temperaturas (da ordem de 1000°C a 3000°C),

envolvendo ainda no processo estabilização, carbonização, grafitação e tratamento superficial.

Garcez (2007) afirma que as fibras de carbono são produzidas a partir de três materiais orgânicos: rayon (polímero celulósico), poliacrilonitrila (PAN) e piche (alcatrão de petróleo ou de carvão).

Conforme Machado (2002), o peso específico (densidade) das fibras de carbono varia entre 1,6 e 1,9g/cm³, e ainda que o coeficiente de dilatação térmica longitudinal da fibra varia de $-10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a 0, e o coeficiente de dilatação térmica transversal varia de $22 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

4.1.1.2 Resistência à Tração

Conforme explica Garcez (2007), quando as mantas de fibras de carbono são constituídas por uma grande parcela de fibras e são confeccionadas com matrizes que possuem deformações últimas menores que a das fibras – comum quando ocorre a combinação entre resina epóxi e fibras de alto desempenho – a falha na matriz não é crítica. Quando a resina epóxi falha, as cargas são transferidas para as fibras, que suportarão ao carregamento solicitado até a sua deformação última ser atingida.

A fibra de carbono não apresenta escoamento antes da ruptura, ocorrendo de forma brusca. As fibras de carbono se caracterizam por possuir um elevado módulo de elasticidade compatível com o aço, e uma grande resistência à tração, conforme mostra a Figura 1 que representa um gráfico de resistência à tração versus deformação das fibras.

Machado (2002) também afirma que a resistência máxima à tração das fibras de carbono é obtida a 0° da orientação das fibras, sendo que a 90° da orientação das fibras esta resistência à tração é nula.

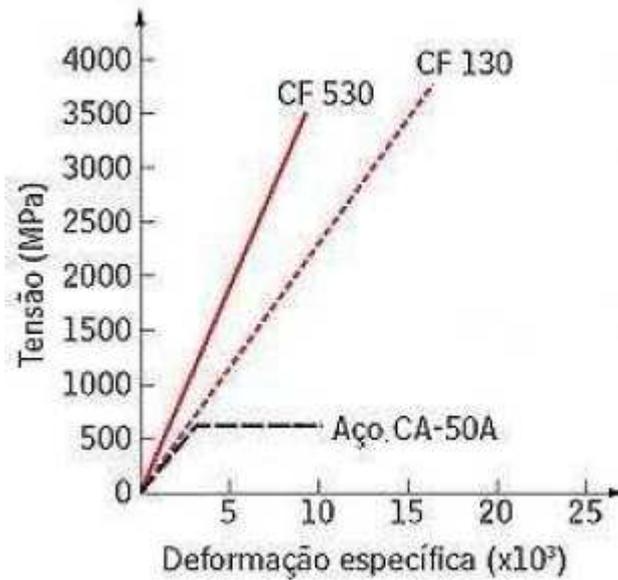


Figura 1 - Diagrama Tensão/Deformação das Fibras do Sistema MBrace™.
 Fonte: Adaptado de Machado (2002, p. 34).

4.1.1.3 Comparativo entre os métodos de reforço estrutural

Como já mostrado nos capítulos anteriores, o tecido de fibra de carbono se mostra mais vantajoso em diversos aspectos, e isto pode ser ilustrado na figura 2, onde o aço e o alumínio apresentam valores inferiores em resistência à fadiga, resistência à tração e rigidez. E apresentam valores superiores ao compósito fibra de carbono nos quesitos peso e coeficiente de dilatação térmica.

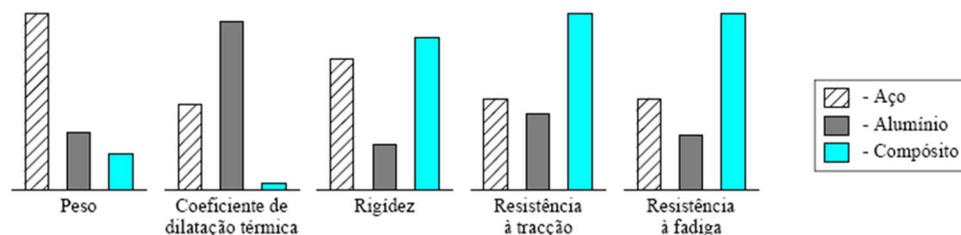


Figura 2: Gráfico comparativo do compósito de fibra de carbono com aço e alumínio.
 Fonte: Adaptado de Machado (2002, p.27).

4.2 MATRIZ EPOXÍDICA

4.2.1 Principais Características Físicas e Mecânicas

De acordo com Santos (2008), a matriz epoxídica assume o papel de transferir as tensões atuantes no elemento estrutural de concreto armado para o reforço estrutural, como as fibras de carbono por meio da interação atrito e adesão ao substrato. E além de servir como ponte de ligação entre o elemento estrutural com o reforço estruturante, a matriz epoxídica envolve todas as fibras de carbono proporcionando resistência mecânica e resistência aos agentes agressivos responsáveis pela deterioração do compósito.

Conforme Machado (2002) expõe, a matriz epoxídica abrange em sua constituição as resinas, tais como imprimadores primários, regularizadores de superfície, os saturantes e ainda os revestimentos protetores.

Na Figura 3 pode ser observado como a matriz epoxídica envolve completamente as fibras de carbono, formando um conglomerado. Ainda na Figura 2, ao lado direito, mostra esquematicamente um sistema composto estruturado com fibras de carbono.

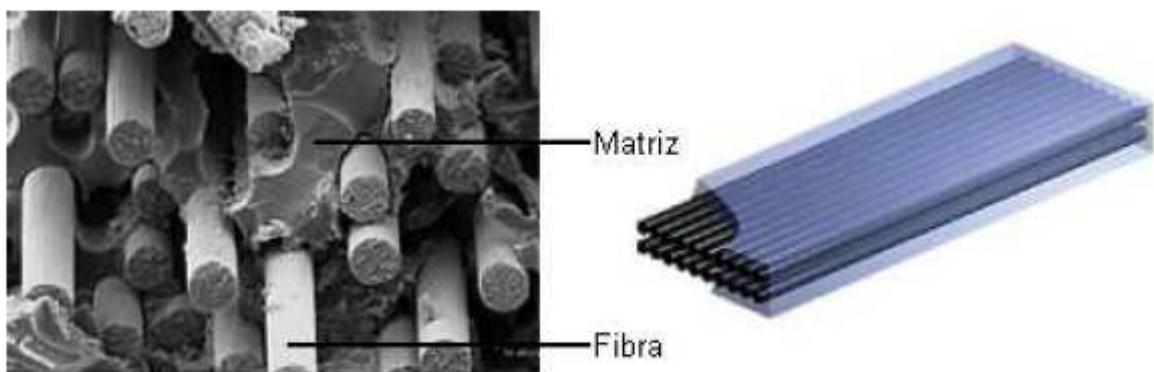


Figura 3-Representação de um sistema composto estrutural de fibra de carbono.
Fonte: Adaptado de MACHADO (2002, p.35-36).

4.2.1.1 Resinas

De acordo com Araújo (2002), a escolha da matriz polimérica influencia diretamente na fabricação e no custo final do compósito de fibras de carbono. As matrizes podem ser feitas de resinas termoplásticas ou resinas termofixos.

Os polímeros termofixos são comumente utilizados em engenharia estrutural devido à sua estabilidade em temperaturas de serviço e à sua boa resistência química. Além disso, estes polímeros assumem deformação lenta e reduzida relaxação, quando comparados com a maioria dos polímeros termoplásticos (2003; apud Garcez 2007, p. 26).

Segundo Machado (2002), qualidades e características básicas necessárias para as resinas são:

- Ter compatibilidade com a superfície a ser reparada e alta resistência de colagem;
- Elevada resistência a altas temperaturas e também águas salgadas;
- Preencher vazios decorrentes do processo;
- Compatibilidade e boa ligação com a fibra de carbono;
- Desenvolvimento de propriedades mecânicas adequadas ao compósito.

4.2.1.2 Imprimadores Primários e Regularizadores de Superfície

Com a finalidade de garantir uma ponte de ligação entre o substrato e a resina de saturação, os imprimadores primários possuem resistência à tração que varia de 13 a 15,8 Mpa e deformação máxima à tração de 10 a 30% (MACHADO, 2002).

Machado (2002) também afirma que os regularizadores de superfície são destinados ao preenchimento de vazios ou para a correção de imperfeições superficiais, com objetivo de gerar uma superfície totalmente desempenada sobre a qual o sistema compósito será colado.

4.2.1.3 Resinas de Saturação

As resinas de saturação assumem o papel de promover a aderência das fibras que compõem o reforço estrutural dos compósitos, a fim de garantir a transferência das tensões de cisalhamento entre elas.

As principais características das resinas de saturação, conforme afirma Machado (2002), são:

- Possui baixos níveis de retração durante o processo de cura da matriz;
- Deformação de ruptura similar com as deformações das armaduras já existentes;
- Capacidade de suprir a aderência às fibras do reforço estruturante;
- Proteger as fibras de carbono contra a deterioração devido a elementos agressivos do meio ambiente e também da abrasão.

4.2.1.4 Revestimentos Protetores

Para que a integridade da superfície colada dos sistemas compósitos seja garantida, faz-se a utilização de revestimentos protetores, sendo usualmente aplicados na face exterior do sistema curado dos compósitos (MACHADO, 2002).

4.3 CONCEPÇÕES DE REFORÇO ESTRUTURAL

De acordo com Cerqueira (2000), a diminuição no consumo de insumos na construção civil e a construção de estruturas mais esbeltas, se não bem projetadas e executadas, podem apresentar grandes deformações e fissuração, o que aumenta a exposição da estrutura a possíveis patologias. Essas patologias, se não corrigidas, podem ocasionar a necessidade de reparar ou reforçar estruturas de concreto armado.

Machado (2002) afirma que a patologia das estruturas tem como função principal apontar explicações técnicas e científicas para o mau comportamento

identificado na estrutura, não importando se esta se manifesta durante a fase de construção ou mesmo no estado de utilização da estrutura. Depois de detectadas essas anomalias, é necessário que seja identificada sua origem e posteriores consequências em relação à segurança da obra, possibilitando a tomada de uma decisão precisa e segura quanto à utilização da estrutura.

O reforço estrutural a ser empregado no reparo em uma peça de concreto armado deve possuir como características: elevada durabilidade, baixa permeabilidade, alta resistência estrutural, ótima aderência ao substrato, baixa retração, fácil aplicação e ainda propriedades similares as do concreto com a finalidade de garantir eficácia no reparo ou reforço (PINTO, 2000).

Os problemas patológicos tendem a evoluir e a se tornarem mais críticos com o passar do tempo. Deste modo, é recomendado que quando detectadas anomalias nas estruturas, se tomem atitudes para sua correção, uma vez que com o passar do tempo o problema tende a piorar. Além de o problema se tornar mais crítico, o custo para reparar a anomalia é incrementado com o passar do tempo (MACHADO 2002). Estas proporções podem ser vistas no gráfico representativo da Lei de Sitter, ilustrado na Figura 4.

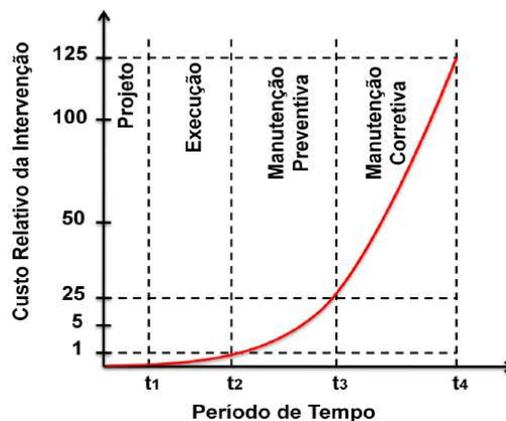


Figura 4 - Gráfico de Sitter.
Fonte: Adaptado de Machado (2002, p.9).

Além disso, de acordo com PINTO (2000), os principais focos de surgimento de patologias nas construções no Brasil são no projeto e na execução das obras. A figura 5 mostra estes dados em diversos países, inclusive no Brasil.

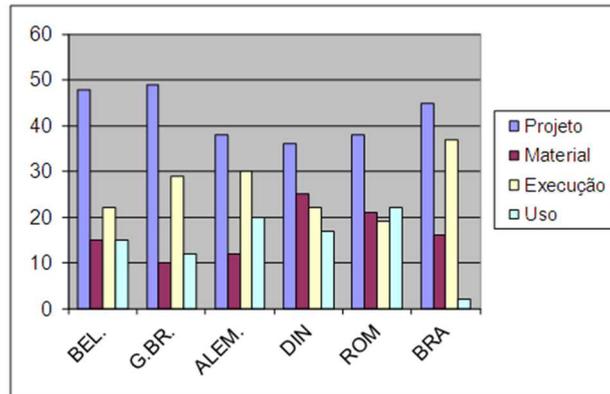


Figura 5: Gráfico de diversos países com os principais focos de surgimento de patologias.
Fonte: Adaptado de PINTO(2000).

4.3.1 Reforço Estrutural com o Compósito de Fibra de Carbono

Como uma alternativa aos reforços estruturantes convencionais (chapas de aço), as fibras de carbono, que em virtude de sua alta resistência à flexão e também de sua ductilidade, garantem elevada eficácia no reparo do elemento estrutural (PINTO, 2000).

Segundo Machado (2002), o uso do compósito de fibra de carbono é uma das técnicas mais atraentes para o reforço em vigas de concreto armado submetidas à flexão. A aplicação do compósito implica na colagem do mesmo na camada externa à viga, em sua face tracionada, atuando como armadura secundária.

O compósito de fibra de carbono praticamente não altera a geometria da peça, que por consequência pouco modifica a carga permanente da estrutura e, devido sua boa flexibilidade, permite a adaptação a diversas formas (VIANA, 2004).

Santos (2008) explica que o sistema CFC (compósito de fibras de carbono) tem como objetivo a fixação das fibras de carbono à superfície do substrato a qual é aderida por meio de uma resina, comumente a base epóxi, que garante a transferência dos esforços entre o elemento de concreto e as fibras de carbono, resultando em um elemento com elevada resistência à flexão e/ou cisalhamento.

O compósito de fibra de carbono permite ainda reforçar elementos que não estão danificados (sem patologias), com o objetivo de aumentar a capacidade de carga do mesmo, a fim de atender solicitações oriundas de novas destinações a qual a edificação está submetida (MACHADO, 2002).

Viana (2004) apresenta que as desvantagens do compósito de fibra de carbono são:

- Difícil visualização de fissuras na interface substrato/reforço, sendo o reforço contínuo;
- Custo elevado;
- Se mal executada a ancoragem do compósito no elemento estrutural, pode acarretar o descolamento dos bordos devido à concentração de tensões;
- Necessidade de proteção contra o fogo e raios ultravioletas;
- Possui coeficiente de dilatação térmica diferente do concreto;

O mesmo autor citado acima ainda afirma que previsto um sistema de ancoragem, é possível combater os efeitos da concentração de tensões nos bordos, sendo limitada a deformação das mantas de fibras de carbono em 6%, evitando assim o descolamento do reforço.

4.3.2 Aplicações dos Sistemas Compósitos de Fibra de Carbono

As principais aplicações para o sistema compósito de fibra de carbono são em reforço de vigas à flexão e ao cisalhamento, reforço de lajes à flexão, reforço de pilares e colunas, reforço em chaminés, reforço de tanques, silos e reservatórios. Além dessas aplicações, o compósito de fibra de carbono também pode ser empregado em muros de arrimo, vigas-parede, reforço em tubulações de grande diâmetro e também reforço de túneis (MACHADO, 2002).

Além das aplicações na engenharia civil, as fibras de carbono possuem inúmeras aplicações na indústria aeroespacial e automotiva, também em barcos, bicicletas e equipamentos esportivos, onde a elevada resistência à tração e o baixo peso, são requisitos fundamentais (GARCEZ, 2007).

4.4 ANCORAGEM DO COMPÓSITO FIBRA DE CARBONO NO SUBSTRATO (VIGA DE CONCRETO ARMADO)

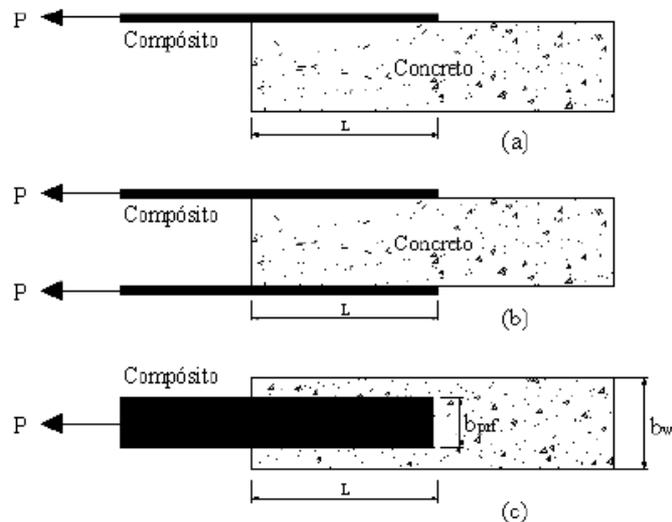
Machado (2002) afirma que o descolamento do compósito de fibra de carbono pode ocorrer devido a imperfeições da área de fixação do reforço. Deste modo, o concreto não consegue transmitir as tensões na interface substrato/compósito.

Para o dimensionamento do compósito de fibra de carbono no substrato é necessário fazer um reforço ao cisalhamento e também ancoragens nas extremidades do reforço a partir da análise das tensões de cisalhamento atuantes, estando relacionadas a um incremento no nível de carregamento do elemento (GARCEZ, 2007).

O funcionamento perfeito do compósito deve ser garantido através de ancoragens mecânicas dimensionadas para aumentar a eficiência na transferência de tensões (MACHADO, 2002).

Pinto (2000) ressalta que a redução do comprimento de aderência faz com que as tensões de tração na fibra de carbono diminuam mais rapidamente ao longo desse comprimento, sem conduzir a maiores valores de deformação. Se o comprimento de ancoragem não for o suficiente para suprir as tensões de bordo atuantes para as fibras de carbono, estas por sua vez não desempenharão o máximo de sua resistência, ocasionando descolamento no elemento devido à falta de ancoragem.

Para um melhor entendimento da relação entre ancoragem e substrato, Meneguetti (2007) explica que a aderência entre a camada de concreto com o compósito funciona com uma junta submetida a uma força de tração. A Figura 6 representa um esquema dos mecanismos de avaliação de resistência de aderência exemplificando o comportamento de ancoragem do compósito de fibra de carbono no substrato.



**Figura 6-Exemplo de ensaio de cisalhamento, onde (a) é cisalhamento simples; (b) cisalhamento duplo; (c) vista superior.
Fonte: Adaptado de Meneguetti (2007, p.76).**

4.5 ESCOLHA DOS SISTEMAS COMPÓSITOS ESTRUTURADOS COM FIBRAS DE CARBONO

As condições ambientais afetam as fibras e as resinas dos diversos sistemas compósitos estruturados com fibras de carbono. Desta maneira, deve-se levar em conta se no ambiente a ser aplicado o compósito de fibra de carbono estará exposto à alcalinidade, a água salgada, agentes químicos, luz ultravioleta, altas temperaturas, elevada umidade e ciclos de congelamento e descongelamento (MACHADO, 2002).

A respeito da alcalinidade deve ser tratada com cuidado, uma vez que o desempenho do sistema compósito estruturante depende fundamentalmente da matriz epoxídica.

Logo, a durabilidade do compósito não está atrelada somente a forma com que fora aplicada ou dimensionada, mas também da correta interpretação do ambiente em que o sistema estará exposto. Machado (2002) afirma que ainda não existem pesquisas que garantam o tempo de vida útil do compósito, sendo que o engenheiro projetista deve escolher um sistema para ser utilizado que disponha de testes de durabilidade consistentes relativamente ao ambiente na qual a estrutura a ser reforçada irá trabalhar.

5 METODOLOGIA

5.1 MATERIAIS

Neste projeto foram ensaiadas em laboratório vigas de concreto armado submetidas à um carregamento estático e pontual. Foram testadas vinte e quatro vigas de concreto armado com dimensões de 10x10x40 (largura x altura x comprimento – dimensões em centímetros), divididas em quatro grupos: seis vigas com armadura de 4,2mm sem reforço de fibra de carbono (grupo 1), outras seis vigas com armadura de 4,2mm com reforço de fibra de carbono (grupo 2). O grupo 3 é composto por seis vigas com armadura de 8,0mm sem reforço de fibra de carbono, e o grupo 4 é composto por seis vigas de concreto armado com armadura de 8,0mm reforçadas com fibra de carbono. Os ensaios mecânicos foram realizados através da prensa DL 30000.

A certificação da resistência característica do concreto (f_{ck}) foi através de seis corpos de prova cilíndricos, com dimensões de aproximadamente 100mm de diâmetro e 200mm de altura, que foram rompidos com idade de 28 dias.

Para a confecção das vigas de concreto armado e os corpos de prova foram necessários os seguintes materiais:

- Formas de madeira/metálica;
- Aço CA-50 (diâmetros de 4,2mm e 8,0mm);
- Arame;
- Agregado graúdo (brita 1);
- Agregado miúdo (areia);
- Aglomerante (cimento);
- Balança para dosagem dos agregados e do aglomerante;
- Betoneira de eixo inclinado;
- Mesa vibratória para o adensamento do concreto;
- Desmoldante.

Para a aplicação da manta de fibra de carbono foram necessários os materiais listados abaixo:

- Lixador mecânico para a limpeza da superfície receptora do reforço estrutural;
- Resina Epóxy AR 260 (fornecida por uma empresa situada no estado do Rio de Janeiro);
- Endurecedor (fornecido pela mesma empresa);
- Balança para dosagem da resina epóxy e do endurecedor;
- Recipiente para a mistura da resina epóxy com o endurecedor;
- Pincel para a aplicação da matriz epoxídica;
- Manta de fibra de carbono (fornecida pela mesma empresa);
- Rolo para fixação do produto.

5.2 MÉTODOS

A metodologia foi dividida em etapas que foram realizadas durante a execução do estudo, estas etapas estão destacadas na Figura 7 que segue abaixo.

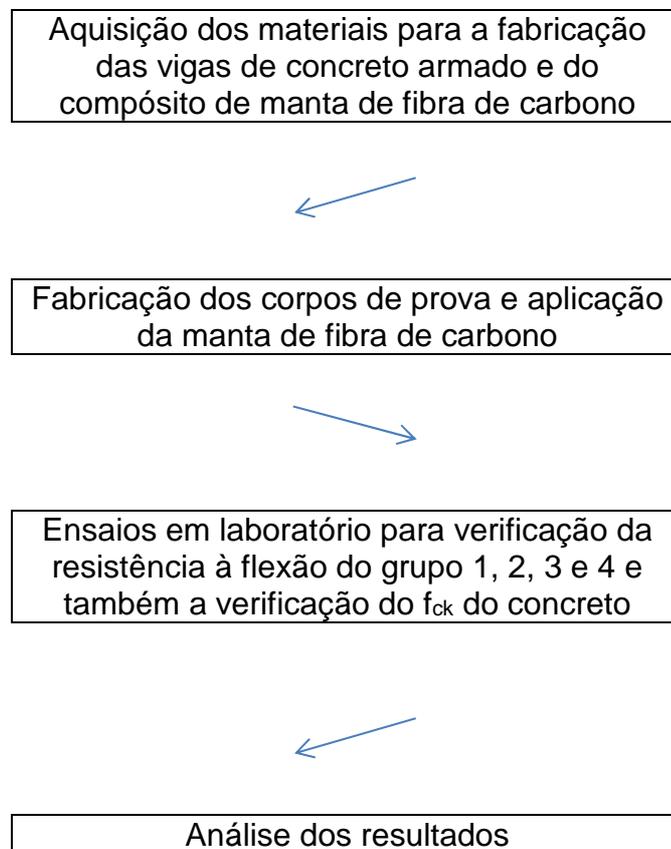


Figura 7 – Fluxograma Metodológico.

5.2.1 Elaboração dos corpos de prova

Foram feitos 12 corpos de prova com duas barras de aço CA-50 de diâmetro 8,0mm, e também 12 corpos de prova com duas barras de aço CA -50 de diâmetro 4,2mm. Para o preparo do arranjo das armaduras, foi necessário cortar as barras de aço dos respectivos diâmetros citados acima, que para isso foram submetidas a uma máquina de corte de ferros. Nas figuras 8 e 9 pode-se observar o momento em que as armaduras estavam sendo amarradas e as mesmas prontas para a concretagem.



Figura 8: Armação das armaduras dos corpos de prova.



Figura 9: Armadura pronta para ser concretada.

Ambas as armaduras de 4,2mm e 8,0mm de diâmetro de aço, foram feitas com traço em massa de concreto de 1:2,5:2,5 (cimento:agregado miúdo:agregado graúdo) e com relação água/cimento = 0,60. Para que a dosagem do concreto fosse feita corretamente, foi utilizada uma balança, como pode ser observada na figura 10.



Figura 10: Balança utilizada para a pesagem dos materiais na concretagem dos corpos de prova.

Para a mistura do concreto, foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado, como pode ser observada na figura 11.



Figura 11: Betoneira de eixo inclinado utilizada para a mistura do concreto.

Após o concreto estar pronto, as formas das vigas com suas respectivas armaduras foram posicionadas em uma mesa vibratória, onde o concreto pode ser adensado, evitando vazios nos corpos de prova, como mostra a figura 12. Após a concretagem, no dia seguinte foram desformados os corpos de prova, os quais foram armazenados por 7 dias em uma câmara úmida.



Figura 12: Formas com as armaduras dispostas em cima da mesa vibratória, na eminência de serem concretadas.

5.2.2 Aplicação do tecido de fibra de carbono nos corpos de prova

Passados os 7 dias em câmara úmida, os corpos de prova foram levados até o Laboratório, armazenadas em local seco e arejado. Os corpos de prova permaneceram neste local por mais 7 dias, com o objetivo da secagem do concreto.

Para a aplicação do compósito de fibra de carbono, foi necessário antes checar se a superfície dos corpos de prova se encontrava seca. Após esta certificação, para retirar algumas irregularidades da face das vigas onde seria aplicado o tecido de fibra de carbono, foi feito um lixamento com o auxílio de um lixador mecânico, como mostra a figura 13, e posteriormente foram limpas, retirando todo o pó gerado.

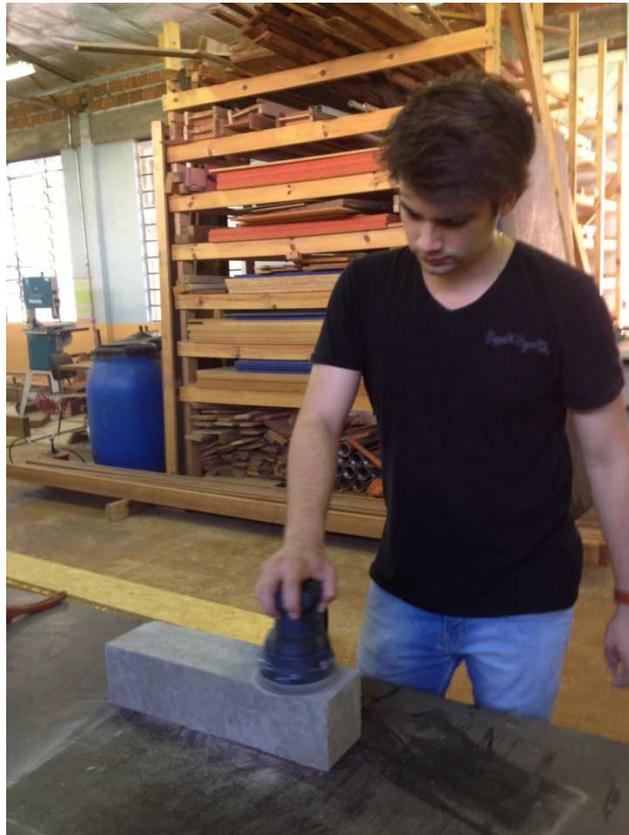


Figura 13: Regularização da superfície dos corpos de prova com o auxílio de um lixador mecânico.

Após a limpeza dos corpos de prova, foi então preparada a mistura de resina epóxy (AR260) com o endurecedor. De acordo com dados fornecidos pelo fabricante, para que a mistura ocorresse da melhor maneira possível, foi necessário dosar 3 partes de resina epóxy (AR 260) para uma parte de endurecedor. Para isso,

foi utilizado uma balança para a dosagem da resina epóxy e do endurecedor. Após a pesagem, foi misturado o endurecedor com a resina epóxy, sendo que esta mistura, de acordo com dados fornecidos pelo fabricante, estava pronta para uso quando a mesma começasse a emitir bolhas. A dosagem da resina epóxy e do endurecedor e também a mistura de ambos podem ser observadas nas figuras 14 e 15, respectivamente.



Figura 14: Dosagem da resina epóxy e do endurecedor.



Figura 15: Mistura da resina epóxy AR 260 com o endurecedor.

Com a mistura da resina epóxy com o endurecedor em ponto de aplicação, os corpos de prova foram dispostos em cima de uma mesa de apoio, para que assim fosse aplicada a primeira camada da matriz epoxídica, a fim de melhor impregnar a manta de fibra de carbono.

Antes que fosse dado o início da aplicação da matriz epoxídica, foram colocadas luvas, por recomendação do fabricante, para que se evitassem possíveis agressões nas mãos. Assim, foi realizada a primeira camada da matriz epoxídica nos corpos de prova, que pode ser observada na figura 16, listada abaixo.



Figura 16: Aplicação da primeira camada de matriz epoxídica nos corpos de prova.

Posteriormente, foi recortado, no tamanho específico de cada corpo de prova, o tecido de fibra de carbono. Logo após, com o auxílio de um rolo, foi aplicado a manta de fibra de carbono em cada corpo de prova. Após a aplicação da fibra de carbono, foi novamente aplicado mais uma camada de matriz epoxídica. Na figura 17 pode ser observado um corpo de prova recebendo a aplicação da fibra de carbono com o auxílio de rolo.



Figura 17: Aplicação do tecido de fibra de carbono nos corpos de prova com o auxílio de um rolo.

5.2.3 Ensaio para a determinação da força máxima de ruptura dos corpos de prova sem/com manta de fibra de carbono

Para o início do ensaio de resistência de tração na flexão, o fabricante recomendou um tempo de cura de 48 horas. Assim, de acordo com a NBR 12142 (1991), para o ensaio de resistência de tração na flexão os corpos de prova deverão receber uma carga estática e pontual, sendo esta aplicação a um terço do vão de cada lado do corpo de prova, onde os apoios estejam posicionados a 25mm de cada face do vão da viga. Estes ensaios mecânicos foram realizados através da prensa DL 30000, como mostra a figura 18.



Figura 18 - Prensa DL 30000.

Na figura 19, pode ser observado um corpo de prova com armadura de 4,2mm sem a aplicação da fibra de carbono. É notório que a ruptura ocorreu por flexão.

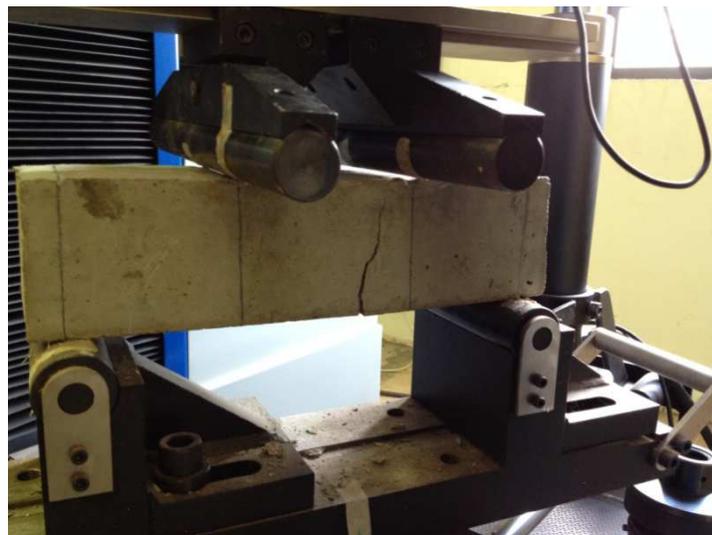


Figura 19: Corpo de prova com armadura de diâmetro de 4,2mm rompido pela máquina de testes DL 30000.

Já na figura 20, pode ser observado que o corpo de prova com armadura de diâmetro de 4,2mm reforçado com o compósito de fibra de carbono acabou rompendo por cisalhamento, pois o acréscimo de resistência fornecido pela manta de fibra de carbono acarretou em uma resistência à flexão superior a resistência ao cisalhamento, ocorrendo assim uma ruptura inesperada.



Figura 20: Ruptura por cisalhamento do corpo de prova com armadura de diâmetro de 4,2mm reforçado com manta de fibra de carbono.

A ruptura dos corpos de prova com armadura de diâmetro de 8,0mm sem/com o reforço da manta de fibra de carbono foram por cisalhamento, como mostra as figuras 21 e 22.



Figura 21: Ruptura por cisalhamento do corpo de prova com armadura de diâmetro de 8,0mm sem a manta de fibra de carbono.



Figura 22: Ruptura por cisalhamento do corpo de prova com armadura de diâmetro de 8,0mm reforçado com manta de fibra de carbono.

Foram fabricados 6 corpos de prova com o mesmo concreto que foi aplicado nas vigas, sendo estes rompidos após 28 dias de cura, conforme diz a NBR 5739 (2007) para a certificação do f_{ck} . Para isso, foi utilizada a prensa indicada na Figura 23.

Após serem concluídas as etapas de testes em laboratórios, os dados coletados de cada grupo foram comparados entre si, com finalidade de mensurar os ganhos de resistência à flexão nos corpos de prova onde foram aplicadas a manta de fibra de carbono, que estarão explícitos no próximo capítulo.



Figura 23 - Prensa para ensaios de corpos de prova para verificação do f_{ck} do concreto.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 CÁLCULO DO f_{ck} DO CONCRETO

De acordo com Andolfato (2002) apud NBR 5739 (2007), o valor f_{cm} é a média aritmética dos valores de f_c para o conjunto de corpos de prova ensaiados, e é utilizado na determinação da resistência característica, f_{ck} , por meio da fórmula:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645s$$

O desvio padrão s é calculado fazendo-se o somatório das diferenças de cada valor encontrado no ensaio pela média, elevando este valor ao quadrado, em seguida dividindo-o pelo número de ensaios menos um e por fim extraindo a raiz quadrada, como mostra a equação abaixo (Andolfato, 2002 apud NBR 5739, 2007).

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_{cc_i} - f_{cm})^2}{n - 1}}$$

Onde:

f_{cc_i} é o valor de cada resultado obtido no ensaio;

n é o número de amostras do exemplar.

Assim, o valor do f_{cm} é 33,48. Logo, utilizando os dados disponibilizados pela tabela 1, o valor de s é de 4,175. Portanto, tem-se que o valor do f_{ck} obtido pelo ensaio é de 26,61 Mpa.

CORPO DE PROVA CILÍNDRICO			
CP	Diâmetro(mm)	Altura(mm)	f_c (MPA)
1	101,00	201,00	32,30
2	100,00	200,00	34,66
3	100,00	200,00	38,86
4	99,00	199,00	33,72
5	101,00	200,00	26,09
6	100,00	200,00	32,61

Tabela 1: Valores de f_c obtidos pelos 6 corpos de prova fabricados.

6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NA RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM AÇO DE DIÂMETRO 4,2mmSEM/COM REFORÇO DE MANTA DE FIBRA DE CARBONO

Como a tensão de ruptura é diretamente proporcional a força de ruptura, a análise dos resultados obtidos foi feita somente em função da força de ruptura de cada elemento analisado.

Nos corpos de prova com aço de 4,2mm sem o reforço de manta de fibra de carbono, foram obtidas as forças máximas de ruptura de cada elemento, expressa em Newtons, com suas respectivas dimensões, ilustrados pela tabela 2.

Vigas com aço com diâmetro de 4,2mm sem o reforço da manta de fibra de carbono			
VIGA	Largura(mm)	Altura(mm)	Força de Ruptura(N)
1	100,00	103,00	28.674,88
2	102,00	101,00	28.484,93
3	103,00	104,00	30.641,55
4	101,00	103,00	29.696,78
5	100,00	105,00	28.385,14
6	101,00	104,00	32.132,56

Tabela 2: Resultados de força máxima de ruptura obtidos nos corpos de prova com aço de diâmetro de 4,2mm sem o reforço estrutural da manta de fibra de carbono.

Pode ser observado que o valor máximo obtido pela força de ruptura foi de 32.132,56 N, enquanto o menor valor obtido foi de 28.385,14 N. O valor médio obtido pelo ensaio foi de 29.669,31 N.

Na tabela 3 pode ser observado o acréscimo de resistência gerado pela manta de fibra de carbono, onde se atingiu com o máximo valor de ruptura de 75.701,34 N, e o menor valor obtido foi de 58.484,95 N. O valor médio de ruptura destes corpos de prova é de 66.779,79 N.

Vigas com aço de diâmetro de 4,2mm reforçada com manta de fibra de carbono			
VIGA	Largura(mm)	Altura(mm)	Força de Ruptura(N)
7	101,00	103,00	67.299,22
8	100,00	102,00	75.701,34
9	102,00	100,00	64.223,37
10	101,00	101,00	69.879,77
11	100,00	103,00	58.484,95
12	100,00	106,00	65.090,14

Tabela 3: Valores obtidos no ensaio laboratorial da força de ruptura máxima nos corpos reforçados com manta de fibra de carbono.

Com esta análise, é possível observar que houve um ganho de resistência de 125,08%. Logo, a manta de fibra de carbono mostrou-se eficiente, podendo assim até mais que dobrar, em alguns casos, a capacidade de resistência do elemento estrutural.

Como houve ruptura por cisalhamento nos corpos de prova reforçados com a manta de fibra de carbono e nos corpos de prova sem o reforço de fibra de carbono houve ruptura por flexão pura, as vigas de concreto armado deveriam ter maior comprimento para que isso não ocorresse. Porém, a prensa DL 30000 tem um fator limitante a respeito da distância máxima entre os apoios, inviabilizando a fabricação de corpos de prova maiores, uma vez que a NBR 12142 (1991) sugere que os apoios deve estar espaçados a 25mm da face da viga.

6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NA RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA COM AÇO DE DIÂMETRO 8,0mm SEM/COM REFORÇO DE MANTA DE FIBRA DE CARBONO

Nos corpos de prova com aço de 8,0mm sem o reforço de manta de fibra de carbono, foram obtidos as forças máximas de ruptura de cada elemento, expressa em Newtons, com suas respectivas dimensões, ilustrados pela tabela 4.

Pode ser observado que o valor máximo obtido pela ruptura das vigas de concreto armado com diâmetro de 8,0mm sem o reforço da manta de fibra de carbono foi de 50.356,23 N, e o menor valor obtido foi de 31.585,36N. O valor médio obtido foi de 41.519,63 N.

Vigas com aço de diâmetro de 8,0mm sem o reforço da manta de fibra de carbono			
VIGA	Largura(mm)	Altura(mm)	Força de Ruptura(N)
1	101,00	103,00	50.356,23
2	102,00	106,00	35.683,40
3	101,00	98,00	31.585,36
4	101,00	103,00	40.875,87
5	101,00	104,00	47.708,11
6	101,00	104,00	42.908,79

Tabela 4: Resultados obtidos pela ruptura dos corpos de prova com aço de diâmetro de 8,0mm sem o reforço da manta de fibra de carbono.

O tipo de ruptura ocorrida no ensaio com os corpos de prova com aço de diâmetro de 8,0mm, sem/com reforço de manta de fibra de carbono, foi por cisalhamento. O fator limitante foi também pelo espaçamento máximo dos apoios fornecidos pela prensa DL 30000, impondo um comprimento de viga inferior ao necessário para que ocorresse ruptura por flexão pura, proposta inicial dada pelo projeto.

Na tabela 5 pode ser observado o acréscimo de resistência gerado pela manta de fibra de carbono, onde se atingiu o máximo valor de ruptura de 78.767,13 N, e o de menor valor é 65.999,23 N. O valor médio obtido é de 71.346,05 N.

Vigas com aço de diâmetro de 8,0mm com o reforço da manta de fibra de carbono			
VIGA	Largura(mm)	Altura(mm)	Força de Ruptura(N)
7	101,00	104,00	73.782,05
8	99,00	102,00	72.326,65
9	100,00	106,00	69.436,47
10	101,00	101,00	65.999,23
11	101,00	101,00	78.767,13
12	104,00	102,00	67.764,79

Tabela 5: Resultado do ensaio de ruptura dos corpos de prova com aço de 8,0mm reforçados com manta de fibra de carbono.

Assim, com estes resultados é possível analisar que houve um acréscimo de resistência de 71,84% nos elementos estruturais, uma vez que como os elementos armados com barras de 8,0mm de diâmetro somente houve ruptura por

cisalhamento, pode-se ter assim uma análise comparativa. Mesmo o reforço estrutural de manta de fibra de carbono ter sido aplicado com finalidade para aumento da resistência à flexão, houve um grande acréscimo na força de ruptura máxima na cortante.

6.4 ANÁLISE DA ADERÊNCIA DO TECIDO DE FIBRA DE CARBONO APLICADO NOS CORPOS DE PROVA COM AÇO DE DIÂMETRO 4,2mm e 8,0mm

Como não havia disponibilidade de equipamento específico para teste de aderência da aplicação da manta de fibra de carbono nos corpos de prova na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Campo Mourão foi somente feito um teste de sonoridade. Este teste foi realizado com o auxílio de uma haste de madeira, que em contato com a superfície reforçada com fibra de carbono, não poderia apresentar sonoridade com aspecto “oco”. Assim, foi observado que não houve falha no quesito de aplicação do produto estruturante, uma vez que todas as vigas apresentaram ótima compactação do tecido de fibra de carbono.

Além do teste de sonoridade, pode ser observado na figura 24 um dos corpos de prova rompidos em laboratório. É notório que a ruptura ocorreu de forma correta, sem haver descolamento da fibra de carbono no substrato.



Figura 24: Viga de concreto armado com o reforço de fibra de carbono rompida sem haver deslizamento do reforço estrutural.

6.5 ANÁLISES DA INFLUÊNCIA DA TAXA DE ARMADURA

O ensaio realizado nos corpos de prova foram de acordo com o que indica a NBR 12142 (1991), onde é a carga aplicada N é dividida em dois pontos, estando localizados a um terço do vão em cada lado da viga. Os apoios estavam distanciados a 25 mm de cada face. O esquema de carregamento do ensaio pode ser observado na figura 25.

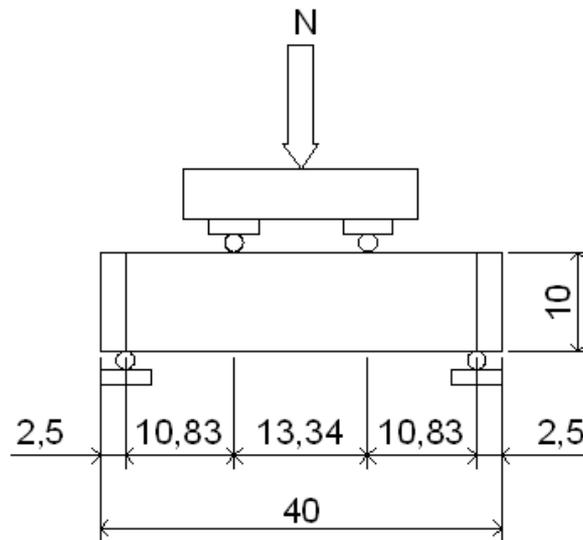


Figura 25: Esquema de carregamento das vigas ensaiadas (dimensões em centímetros).

Os valores médios obtidos através do ensaio de flexão pura podem ser observados nas tabelas 6 e 7, evidenciando o acréscimo de força em valores e também em percentual.

Valor médio de N (força de ruptura da viga)	
Vigas com 2Ø4,2 sem fibra	29.669,31
Vigas com 2Ø4,2 com fibra	66.779,80
Aumento da força de ruptura	37.110,49
Em porcentagem	125,08%

Tabela 6: Valores obtidos pelo ensaio de ruptura em corpos de prova com armadura de diâmetro de 4,2mm.

Valor médio de N (força de ruptura da viga)
--

Vigas com 2Ø8,0 sem fibra	41.519,63
Vigas com 2Ø8,0 com fibra	71.346,05
Aumento da força de ruptura	29.826,43
Em percentagem	71,84%

Tabela 7: Valores obtidos pelo ensaio de ruptura em corpos de prova com armadura de diâmetro de 8,0mm.

É notório que, quando a taxa de armadura por flexão aumenta, o acréscimo da força de ruptura diminui.

7. CONCLUSÕES

A aplicação de tecidos de fibra de carbono apresenta-se com uma alternativa viável como alternativa aos métodos convencionais. Por apresentar fácil manuseio, baixo peso específico e pequena espessura das lâminas de fibra de carbono sua aplicação é prática, rápida e também eficiente em termos estruturais.

Na análise dos resultados obtidos, pode-se observar que nos corpos de prova fabricados com armadura de diâmetro de 4,2mm houve, sem o reforço do tecido de fibra de carbono, ruptura por flexão. Já, nos elementos com esta mesma armadura, porem com o reforço da manta de fibra de carbono, houve ruptura por cisalhamento. Neste caso, o ocorrido deve-se ao acréscimo de resistência de 125,08% gerado pela fibra de carbono, transpassando os limites máximos de resistência à flexão e ocasionando uma ruptura por cisalhamento.

Já nos corpos de prova com armadura de diâmetro de 8,0mm houve tanto nas vigas de concreto armado sem o reforço estrutural de fibra de carbono quanto nos corpos de prova com o reforço de tecido de fibra de carbono ruptura por cisalhamento. Isso ocorreu pelo fator limitante da prensa hidráulica disponibilizada para os testes, uma vez esta não aceitaria dimensões maiores de vão dos elementos testados. Porém, mesmo os corpos de prova estando reforçados com fibra de carbono com finalidade à flexão, houve um acréscimo de resistência de 71,84%.

Além disso, foi constatado que, quando a taxa de armadura por flexão aumenta, o acréscimo da força de ruptura diminui.

Outro ponto positivo deste projeto foi a aderência da fibra de carbono no substrato. Mesmo não havendo maquinário específico de testes para aderência à disposição, testes manuais foram realizados com sucesso e também na ruptura dos corpos de prova submetidos aos testes especificados para flexão pura, não houve em nenhum dos elementos escorregamento do tecido de fibra de carbono, mostrando boa eficiência da matriz epoxídica.

Entretanto, para que este reforço seja dimensionado de forma econômica e segura, evitando-se tipos de rupturas não desejáveis, há ainda alguns aspectos que precisam ser melhor esclarecidos, como quantidade necessária de resina epóxy para a impregnação da fibra de carbono.

Em estudos futuros, dentre outros assuntos, poder-se-ia investigar maneiras diferentes de aplicar a manta de fibra de carbono, podendo variar o número de

camadas do tecido de fibra de carbono. E ainda, representar o elemento estrutural em maiores dimensões e com armaduras para cisalhamento (estribos), com a finalidade de que não ocorram rupturas inesperadas e que o elemento rompa por flexão pura, representando assim um modelo mais real empregado na prática.

REFERÊNCIAS

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. **Controle Tecnológico Básico do Concreto**. 2002. 30p. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, SP, 2002. Disponível em <<http://www.nepae.feis.unesp.br/Apostilas/Controle%20tecnologico%20basico%20do%20concreto.pdf>>. Acesso em 20 de janeiro de 2014.

ARAÚJO, Caroline Maia. **Reforço de Vigas de Concreto à Flexão e ao Cisalhamento com Tecidos de Fibra de Carbono**. 2002. 140p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2002. Disponível em <<http://www.coc.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/102-2002/1800-caroline-maia-araujo#download>>. Acesso em 10 de agosto de 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpo-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<https://www.gedweb.com.br/utfpr/>>. Acesso em: 10 de julho de 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<https://www.gedweb.com.br/utfpr/>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência ‘a tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991. Disponível em: <<https://www.gedweb.com.br/utfpr/>>. Acesso em: 20 de julho de 2013.

BEBER, Andriei José. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. 317 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2003. Disponível em <<http://www.cpgec.ufrgs.br>>. Acesso em 15 de junho de 2013.

CERQUEIRA, Eliete Conceição. **Reforço ao Cisalhamento de Vigas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. 2000. 107p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2000. Disponível em <<http://www.coc.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/100-2000/1736-eliete-conceicao-cerqueira>>. Acesso em 10 de agosto de 2013.

GARCEZ, Mônica Regina. **Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras**. 2007. 241p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2007. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10183/10593>>. Acesso em 20 de julho de 2013.

MACHADO, Ari de Paula; **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono / Ari de Paula Machado**. São Paulo: Editora Pini Ltda., 2002. 282 p.

MENEGHETTI, Leila Cristina. **Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida**. 2007. 275p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2007. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10183/12145>>. Acesso em 15 de agosto de 2013.

PINTO, Cristina Travessa Martins Pereira. **Reforço à Flexão de Vigas de Concreto com Fibras de Carbono**. 2000. 142p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2000. Disponível em <<http://www.coc.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/100-2000/1733-cristina-travessa-martins-pereira-pinto#download>>. Acesso em 10 de agosto de 2013.

SALLABERRY, Roberta Dutra. **Limite de Deformação das Fibras de Carbono usadas no Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado**. 2005. 144p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2005. Disponível em <http://coc.ufrj.br/teses/mestrado/estruturas/2005/Teses/SALLABERRY_R_D_05_t_M_est.pdf>. Acesso em 15 de agosto de 2013.

SANTOS, Paulo Mascarenhas dos. **Comparação de Reforço com Chapas de Aço e Fibras de Carbono em Vigas de Concreto Armado Submetidas à Flexão Simples**. 2008. 61p. Tese (Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Feira de Santana. Bahia, BA, 2008. Disponível em <<http://civil.uefs.br/DOCUMENTOS/PAULO%20MASCARENHAS%20DOS%20SANTOS.pdf>>. Acesso em 20 de julho de 2013.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz - **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1998. 255 p.

VIANA, Roberta David de Aquino. **Programa para Dimensionamento de Reforço à Flexão e ao Cisalhamento de Vigas de Concreto Armado**. 2004. 115p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2004. Disponível em <<http://www.coc.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/104-2004/1939-roberta-david-de-aquino-viana#download>>. Acesso em 10 de agosto de 2013.