

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL**

**GUSTAVO MANSUR SOARES SANTOS  
HUGO LEONARDO SLEDER ROSS  
LEONARDO HABITZREUTER**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO REFORÇO ESTRUTURAL COM FIBRA  
DE CARBONO EM PILARES CURTOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2013**

**GUSTAVO MANSUR SOARES SANTOS**  
**HUGO LEONARDO SLEDER ROSS**  
**LEONARDO HABITZREUTER**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO REFORÇO ESTRUTURAL COM FIBRA  
DE CARBONO EM PILARES CURTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia de Produção Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

**CURITIBA**

**2013**



Sede Ecoville

Ministério da Educação

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA  
FEDERAL DO PARANÁ  
*Campus Curitiba - Sede Ecoville*  
**Departamento acadêmico de Construção  
Civil**

Curso de Engenharia de Produção Civil

---

## **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO REFORÇO ESTRUTURAL COM FIBRA DE CARBONO EM PILARES CURTOS**

Por

**GUSTAVO MANSUR SOARES SANTOS  
HUGO LEONARDO SLEDER ROSS  
LEONARDO HABITZREUTER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 14 de maio de 2013, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador - Wellington Mazer, Dr.  
UTFPR

---

Prof. Amacin Rodrigues, MSc.  
UTFPR

---

Prof<sup>a</sup> Elisabeth Penner, Dra.  
UTFPR

---

UTFPR - Deputado Heitor de Alencar Furtado, 490 - 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) 3373-0623

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

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a todos que nos apoiaram na realização desta pesquisa, às famílias e aos colegas que sempre nos incentivaram.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Wellington Mazer, pelo suporte durante todo o trabalho.

Ao engenheiro Márcio Arruda, da empresa Techniques, pelos materiais cedidos para a realização dos ensaios.

À Prof. Dr. Elisabeth Penner pelas dicas e pelo auxílio para conseguirmos romper nossos corpos de prova.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

HABITZREUTER, Leonardo; ROSS, Hugo L. S.; SANTOS, Gustavo M. S. **Análise da eficiência do reforço estrutural com fibra de carbono em pilares curtos.** 2013. 62. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia de Produção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

O concreto armado é o material com maior utilização nas construções existentes e considerando sua vida útil média de 50 anos, eventualmente as estruturas precisarão ser reforçadas ou reparadas. Outro caso em que é necessária a aplicação de um reforço estrutural é quando a utilização da edificação é modificada da original. Além dos métodos convencionais, amplamente utilizados, de reforço estrutural como a utilização de chapas metálicas e o aumento da seção das estruturas com concreto armado, constantemente são desenvolvidos novos materiais, como a fibra de carbono. No entanto, devido à falta de conhecimento dos profissionais da área e à falta de estudos da eficiência desses reforços, sua utilização ainda é limitada. Esta pesquisa teve como finalidade a análise do reforço estrutural com fibra de carbono, especificamente em pilares curtos, através do ensaio de modelos com aplicação de carga axial centrada até a ruptura. Foram ensaiados pilares sem reforço, com uma e com duas camadas de fibra de carbono. Ao final foi observado que a aplicação do reforço aumentou a resistência à compressão.

**Palavras-chave:** Reforço Estrutural. Fibra de Carbono. Pilares Curtos.

## ABSTRACT

HABITZREUTER, Leonardo; ROSS, Hugo L.S. ; SANTOS, Gustavo M. S. **Efficiency analysis of the structural reinforcement with carbon fiber in short columns.** 2013. 62. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia de Produção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Concrete is the most usual material in constructions and considering its average lifespan of 50 years, eventually the structures will need to be strengthened or repaired. Another case in which it is necessary to apply a structural reinforcement is when the use of the construction is changed from the original. Besides the conventional methods, widely used, for structural reinforcement such as metal plates and increased section of reinforced concrete structures, constantly new materials are developed such as carbon fiber. However due to lack of knowledge of professionals in this area and lack of studies of the effectiveness of these reinforcements, their use is still limited. This study aimed to analyze the structural strength of the carbon fiber, specifically in short columns, by testing models focused on the application of axial load until rupture. Were tested columns without reinforcement, with one and two carbon fiber layers. At the end it was observed that the application of reinforcement increased compressive strength.

**Keywords:** Structural Reinforcement. Carbon Fiber. Short Columns.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Dimensões dos pilares.....  | 17 |
| Figura 2 - Diagramas tensão normal x deformação específica do concreto confinado com aço e FRP's ..... | 22 |
| Figura 3 - Seções transversais ensaiadas .....   | 25 |
| Figura 4 – Diagrama tensão normal x deformação específica .....  | 30 |
| Figura 5 - Detalhe de Aplicação .....  | 34 |
| Figura 6 - Execução das formas.....  | 36 |
| Figura 7 - Concretagem dos pilares .....   | 37 |
| Figura 8 - Pilares regularizados com argamassa polimérica.....   | 37 |
| Figura 9 - Resina Epóxi.....   | 38 |
| Figura 10 - Aplicação de resina epóxi .....  | 39 |
| Figura 11 - Aplicação da primeira camada de fibra de carbono .....                                     | 40 |
| Figura 12 - Aplicação da segunda camada de fibra de carbono .....                                      | 40 |
| Figura 13 - Pilar com duas camadas de fibra de carbono .....   | 41 |
| Figura 14 - Prensa utilizada nos ensaios de ruptura .....  | 43 |
| Figura 15 - Pilar rompido na emenda do reforço .....   | 46 |
| <br>   |    |
| Gráfico 1 - Resistência à Compressão Axial Centrada (MPa).....   | 44 |
| Gráfico 2 - Resistência à Compressão Axial Centrada Média (MPa).....                                   | 46 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Traço unitário do concreto em massa .....              | 36 |
| Tabela 2 - Dimensões dos pilares .....                            | 42 |
| Tabela 3 - Cargas obtidas (kN) .....                              | 43 |
| Tabela 4 - Resistência à Compressão (MPa).....                    | 44 |
| Tabela 5 - Resistência à compressão axial média (MPa) .....       | 45 |
| Tabela 6 - Resultados encontrados nos modelos experimentais ..... | 47 |
| Tabela 7 - Diferença entre experimento e modelos.....             | 47 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 – Propriedades do concreto confinado com armaduras de aço e manta de FRP ..... | 21 |
| Quadro 2 – Modelos experimentais para uma camada de fibra de carbono .....              | 23 |
| Quadro 3 – Limites de irregularidades na superfície do concreto .....                   | 33 |

## LISTA DE SIGLAS

|      |   |
|------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                  |
| AIC  | American Concrete Institute   |
| CFRP | Carbon Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono) |
| FIB  | Fédération Internationale du Béton  |
| FRP  | Fiber Reinforced Polymer (Polímero Reforçado com Fibra)                   |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>12</b> |
| 1.1 OBJETIVOS.....   | 12        |
| 1.1.1 Objetivo Geral .....   | 12        |
| 1.1.2 Objetivos específicos .....  | 12        |
| 1.2 JUSTIFICATIVA.....   | 13        |
| <b>2 CONCRETO ARMADO</b> .....   | <b>14</b> |
| 2.1 DEFINIÇÃO .....  | 14        |
| 2.2 PILARES.....   | 15        |
| 2.2.1 Pilares Curtos .....   | 16        |
| 2.3 COEFICIENTE DE POISSON.....  | 17        |
| 2.4 CONFINAMENTO DE PILARES.....   | 19        |
| 2.5 REFORÇO ESTRUTURAL .....   | 23        |
| 2.5.1 Técnicas de Reforço Estrutural.....  | 24        |
| 2.5.2 Reforço Estrutural Por Meio da Utilização de Sistemas Compósitos<br>Estruturados Com Fibra de Carbono..... | 24        |
| <b>3 MATERIAIS COMPÓSITOS</b> .....  | <b>27</b> |
| 3.1 DEFINIÇÃO .....  | 27        |
| 3.2 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS .....   | 27        |
| 3.2.1 Compósitos Com Matriz Polimérica .....   | 28        |
| 3.2.1.1 <i>Matriz Polimérica Epóxi</i> .....   | 29        |
| <b>4 FIBRA DE CARBONO</b> .....  | <b>30</b> |
| 4.1 TIPOS DE FIBRA DE CARBONO.....   | 30        |
| 4.2 HISTÓRICO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....   | 31        |
| 4.3 MÉTODO DE APLICAÇÃO.....   | 32        |
| <b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....   | <b>35</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6 RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>                  | <b>42</b> |
| 6.1 RESULTADOS.....                                  | 42        |
| 6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....                      | 45        |
| <b>7 CONCLUSÕES .....</b>                            | <b>48</b> |
| <b>8 TEMAS SUGERIDOS PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b> | <b>50</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                              | <b>51</b> |
| <b>APÊNDICE A - Pilares Rompidos.....</b>            | <b>53</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é o material utilizado na maior parte das estruturas, devido à suas diversas características e vantagens, mas considerando a vida útil média das construções de 50 anos, eventualmente as estruturas em concreto armado precisam ser reparadas ou reforçadas para restaurar sua segurança e prolongar sua durabilidade. Além do desgaste natural ao longo dos anos, existem outras razões para o reforço de uma construção, como: mudança do uso da estrutura, assim intensificando as solicitações de carga, inviabilidade de demolição ou reconstrução, além disso, ambientes mais agressivos e estruturas cada vez mais esbeltas.

Para o tratamento de uma construção em concreto armado existem diversas técnicas e materiais adequados, a escolha do método a ser utilizado deve ser baseada em quesitos como viabilidade e eficiência. Além de métodos já consagrados, e amplamente estudados, como a utilização de chapas metálicas e do próprio concreto armado para reforço de estruturas, são constantemente desenvolvidas novas técnicas e utilizados novos materiais, como os polímeros reforçados com fibras, que podem ser de vidro, de sisal e, especificamente nesse estudo, de carbono.

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é o de analisar a eficiência do reforço estrutural com fibra de carbono em pilares curtos de concreto armado.

#### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar a influência do número de camadas de reforço com fibras de carbono na resistência à compressão axial centrada.
- Analisar a eficiência do reforço com fibras de carbono para uma seção transversal quadrada
- Comparar os resultados obtidos com os resultados gerados pelas equações teóricas para o confinamento de pilares com fibra de carbono.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A vida útil das construções feitas nas décadas de 1960 e 1970, já acabou ou está próxima do fim em 2013, e estas estruturas necessariamente precisarão de reforços e reparos para manter sua segurança.

Novos materiais e métodos de construção e reforço são constantemente desenvolvidos, portanto, estudos para analisar a eficiência e a viabilidade das novas técnicas devem ser feitos. A fibra de carbono é um dos materiais com crescente aceitação e utilização em diversas áreas de tecnologia, por exemplo, aeronáutica e bélica. Um dos motivos disso é sua grande resistência e pouco peso se for comparado a outros materiais como o aço e o concreto e também sua ótima resistência à corrosão.

Na construção civil, o reforço estrutural com fibra de carbono ainda é uma técnica desconhecida pela maioria dos profissionais e considerada cara em relação a outros métodos, mas devido a sua rápida e fácil execução, interferindo minimamente no ambiente ao redor, sua eficiência deve ser analisada.

## 2 CONCRETO ARMADO

### 2.1 DEFINIÇÃO

Segundo Graziano (2005) o concreto é um material que no estado fresco é bastante plástico, podendo ser moldado em quase qualquer forma, e após o tempo de cura, tem ótima resistência à compressão, resiste bem ao fogo, é praticamente impermeável e é durável.

Porém, sua resistência à tração é pequena, cerca de 10 vezes menor que a resistência à compressão, o que gera a necessidade de associação com algum outro material para suprir essa deficiência, e poder absorver os esforços de tração nas estruturas.

O aço é uma liga formada por ferro e carbono e é um material com grande resistência a tração, entretanto, necessita de proteção contra a corrosão. Assim, juntando as barras de aço e o concreto tem-se o chamado concreto armado.

No entanto para que este novo material tenha uma melhora em relação aos materiais que o compõem, é necessário que exista a correta aderência entre o concreto e a armadura. Para isso existe na NBR 6118/2003 diversos parâmetros para garantir a correta aderência entre os materiais, como o comprimento de ancoragem e a tensão de aderência.

O comprimento de ancoragem é o comprimento suficiente para que o esforço da barra, de tração ou de compressão, seja transferido para o concreto. A tensão de aderência leva em conta diversos fatores, como:

- Rugosidade da barra;
- Posição da barra durante a concretagem;
- Diâmetro da barra;
- Resistência do concreto;
- Retração;
- Adensamento;
- Porosidade do concreto.

## 2.2 PILARES

De acordo com a NBR 6118/2003, pilares são: “Elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes”. Apesar de o concreto ter uma boa resistência à compressão, as barras de aço longitudinais ajudam a absorver os esforços e a diminuir a seção do pilar. Já as barras transversais servem para garantir a estabilidade do núcleo do pilar e evitar os esforços de deformação lateral. Como os pilares são responsáveis pelo suporte de vigas e lajes e conduzem as solicitações à fundação, eles devem ter uma atenção especial na hora de se dimensionar uma estrutura (GRAZIANO, 2005).

Na verificação do cálculo da estabilidade de um pilar no estado limite último (ELU), ele sempre estará solicitado à flexão oblíqua composta, seja por defeitos construtivos, ou por cargas transmitidas por vigas e lajes, ou ainda pelos efeitos de fluência e flambagem.

Os efeitos de 1ª ordem são os deslocamentos e esforços internos obtidos com a análise do equilíbrio da estrutura com a configuração geométrica inicial.

A NBR 6118/2003 estabelece que as imperfeições na construção podem ser consideradas por um momento mínimo de 1ª ordem, estabelecido no item 11.3.3.4.

São chamados de efeitos de 2ª ordem, os esforços que se somam aos de 1ª ordem, e são calculados considerando as deformações na estrutura. A norma estabelece alguns métodos para se calcular estes efeitos de 2ª ordem, e também estabelece o quão importante são esses esforços em função da esbeltez do pilar.

Os pilares podem ser classificados quanto à sua esbeltez em:

- Pilares curtos ( $\lambda \leq 35$ )
- Pilares medianamente esbeltos ( $35 \leq \lambda \leq 90$ )
- Pilares esbeltos ( $\lambda > 90$ )

Para os pilares curtos a norma permite desconsiderar os efeitos de 2ª ordem, e para os pilares esbeltos e medianamente esbeltos, ela estabelece 4 métodos para se calcular os esforços extras, que devem ser escolhidos dependendo da esbeltez do pilar.

### 2.2.1 Pilares Curtos

Como a NBR 6118/2003 estabelece que  $35 \leq \lambda_1 \leq 90$ , pode-se considerar que os pilares curtos são aqueles cujo índice de esbeltez é  $\lambda \leq 35$  e para esses pilares podem ser desprezados os esforços locais de 2ª ordem.

Para se calcular o índice de esbeltez utiliza-se a expressão (1):

$$\lambda = \frac{l_e}{i_{min}} \quad (1)$$

Onde:

$l_e$  = Comprimento de flambagem do pilar

$i_{min}$  = Raio de giração mínimo

O raio de giração mínimo é definido pela expressão (2):

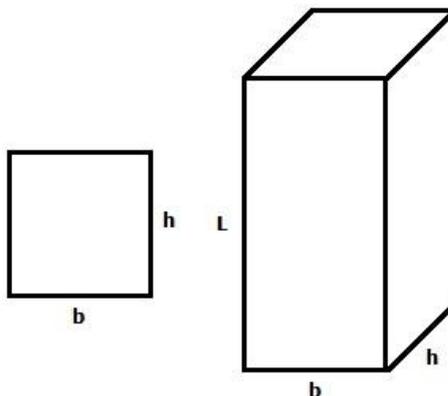
$$i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} \quad (2)$$

Onde:

$I_{min}$  = Momento de inércia mínimo

$A$  = Área da seção.

No presente estudo serão utilizados pilares com seção quadrada, conforme a figura 1.



**Figura 1 - Dimensões dos pilares**  
**Fonte: Autoria Própria**

Portanto, os cálculos da área e do momento de inércia são dados por (3) e (4):

$$A = bh \quad (3)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4)$$

Assim, substituindo-se as expressões (3) e (4) em (2) tem-se (5):

$$i = \frac{h}{\sqrt{12}} \quad (5)$$

E por fim, substituindo-se (5) em (1) tem-se o índice de esbelteza para seções quadradas (6):

$$\lambda = \frac{l_e \sqrt{12}}{h} \quad (6)$$

### 2.3 COEFICIENTE DE POISSON

Segundo Hibbeler (2009), quando um corpo deformável é submetido a uma força de tração axial ele não apenas se alonga, mas também se contrai lateralmente. Por exemplo, ao esticar uma tira de borracha, percebe-se que a espessura, assim

como a largura da tira diminuem. Da mesma maneira, quando uma força de compressão é aplicada sobre um corpo provoca contração na direção da força e, no entanto, seus lados se expandem lateralmente. Quando uma carga  $P$  é aplicada a uma barra, provoca uma mudança  $\delta$  no comprimento e  $\delta'$  no raio da barra. As deformações na direção longitudinal ou axial e na direção transversal ou lateral são, dadas pelas equações (7) e (8) respectivamente:

$$\epsilon_{long} = \frac{\delta}{L} \quad (7)$$

$$\epsilon_{lat} = \frac{\delta'}{r} \quad (8)$$

No início do século XIX, o cientista francês S. D. Poisson percebeu que, dentro da faixa elástica, a razão entre essas deformações é uma constante, visto que  $\delta$  e  $\delta'$  são proporcionais. Essa constante é denominada coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e seu valor numérico é único para determinado material homogêneo e isotrópico.

Portanto, tem-se (9):

$$\nu = - \frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad (9)$$

Devido ao alongamento longitudinal (deformação positiva) provocar contração lateral (deformação negativa), e vice-versa, é necessário o sinal negativo na expressão. A deformação transversal é a mesma em todas as direções laterais (ou radiais) e é causada somente pela força axial ou longitudinal, nenhuma força ou tensão age em uma direção lateral de modo a deformar o material nessa direção. O coeficiente de Poisson é adimensional e, para a maioria dos sólidos não-porosos, seu valor encontra-se, em geral, entre 1/4 e 1/3. Um material ideal que não apresente nenhum movimento lateral quando é alongado ou comprimido terá  $\nu = 0$ . O valor máximo possível para o coeficiente de Poisson é 0,5, portanto,  $0 \leq \nu \leq 0,5$ .

Para o concreto, considerando tensões de compressão menores que  $0,5 f_c$  e de tração menores que  $f_{ct}$ , pode ser adotado  $\nu = 0,2$ .

## 2.4 CONFINAMENTO DE PILARES

Segundo FIB (1999) apud Carrazedo (2002), a maioria dos concretos possuem cerca de 75% de agregados de tamanhos diversos, que são os componentes rígidos do concreto, e as forças de compressão caminham através deles. A coesão da pasta de cimento, que gera componentes laterais no concreto não confinado é o que mantém o equilíbrio do material. Quando esta coesão é superada, surgem as primeiras microfissuras entre agregados e a pasta de cimento. As microfissuras crescem com o aumento da carga e o concreto rompe com fissuração paralela à aplicação da carga. O confinamento aumenta a coesão, resultando em uma maior resistência do concreto.

O confinamento é uma técnica usada há bastante tempo, para o reforço de estruturas de concreto armado, pois essa produz um ganho na ductibilidade e um aumento na resistência à compressão do concreto através da pressão lateral exercida, ou pelas armaduras transversais ou pelo encamisamento com tubo de aço ou por compósitos.

A técnica mais comum para o confinamento de pilares é a adição de armaduras transversais (estribos) ao concreto, porém, nos últimos anos vem sendo cada vez mais usados polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP's), pois esses praticamente não alteram a rigidez elástica do pilar, têm uma ótima relação resistência x peso e uma excelente resistência à corrosão (WANG et al., 2007).

Segundo Carrazedo (2002), existe uma grande diferença na pressão lateral desenvolvida por estribos de aço e por compósitos. O aço, após atingir o escoamento, proporciona uma pressão constante, enquanto o compósito possibilita uma pressão crescente até sua ruptura.

Os resultados obtidos em uma pesquisa realizada por Mirmiran *et al.* (1998) deixam evidenciados que a eficácia do confinamento com polímeros reforçados com fibra em pilares de concreto depende de vários parâmetros, como, a resistência do concreto, os tipos de fibras e da resina, a orientação e a quantidade de fibras, a espessura do revestimento, a forma da seção transversal, a esbeltez do pilar e a ligação da interface entre o núcleo de concreto e o revestimento (WANG et al., 2007).

Richart *et al* (1929) verificaram o comportamento do concreto submetido à pressão hidrostática de fluidos e de armaduras transversais e propuseram equações para relacionar a pressão lateral exercida pelo confinamento com a resistência ( $f_{cc}$ ) e a deformação última ( $\varepsilon_{cc}$ ) do concreto confinado.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 \times f_l \quad (10)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + k_2 \times \frac{f_l}{f_{co}} \quad (11)$$

onde:

- $f_{cc}$  é a resistência do concreto confinado;
- $f_{co}$  é a resistência do concreto não confinado;
- $f_l$  é a pressão lateral;
- $\varepsilon_{cc}$  é a deformação última do concreto confinado;
- $\varepsilon_{co}$  é a deformação última do concreto não confinado;
- $k_1$  e  $k_2$  são coeficientes que assumem diferentes valores nos diversos modelos teóricos existentes.  $k_1$  varia com a pressão lateral tendendo a 4,1 para maiores pressões laterais. Richart *et al* (1928) propuseram então coeficientes  $k_1 = 4,1$  e  $k_2 = 5k_1$ .

Segundo Samaan *et al* (1998), os modelos de confinamento com concreto armado superestimam a resistência do reforço com FRP's, o que leva o projetista a ter que utilizar grandes coeficientes de segurança e deixa o projeto muito mais caro do que o necessário.

Para mostrar melhor as diferenças de comportamento entre o confinamento com armaduras de aço e FRP's, Samaan (1998) comparou algumas propriedades de corpos de prova com cada tipo de confinamento, conforme o quadro 1.

| Propriedades  | Concreto confinado com aço <sup>a</sup> | Concreto confinado com FRP <sup>b</sup> |
|---|---|---|
| Diâmetro (D)  | 114,3 mm                                | 145 mm                                  |
| Espessura do tubo ( $t_j$ )   | 5,2 mm                                  | 2,2 mm                                  |
| Resistência do concreto não confinado ( $f_{cc}$ )  | 52,4 MPa                                | 26,4 MPa                                |
| Resistência do concreto confinado ( $f_{co}$ ) <sup>c</sup>   | 172 MPa                                 | 74,6 MPa                                |
| Eficácia do confinamento ( $f_{co}/f_{cc}$ )  | 3,28                                    | 2,83                                    |
| Deformação última ( $\epsilon_{cu}$ )   | 0,036                                   | 0,043                                   |
| Resistência do tubo ( $f_j$ )   | 376,7 MPa                               | 579,2 MPa                               |
| Pressão de confinamento ( $f_r$ )   | 34,3 MPa                                | 17,60 MPa                               |
| Razão de confinamento ( $f_r/f_{cc}$ )  | 0,65                                    | 0,66                                    |
| <sup>a</sup> Corpo de prova CS retirado de Orito et al. (1987)<br><sup>b</sup> Corpo de prova DB21 retirado de Mirmiran (1997)<br><sup>c</sup> $f_{cu}$ (resistência última) para o concreto confinado com FRP. |   |   |

**Quadro 1 - Propriedades do concreto confinado com armaduras de aço e mantas de FRP**  
**Fonte: Samaan et al. (1998)**

Pode-se ver que a deformação última com FRP's é maior, porém a eficácia do confinamento (que é dada pela razão entre as resistências do concreto confinado e não confinado) é maior para as armaduras de aço e a razão de confinamento de ambos os métodos é semelhante (próxima a 0,65).

Analisando-se o gráfico tensão normal x deformação específica, figura 2, do concreto confinado com aço, verifica-se que a curva tem apenas uma ligeira suavização antes de atingir a resistência máxima,  $f_{cc}$ , após isso ela tem uma descida gradual até o ponto de ruptura, onde a resistência última,  $f_{cu}$ , é atingida, ou seja,  $f_{cu}$  é menor do que  $f_{cc}$  (SAMAAN et al., 1998.)

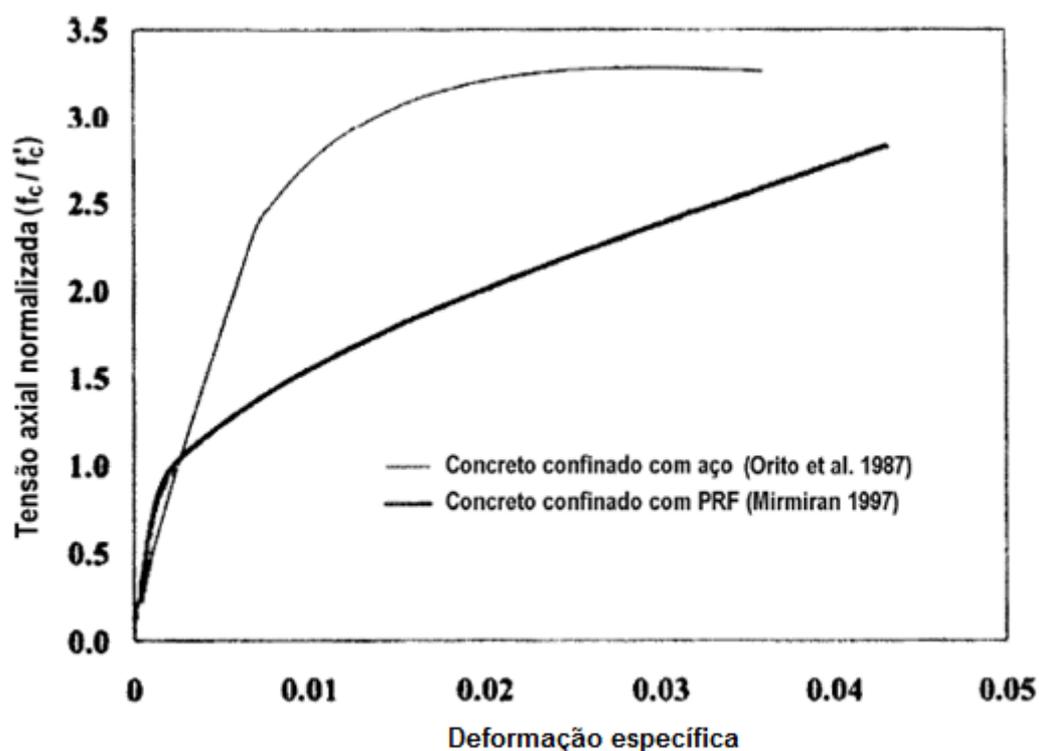


Figura 2 - Diagramas tensão normal x deformação específica do concreto confinado com aço e FRP's

Fonte: Samaan *et al.* (1998)

Para o concreto confinado com FRP's verifica-se uma curva bi-linear, com uma zona de transição próxima à resistência máxima do concreto não confinado ( $f_{co}$ ) e uma grande suavização da curva após esse ponto. Após a transição, a rigidez tangencial se estabiliza, e continua fixa até a ruptura, que ocorre quando a resistência máxima do concreto confinado ( $f_{cc}$ ) é atingida (a resistência última do concreto ( $f_{cu}$ ) é igual à  $f_{cc}$ ). (SAMAAN *et al.*, 1998)

Carrazedo (2002) cita outros modelos baseados em análises experimentais para o cálculo da resistência do concreto confinado com CRFP's, eles são apresentados no quadro 2.

| Modelo analítico           | $f_{cc}$   |
|----------------------------|--|
| Kono <i>et al.</i> (1998)  | $\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 0,0572 \cdot f_l$                                 |
| Toutanji (1999)            | $\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3,5 \cdot \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^{0,85}$ |
| Saafi <i>et al.</i> (1999) | $\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2,2 \cdot \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^{0,84}$ |
| Spoelstra & Monti (1999)   | $\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 0,2 + 3 \cdot \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^{0,5}$  |

**Quadro 2 – Modelos Experimentais para uma camada de fibra de carbono**  
**Fonte: Carrazedo (2002)**

onde:

- $f_{cc}$  é a resistência do concreto confinado;
- $f_{co}$  é a resistência do concreto não confinado;
- $f_l$  é a pressão lateral.

## 2.5 REFORÇO ESTRUTURAL

Segundo Beber (2003), juntamente com o advento do concreto surgiu a demanda pelo reforço estrutural, como uma resposta aos diversos problemas das construções.

A partir do momento que a estrutura apresentar alguma anomalia, deve ser imediatamente analisada com base em critérios que permitam estabelecer o grau de segurança e a sobrevida remanescente, essa análise de causa e efeito é chamada de patologia das estruturas (MACHADO, 2002).

Após a identificação das causas e dos possíveis efeitos e anomalias que podem vir a surgir ou se agravar na estrutura, é escolhido o método mais adequado de reforço estrutural.

### 2.5.1 Técnicas de Reforço Estrutural

Para o tratamento de uma construção defeituosa ou que sofreu alterações por seu uso, primeiramente deve ser feito o correto diagnóstico das patologias existentes. Para cada caso, haverá pelo menos um método para realizar o conserto. Devem ser levados em consideração fatores como características do ambiente, durabilidade e tempo de aplicação, além do atendimento aos quesitos de segurança estrutural (NAKAMURA, 2009).

Além das constantes inovações no campo da recuperação de estruturas, existem técnicas amplamente estudadas e já consagradas, como a utilização de chapas de aço e do próprio concreto para o reforço das edificações.

Chapas de aço são geralmente utilizadas para evitar grandes deformações em vigas, a desvantagem desse tipo de reforço é o grande acréscimo de carga que elas trazem à estrutura.

Para a utilização do concreto como material de reforço ou de recuperação, através do aumento da seção transversal da estrutura, é necessário espaço ao redor do local onde será executado o método, o que em alguns casos não é possível. Além da carga que acresce a estrutura, o reforço com concreto é mais demorado e complicado se for comparado à técnica com fibra de carbono. Um dos principais motivos para ser amplamente utilizado é o baixo custo (MACHADO, 2011).

### 2.5.2 Reforço Estrutural Por Meio da Utilização de Sistemas Compósitos Estruturados Com Fibra de Carbono

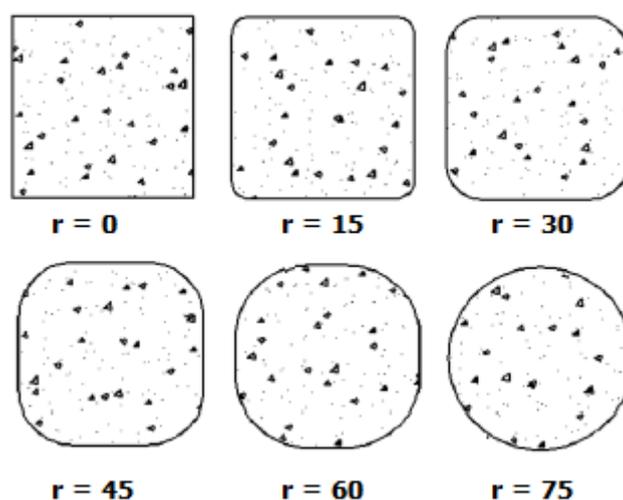
Para a reabilitação de uma estrutura é possível recorrer às técnicas executadas com produtos compósitos, que são criteriosamente colados nas faces dos elementos (JUVANDES, 2002).

Segundo Machado (2002), o sistema compósito estruturado com fibra de carbono pode ser utilizado para:

- Recuperar elementos estruturais de concreto armado enfraquecidos por patologias.
- Reforçar elementos em boas condições para permitir o aumento das cargas solicitantes.

Nos diversos estudos realizados a respeito do reforço estrutural com fibra de carbono na maioria foram utilizados modelos de seção transversal circular, nos quais o confinamento dos pilares é mais efetivo.

O aumento da resistência e do módulo de elasticidade varia de acordo com o ângulo utilizado nos cantos dos pilares. Wang & Wu (2007) ensaiaram pilares de 300 mm de altura e de seção quadrada (150 mm x 150 mm), sem arredondar as bordas, e com raios de 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, além de pilares de seção circular ( $r = 75$  mm), conforme figura 3.



**Figura 3 - Seções transversais ensaiadas**  
**Fonte: Wang & Wu. (2007)**

Os pilares foram ensaiados sem reforço, com uma e com duas camadas de fibra de carbono.

Nos pilares, em que os cantos não foram arredondados, não houve acréscimo significativo de resistência com a aplicação do reforço de fibra de carbono. Nos modelos com  $r = 15$  mm houve um aumento da resistência de 5,5% para uma camada de fibra e um aumento de 32,3% para duas camadas de fibra. Nos pilares com  $r = 30$  mm houve um acréscimo de 23,2% para uma camada e um

aumento de 74,9% quando foram usadas duas camadas de reforço. Para o  $r = 60$  mm ocorreu um crescimento de 57,2% para uma camada e de 248,1% para duas camadas. Já no pilar de seção circular obteve-se o melhor resultado, houve um ganho de resistência de 80,2% para uma camada e de 274,4% para duas camadas do reforço de fibra de carbono (WANG & WU, 2007). Nesse estudo comprovou-se que quanto maior o raio das bordas dos pilares, maior é o ganho de resistência à compressão.

No estudo realizado por Carrazedo (2002), o reforço de compósitos de fibras de carbono demonstrou ganhos significativos de resistência com pequenas espessuras de reforço. Nos ensaios realizados com uma camada de reforço, obtiveram-se acréscimos na capacidade resistente entre 31% e 64%. Já com duas camadas de reforço, obtiveram-se acréscimos na capacidade resistente entre 62% e 105%.

### 3 MATERIAIS COMPÓSITOS

#### 3.1 DEFINIÇÃO

O termo compósito é derivado do latim *compositum*, que por sua vez tem como raiz a palavra *componere*: com – junto + ponere – colocar, ou seja, juntar (BEBER, 2003).

Segundo Callister (2011), um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que os constituem, de modo que haja uma melhor combinação das propriedades.

Ainda segundo Callister (2011) os compósitos são classificados em três divisões principais: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais.

O comportamento final de um compósito FRP (Compósito Reforçado com Fibra) é acentuadamente dependente dos materiais que o constitui, da disposição das fibras principais de reforço e da interação entre os referidos materiais (JUVANDES, 2002).

#### 3.2 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Os objetivos de projeto dos compósitos reforçados com fibras incluem alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso. Essas características são expressas através dos parâmetros resistência específica e módulo específico (CALLISTER, 2011).

Ainda baseado em Callister (2011) os parâmetros resistência específica e módulo específico são, respectivamente, às razões entre o limite de resistência à tração e o peso específico e entre o módulo de elasticidade e o peso específico.

Grande parte dos materiais são mais fortes e mais rígidos na forma fibrosa. Uma elevada proporção de fibra permite a transferência eficaz do carregamento da matriz para o material fibroso, permitindo o melhor aproveitamento das propriedades da fibra (FIB, 2001).

Segundo Juvandes (2002), as principais formas comercializadas do FRP são o sistema pré-moldado e o sistema curado *in-situ*.

Nos sistemas FRP curados *in-situ*, o agente adesivo é a própria resina de impregnação das fibras, já no pré-moldado, é necessário a utilização de um adesivo (JUVANDES, 2002).

Os compósitos consistem em uma fase matriz e uma fase fibra, no presente estudo, a fase matriz adotada foi a matriz polimérica epóxi e a fase fibra adotada foi a fibra de carbono.

### 3.2.1 Compósitos Com Matriz Polimérica

Os compósitos com matriz polimérica consistem em uma resina polimérica como a matriz, com fibras como meio de reforço (CALLISTER, 2011).

A função da matriz é proteger as fibras contra a abrasão ou corrosão ambiental, ligar as fibras em conjunto e distribuir a carga uniformemente (FIB, 2001).

A matriz envolve completamente a fase fibra, permitindo a boa transferência de tensões entre as fases (JUVANDES, 2002).

Segundo Machado (2002), as resinas precisam ter como características, compatibilidade com o substrato de concreto, resistência adequada aos agentes ambientais, capacidade de preencher vazios e compatibilidade com as fibras.

### 3.2.1.1 *Matriz Polimérica Epóxi*

As matérias-primas, para a maioria das resinas epóxi, são resinas orgânicas líquidas de baixo peso molecular, que contêm grupos epóxi. Quimicamente o grupo epóxi compreende anéis de um átomo de oxigênio e dois átomos de carbono (ACI, 2002).

Segundo Callister (2011), os epóxios possuem melhores propriedades mecânicas e uma maior resistência à umidade do que as resinas poliésteres e vinílicas. Por esses motivos, também são mais caros que as outras matrizes citadas.

Para se obter uma boa matriz epóxi, a mistura dos componentes, resina epóxi e endurecedor, deve ser adequada, de modo que seja estabelecida a ligação entre suas moléculas (JUVANDES, 2002).

A quantidade de resina aplicada deve ser controlada de acordo com as especificações do fabricante, pois tanto uma camada muito fina, quanto uma camada muito grossa de epóxi podem comprometer o desempenho estrutural (BEBER, 2003).

## 4 FIBRA DE CARBONO

Segundo Callister (2011), a fibra de carbono possui o maior módulo específico e a maior resistência específica dentre todas as fibras de reforço. As fibras são obtidas através de um processo térmico, quanto maiores forem as temperaturas, maior será o módulo de elasticidade do material. No entanto, quanto maior o módulo de elasticidade, maior o custo do processo (MACHADO, 2002). A figura 4 compara alguns materiais por meio dos diagramas tensão x deformação.

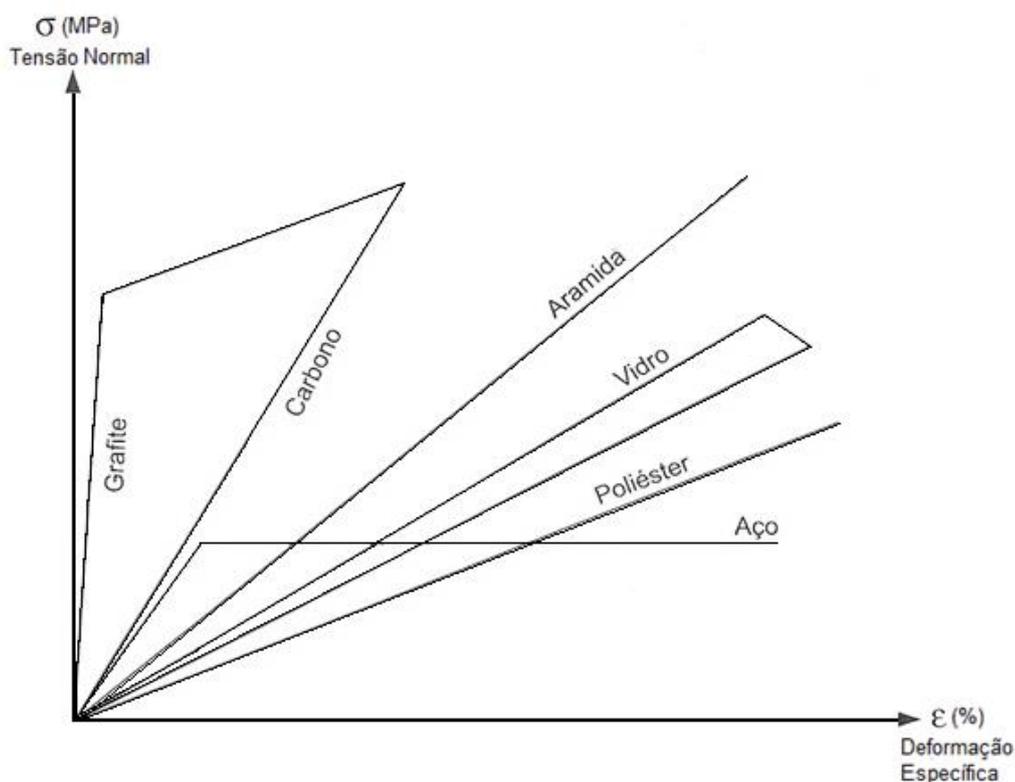


Figura 4 – Diagrama tensão normal x deformação específica

Fonte: Machado (2011)

### 4.1 TIPOS DE FIBRA DE CARBONO

Existem três materiais orgânicos precursores utilizados na produção da fibra de carbono: *rayon*, poliacrilonitrila (PAN) e *pitch* (CALLISTER, 2011). Dentre as três classificações, existem dois tipos de fibra de carbono: a de módulo de elasticidade

elevado (Tipo I) e a de elevada resistência (Tipo II). A diferença nas propriedades entre os Tipos I e II é resultado das diferenças na microestrutura fibra. (ACI, 2002).

Segundo a ACI (2002), rayon e fibras precursoras isotrópicas derivadas do alcatrão (pitch) são utilizados para produzir fibras de carbono de baixo módulo (da ordem de 50 GPa), PAN e precursores líquidos cristalinos do alcatrão são utilizados na produção de fibras de maior módulo de elasticidade.

Segundo Beber (2003) a primeira categoria de fibra de carbono é fabricada através do rayon. O processo consiste em esticar a fibra em altas temperaturas, apesar de ter alta resistência o alto custo torna esse processo inviável.

Ainda segundo Beber (2003) a segunda categoria de fibra é produzida a partir da PAN, que combina o baixo custo com boas propriedades físicas. Nesse processo, a resistência da fibra aparenta ser maximizada a uma temperatura próxima de 1500°C. (MACHADO, 2002).

O pitch é uma matéria prima muito barata quando comparada com as demais, conseqüentemente, a resistência e o módulo de suas fibras são baixos. Para obtenção de fibras com boas propriedades mecânicas é necessário converter o alcatrão em um cristal líquido (BEBER, 2003).

Segundo Machado (2002), as fibras de carbono, particularmente as de elevado módulo de elasticidade, não são facilmente impregnadas pelas resinas, por isso, frequentemente elas são revestidas por um tratamento superficial epóxico, proporcionando uma interface compatível com a matriz resinosa.

## 4.2 HISTÓRICO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Um dos maiores impulsos para a utilização de compósitos na construção civil aconteceu no Japão. Devido à preocupação com a frequente ocorrência de abalos sísmicos na região, o governo japonês buscou garantir a utilização de estruturas essenciais, como as viárias (MACHADO, 2002).

Segundo Souza & Ripper (1998), a partir da conjunção de esforços entre entidades públicas e privadas do país no sentido de investigarem novas tecnologias

para o reforço de estruturas, surgiu a ideia de adaptar a utilização de CFRP, que já era utilizado em outros setores da indústria.

Ainda segundo os autores, após a ocorrência de um sismo em Kobe, no ano de 1995, a tecnologia do reforço estrutural com fibra de carbono ganhou alguns ajustes e começou a se desenvolver.

#### 4.3 MÉTODO DE APLICAÇÃO

A aplicação do reforço estrutural através do compósito reforçado com fibra de carbono deve ser feita por profissionais devidamente qualificados para que seja obtido o resultado esperado.

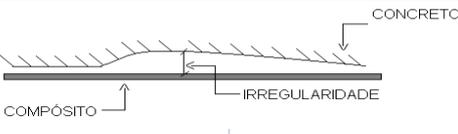
As ferramentas utilizadas para a aplicação são: tesoura ou estilete (corte da fibra), rolo de espuma (aplicação do primer e da resina) e rolo metálico (alinhamento das fibras e retirada de bolhas de ar) (MACHADO, 2011).

Machado (2002) descreve como primeiro passo da aplicação do reforço estrutural com fibra de carbono recuperar o substrato de concreto, para proporcionar ao sistema uma aderência segura.

A limpeza deve contemplar a remoção de poeira, pó, substâncias oleosas, graxas, partículas soltas e revestimentos (MACHADO, 2011).

A irregularidade da superfície que pode ser admitida depende do tipo de FRP. Pré-fabricados são menos sensíveis à irregularidade, já as mantas são muito flexíveis e irão ser mais afetadas pelas irregularidades (FIB, 2001).

No quadro 3 estão apresentados os valores limites para as irregularidades.

| Tipo de Polímero Reforçado com Fibra |  |  |
|--------------------------------------|--|--|
|                                      | Irregularidade aceitável em um comprimento de 2m                                   | Irregularidade aceitável em um comprimento de 0,3m |
| Pré-fabricado (espessura > 1mm)      | 10 mm  | 4 mm   |
| Pré-fabricado (espessura < 1mm)      | 6 mm   | 2 mm   |
| Curado <i>in situ</i>                | 4 mm   | 2 mm   |

**Quadro 3 - Limites de irregularidades na superfície do concreto**  
**Fonte: FIB (2001).**

Segundo Beber (2003) após a regularização do substrato, aplica-se um primer para impregnação dos poros do concreto, garantindo assim uma ponte de aderência entre os elementos.

Após o tratamento superficial, caso seja necessário, deve-se aplicar uma camada de pasta epoxídica (*putty filler*), para corrigir e regularizar a superfície, de modo que seja estabelecido um plano adequadamente nivelado (MACHADO, 2002)

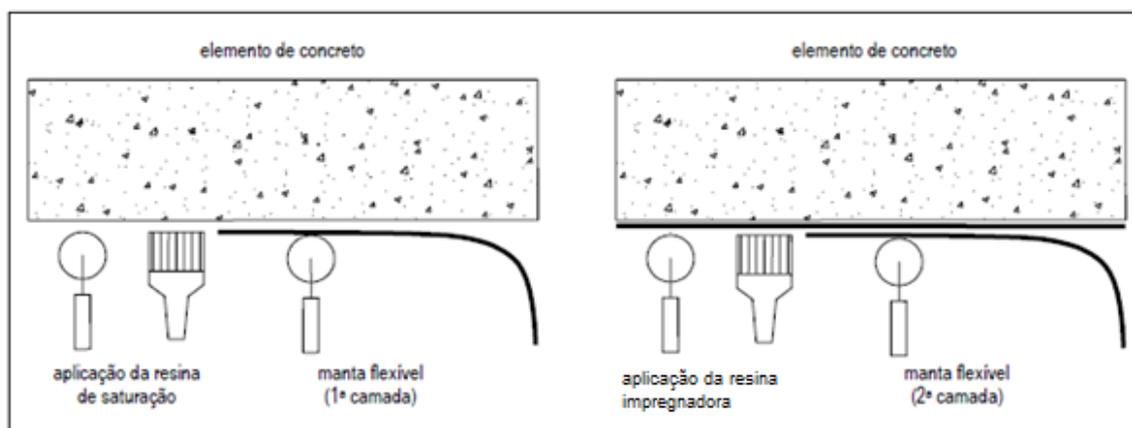
Beber (2003) apresenta que duas horas após a aplicação do primer já é possível aplicar a primeira camada de resina epóxi.

Segundo Machado (2011), a saturação da fibra pode ser feita tanto sobre uma bancada antes da aplicação ou ser feita diretamente na peça de concreto a ser reforçada. O procedimento deve ser escolhido pelo aplicador.

O reforço é cortado com as dimensões especificadas no projeto. Ele deve ser mantido livre de qualquer contaminação e verificado quanto possíveis danos resultantes do corte ou manuseio incorreto (FIB, 2001).

A colocação da fibra deve ser feita imediatamente após a saturação, pois o tempo de aplicação da resina é muito curto, de no máximo 25 minutos, nesse intervalo ainda é possível fazer ajustes na posição das fibras (MACHADO, 2011).

Para a aplicação das demais camadas de reforço, segue-se o mesmo procedimento adotado para a primeira camada, conforme figura 5.



**Figura 5 - Detalhe de Aplicação**  
**Fonte: Beber (2003).**

O tempo de cura do reforço estrutural de fibra de carbono deve ser verificado com o fabricante do mesmo, mas é em média de 7 dias.

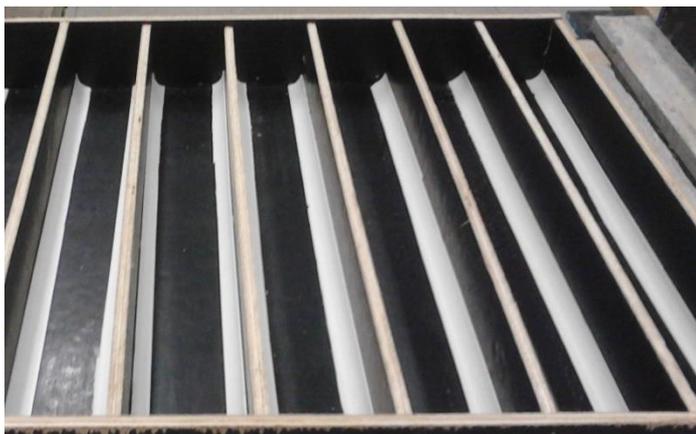
Para fins estéticos, alguma forma de acabamento pode ser necessária. Em termos de proteção contra fogo ou contra a radiação ultravioleta, um acabamento pode ser crucial para a integridade a longo prazo da estrutura reforçada. Diferentes tipos de camadas de acabamento podem ser utilizados, como concreto projetado ou pintura. Essas camadas de acabamento devem ser aplicadas de acordo com as especificações indicadas por cada fabricante (FIB, 2001).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram ensaiados três tipos de pilares: sem o reforço, com uma e com duas camadas de fibra de carbono. Para cada situação foram produzidos três corpos de prova, totalizando nove pilares. Cada modelo foi submetido a uma carga axial aplicada centralizada, incrementada até a ruptura.

- Todos os modelos mediam aproximadamente 10 cm x 10 cm x 60 cm, medida adotada pelos integrantes devido ao tamanho da prensa utilizada.
- Para essas dimensões o índice de esbeltez é  $\lambda = 20,78 < 35$ , o que caracteriza um pilar curto.
- A NBR 6118/2003, na seção 17.3.5.3.1 determina que a área de armadura longitudinal mínima é  $A_{s,min} \geq 0,004 A_c$ , no presente caso  $A_{s,min} = 0,4 \text{ cm}^2$ . Na seção 18.4.2, a NBR 6118/2003 prevê que o diâmetro mínimo das barras longitudinais em pilares seja de 10 mm, porém como é um modelo reduzido decidiu-se utilizar barras de 6,3 mm. Na mesma seção é previsto que para garantir a adequada resistência do elemento estrutural, em seções poligonais, deve haver pelo menos uma barra em cada vértice, assim sendo, utilizando quatro barras de 6,3 mm, tem-se uma área de armadura  $A_s = 1,247 \text{ cm}^2$ .
- O cobrimento das armaduras utilizado foi de 2,5 cm, o mínimo para ambientes com classe de agressividade ambiental I (escolhido no presente caso de acordo com a tabela 6.1 da NBR 6118/2003, para pilares, de acordo com a tabela 7.2 da NBR 6118/2003).
- O espaçamento entre as barras longitudinais foi o mínimo previsto na NBR 6118/2003, que é de 40 mm, e o espaçamento entre os estribos foi de 162,5 mm.

- Os pilares foram moldados em duas etapas, 6 em uma primeira etapa e 3 posteriormente.
- As formas foram executadas com compensados de madeira plastificados, e nos cantos foram colados, com epóxi, tubos de PVC com um raio de 20 mm, para garantir o arredondamento dos cantos, conforme figura 6.



**Figura 6 - Execução das formas**  
**Fonte: Aatoria Própria**

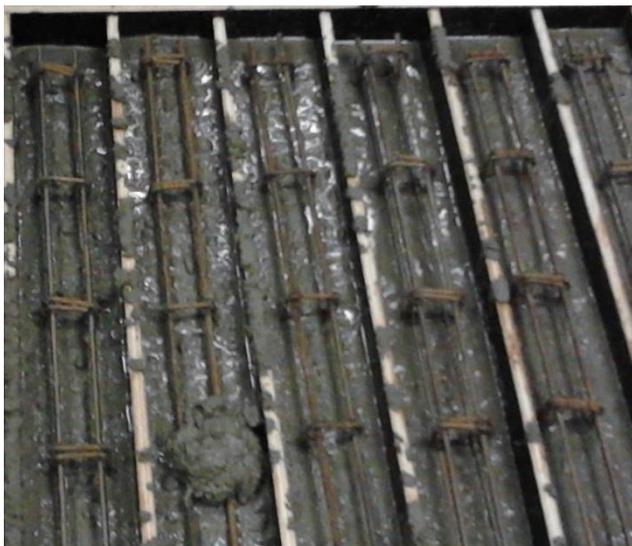
- O concreto foi dosado para 30 MPa, o traço em massa utilizado está apresentado na tabela 1.

**Tabela 1 - Traço unitário do concreto em massa**

| Material:                 | Traço em massa (kg): |
|---------------------------|----------------------|
| Cimento CP II Z - Votoran | 1,000                |
| Areia                     | 2,183                |
| Brita 1                   | 1,604                |
| Água                      | 0,621                |

**Fonte: Aatoria própria.**

- O concreto foi misturado em uma betoneira de 380 litros de eixo vertical, e então lançado e adensado no sentido perpendicular ao eixo de cada pilar, conforme figura 7.



**Figura 7 - Concretagem dos pilares**  
**Fonte: Autoria própria.**

- Para regularização das superfícies dos pilares foi utilizada argamassa polimérica e posteriormente todos foram lixados, figura 8.



**Figura 8 - Pilares regularizados com argamassa polimérica**  
**Fonte: Autoria própria**

- A aplicação da fibra de carbono foi feita 69 dias após a moldagem dos pilares e os ensaios de ruptura foram realizados após 90 dias, para proporcionar um tempo de cura adequado.
- A aplicação da fibra de carbono foi feita pela mesma pessoa em todos os modelos, para assim diminuir o risco de possíveis distorções nos resultados.
- Os componentes da resina epóxi foram misturados em três partes para uma, conforme figura 9.



**Figura 9 - Resina Epóxi**  
**Fonte: Autoria própria**

- A resina epóxi foi aplicada com uma espátula para garantir a espessura adequada, figura 10.



**Figura 10 - Aplicação de resina epóxi**  
**Fonte: Autoria própria**

- A fibra utilizada possuía trinta centímetros de altura, portanto, cada camada foi aplicada em três partes conforme figura 11.
- O transpasse para a emenda da fibra de carbono foi de aproximadamente 5 cm.



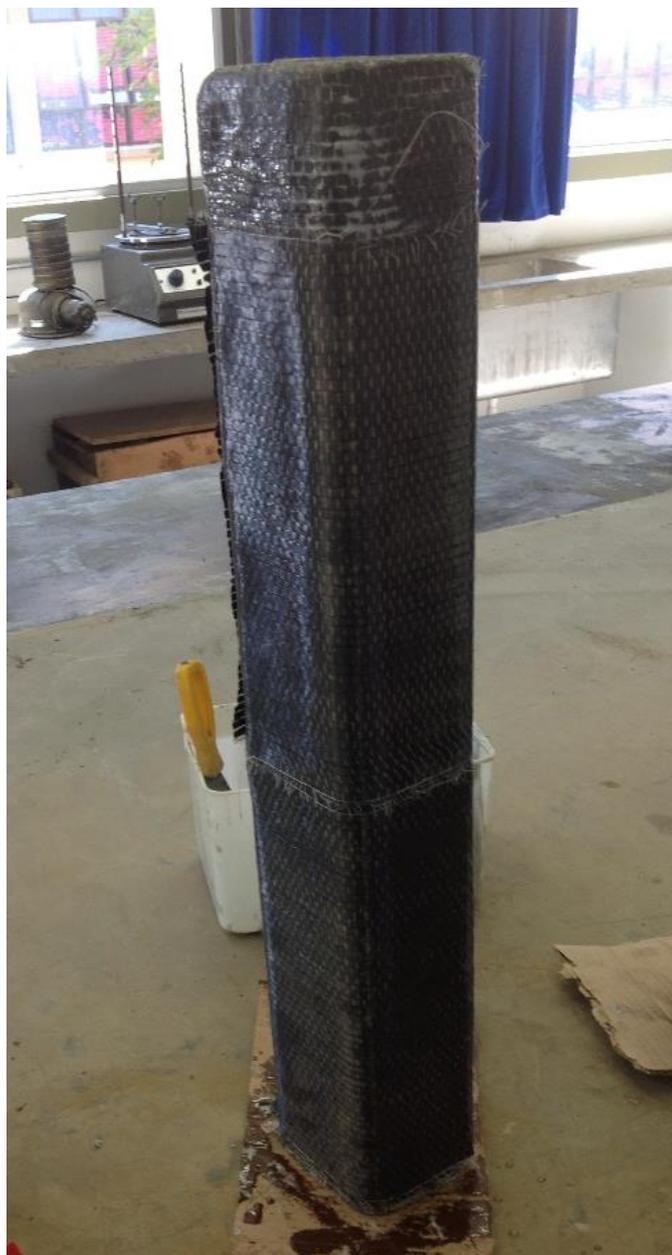
**Figura 11 - Aplicação da primeira camada de fibra de carbono**  
**Fonte: Autoria própria**

- Para a aplicação da segunda camada de fibra de carbono, foi aplicada uma resina impregnadora para garantir a aderência entre as camadas, figura 12.



**Figura 12 - Aplicação da segunda camada de fibra de carbono**  
**Fonte: Autoria própria**

- Após a aplicação da segunda camada de fibra de carbono, foi aplicada mais uma camada da resina impregnadora para, além de garantir a aderência entre as camadas, proteger o reforço, figura 13.



**Figura 13 - Pilar com duas camadas de fibra de carbono**  
**Fonte: Autoria própria**

## 6 RESULTADOS E ANÁLISES

### 6.1 RESULTADOS

Os pilares foram identificados como  $P_{i,j}$ , onde “i” é o número de camadas de fibra de carbono e “j” o número de identificação dos pilares.

Após a regularização e o reforço, os pilares tiveram as seguintes dimensões, apresentadas na tabela 2.

**Tabela 2 - Dimensões dos pilares**

| <b>Pilar</b>     | <b>Altura (mm)</b> | <b>Área Base (m<sup>2</sup>)</b> |
|------------------|--------------------|----------------------------------|
| P <sub>0,1</sub> | 600,00             | 0,01223                          |
| P <sub>0,2</sub> | 600,00             | 0,01202                          |
| P <sub>0,3</sub> | 600,00             | 0,01163                          |
| P <sub>1,1</sub> | 600,00             | 0,01180                          |
| P <sub>1,2</sub> | 600,00             | 0,01189                          |
| P <sub>1,3</sub> | 603,53             | 0,01298                          |
| P <sub>2,1</sub> | 601,10             | 0,01227                          |
| P <sub>2,2</sub> | 599,40             | 0,01185                          |
| P <sub>2,3</sub> | 598,90             | 0,01225                          |

Fonte: Autoria própria

As diferenças nas áreas das bases foram ocasionadas pelo arredondamento dos cantos, que foi necessário para a aplicação da fibra, e a diferença nas alturas ocorreu no corte dos pilares, que foi preciso para os mesmos entrarem na prensa utilizada.

Os pilares foram rompidos em uma prensa, com capacidade de 100 toneladas, em um ensaio monotônico crescente, onde foi aplicada carga axial centrada até o rompimento, figura 14.



**Figura 14 - Prensa utilizada nos ensaios de ruptura**  
**Fonte: Autoria própria**

As cargas à compressão resistidas pelos pilares estão apresentadas na tabela 3.

**Tabela 3 - Cargas obtidas (kN)**

| <b>Pilar</b>     | <b>Área Base (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Carga (kN)</b> |
|------------------|----------------------------------|-------------------|
| P <sub>0,1</sub> | 0,01223                          | 328,52            |
| P <sub>0,2</sub> | 0,01202                          | 306,46            |
| P <sub>0,3</sub> | 0,01163                          | 311,36            |
| P <sub>1,1</sub> | 0,01180                          | 495,24            |
| P <sub>1,2</sub> | 0,01189                          | 505,04            |
| P <sub>1,3</sub> | 0,01298                          | 558,98            |
| P <sub>2,1</sub> | 0,01227                          | 605,56            |
| P <sub>2,2</sub> | 0,01185                          | 671,76            |
| P <sub>2,3</sub> | 0,01225                          | 456,01            |

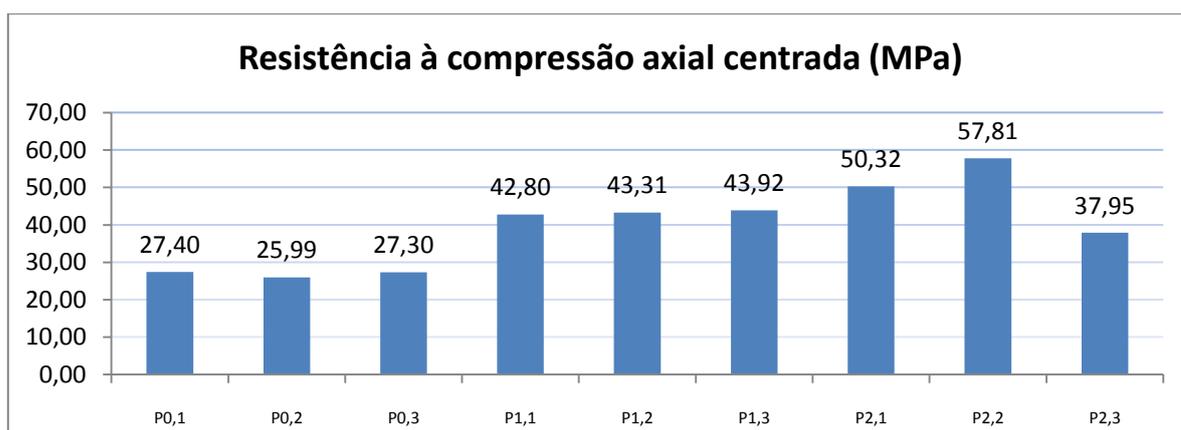
**Fonte: Autoria própria**

As resistências à compressão axial centrada, em MPa, são apresentadas na tabela 4 e no gráfico 1.

**Tabela 4 - Resistência à Compressão (MPa)**

| Pilar            | Resistência à Compressão (MPa) |
|------------------|--------------------------------|
| P <sub>0,1</sub> | 27,40                          |
| P <sub>0,2</sub> | 25,99                          |
| P <sub>0,3</sub> | 27,30                          |
| P <sub>1,1</sub> | 42,80                          |
| P <sub>1,2</sub> | 43,31                          |
| P <sub>1,3</sub> | 43,92                          |
| P <sub>2,1</sub> | 50,32                          |
| P <sub>2,2</sub> | 57,81                          |
| P <sub>2,3</sub> | 37,95                          |

Fonte: Autoria própria



**Gráfico 1 - Resistência à Compressão Axial Centrada (MPa)**

Fonte: Autoria Própria.

O pilar P<sub>2,3</sub> foi excluído da amostra pois sua resistência foi cerca de 20% menor que a média dos pilares com duas camadas de fibra de carbono. A causa mais provável para esta diferença foi um erro de execução neste pilar, o que acarretou num descolamento da fibra próximo a base. Assim, a resistência média dos pilares em relação ao número de camadas é dada na tabela 5.

Tabela 5 - Resistência à compressão axial média (MPa)

| Pilar          | Resistência à Compressão Axial Centrada Média (MPa) |
|----------------|---|
| P <sub>0</sub> | 26,90   |
| P <sub>1</sub> | 43,34   |
| P <sub>2</sub> | 54,07   |

Fonte: Autoria própria

A partir dos resultados obtidos, encontrou-se para os pilares confinados com uma camada de fibra a relação (12) entre as resistências:

$$f_{cc_1 \text{ camada}} = 1,6134f_{co} \quad (12)$$

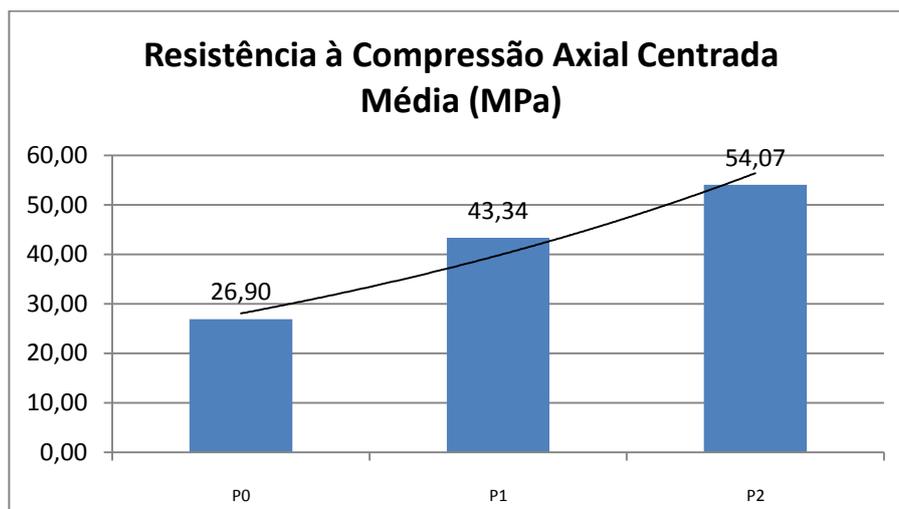
Para pilares confinados com duas camadas de fibra, foi encontrada a relação (13):

$$f_{cc_2 \text{ camadas}} = 2,0101f_{co} \quad (13)$$

## 6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os dados obtidos a partir do ensaio de compressão axial centrada é possível analisar que a utilização da fibra de carbono como um reforço estrutural aumenta a resistência à compressão.

No gráfico 2 estão mostradas as médias da resistência à compressão axial em relação ao número de camadas de fibra de carbono aplicadas. Observa-se que a aplicação de uma camada de reforço aumentou a resistência, em relação aos pilares sem reforço, em 61,2%, já a utilização de duas camadas de fibra de carbono aumentou a resistência em 101,1% (descartando-se o P<sub>2,3</sub>):



**Gráfico 2 - Resistência à Compressão Axial Centrada Média (MPa)**  
Fonte: Autoria Própria.

Comparando-se o ganho de resistência de uma camada de fibra, com duas, o aumento foi de 24,76%, o que mostra que o aumento de resistência não cresce linearmente ao número de camadas.

Observou-se que o rompimento do reforço, em todos os corpos de prova reforçados, ocorreu de maneira frágil e sempre na emenda da fibra de carbono e em uma das extremidades do pilar, conforme figura 15.



**Figura 15 - Pilar rompido na emenda do reforço**  
Fonte: Autoria própria

Utilizando os modelos experimentais apresentados na tabela 2, apresentada no capítulo 2.4, para o cálculo da resistência esperada com uma camada de fibra, têm-se os resultados, tabela 6.

**Tabela 6 - Resultados encontrados nos modelos experimentais**

| <b>Modelo Analítico</b>  | <b><math>f_{cc}</math><br/>(MPa)</b> |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Kono et al.(1998)        | 42,22                                |
| Toutanji (1999)          | 67,34                                |
| Saafi et al. (1999)      | 52,58                                |
| Spoelstra & Monti (1999) | 54,47                                |

**Fonte: Autoria Própria**

O modelo que mais se aproximou dos resultados encontrados nesta pesquisa foi o desenvolvido por Kono et al (1998 apud Carrazedo, 2002, p.68). Na tabela 7 estão apresentadas as relações entre a resistência à compressão axial média nos pilares com uma camada de fibra com os valores encontrados nos modelos.

**Tabela 7 - Diferença entre experimento e modelos**

| <b>Modelo Analítico</b> | <b>%</b> |
|-------------------------|----------|
| Kono et al.(1998)       | -2,59%   |
| Toutanji (1999)         | 55,38%   |
| Saafi et al. (1999)     | 21,31%   |
| Spoelstra&Monti (1999)  | 25,68%   |

**Fonte:Autoria própria**

Os modelos propostos por Toutanji (1998 apud Carrazedo, 2002, p.68), por Saafi et al. (1999 apud Carrazedo, 2002, p.68) e por Spoelstra & Monti (1999 apud Carrazedo, 2002, p.68) superestimam o ganho de resistência do reforço com uma camada de fibra, portanto vão contra a segurança dos usuários das edificações.

## 7 CONCLUSÕES

As principais conclusões desta pesquisa são:

- O aumento da resistência não é proporcional ao aumento do número de camadas, portanto, apesar de aumentar a resistência do concreto, o aumento médio para uma camada de fibra foi de 61,2% e para duas camadas de 101,1%, a eficiência vai diminuindo com o número de camadas, o aumento médio de uma para duas camadas foi de 24,8%.
- Comparando-se os resultados obtidos na pesquisa com os modelos encontrados na bibliografia, observou-se que três deles superestimam a resistência obtida com o reforço de fibra de carbono. Portanto conclui-se que os modelos existentes ainda são imprecisos e que, além de estudos mais aprofundados, são necessários coeficientes de segurança para o dimensionamento do reforço. Com os resultados obtidos com uma e duas camadas de fibra foram encontradas as relações (12) e (13), apresentadas no capítulo 6.1, para serem comparadas com resultados de trabalhos futuros.
- Conforme apresentado no capítulo 4.2, há limites para irregularidades aceitáveis no substrato, e foi possível concluir-se que a diferença nos valores encontrados pode ser decorrente das irregularidades nas faces dos pilares, que ocorreram possivelmente por alguma falha na execução dos modelos.
- Devido ao rompimento ter ocorrido sempre na emenda da fibra de carbono, concluiu-se que esse é um local crítico durante a aplicação do reforço, devendo-se tomar bastante cuidado e deixando-se as sobreposições necessárias para garantir-se a devida aderência entre a fibra e o concreto e entre as camadas de fibra.

Finalmente, concluiu-se que, o compósito de resina epóxi e fibra de carbono é bastante eficiente como reforço estrutural, acrescentando mais de 100% de resistência à compressão aos pilares de concreto armado quando confinados com duas camadas de fibra.

## 8 TEMAS SUGERIDOS PARA PESQUISAS FUTURAS

A área do reforço estrutural ainda carece de muitos estudos e análises, portanto, alguns temas que podem ser estudados em trabalhos futuros são:

- Análise da eficiência do reforço estrutural com fibra de carbono para mais camadas de fibra;
- Análise da eficiência do reforço estrutural com fibra de carbono para diferentes raios nas quinas dos pilares;
- Análise da eficiência do reforço estrutural com fibra de carbono para carga excêntrica;
- Análise da eficiência do reforço estrutural com fibra de carbono quando submetido à altas temperaturas.
- Análise da eficiência do reforço estrutural com fibra de carbono em pilares esbeltos.
- Análise da influência da largura do transpasse entre camadas de fibra na eficiência do reforço estrutural com fibra de carbono.
- Análise da viabilidade econômica do reforço estrutural com fibra de carbono.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440R-96: State-of-the-art Report on Fiber**. USA, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projetos e execução de obras em concreto armado**. Rio de Janeiro, 2003.

BEBER, Andriei José. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósito de Fibra de Carbono**. 2003. 317. Tese – UFRGS, Porto Alegre, 2003.

CALLISTER, William D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CARRAZEDO, Ricardo; **Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN; **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures**. Europa, 2001.

GRAZIANO, Francisco Paulo; **Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Armado**. São Paulo: O Nome Da Rosa Editora, 2005.

HIBBELER, Russel Charles. **Resistência dos Materiais 7ª Ed**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

JUVANDES, Luis Filipe Pereira; **Materiais Compósitos Reforçados com Fibra, FRP**. Portugal, 2002.

MACHADO, Ari de Paula; **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo: PINI, 2002.

MACHADO, Ari de Paula; **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo: Better, 2011.

NAKAMURA, Juliana; Reparo, reforço e recuperação de concreto. **Revista Técnica**, ed. 146, mai. 2009. Disponível em <<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/146/artigo139046-1.asp>> Acesso em: 14 out. 2012.

SAMAAN, M. ; MIRMIRAN, A. ; SHAHAWY, M. (1998). **Model of concrete confined by fiber composites**. *Journal of Structural Engineering*, v.124, p.1025-1031.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

WANG, Lei-Ming; WU, Yu-Fei; **Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test**. Hong Kong, 2007.

## **APÊNDICE A - Pilares Rompidos**

| Pilar            | Altura (mm) | Base (m <sup>2</sup> ) | kgf   | Mpa   |
|------------------|-------------|------------------------|-------|-------|
| P <sub>0,1</sub> | 600,00      | 0,01223                | 33500 | 27,40 |



| Pilar            | Altura (mm) | Base (m <sup>2</sup> ) | kgf   | Mpa   |
|------------------|-------------|------------------------|-------|-------|
| P <sub>0,2</sub> | 600,00      | 0,01202                | 31250 | 25,99 |



| Pilar            | Altura (mm) | Base (m <sup>2</sup> ) | kgf   | Mpa   |
|------------------|-------------|------------------------|-------|-------|
| P <sub>0,3</sub> | 600,00      | 0,01163                | 31750 | 27,30 |



| Pilar            | Altura (mm) | Base (m <sup>2</sup> ) | kgf   | Mpa   |
|------------------|-------------|------------------------|-------|-------|
| P <sub>1,1</sub> | 600,00      | 0,01180                | 50500 | 42,80 |



| Pilar            | Altura (mm) | Base (m <sup>2</sup> ) | kgf   | Mpa   |
|------------------|-------------|------------------------|-------|-------|
| P <sub>1,2</sub> | 600,00      | 0,01189                | 51500 | 43,31 |



| Pilar            | Altura (mm) | Base (m <sup>2</sup> ) | kgf   | Mpa   |
|------------------|-------------|------------------------|-------|-------|
| P <sub>1,3</sub> | 603,53      | 0,01298                | 57000 | 43,92 |



| Pilar            | Altura (mm) | Base (m <sup>2</sup> ) | kgf   | Mpa   |
|------------------|-------------|------------------------|-------|-------|
| P <sub>2,1</sub> | 601,10      | 0,01227                | 61750 | 50,32 |



| Pilar            | Altura (mm) | Base (m <sup>2</sup> ) | kgf   | Mpa   |
|------------------|-------------|------------------------|-------|-------|
| P <sub>2,2</sub> | 599,40      | 0,01185                | 68500 | 57,81 |



| Pilar            | Altura (mm) | Base (m <sup>2</sup> ) | kgf   | Mpa   |
|------------------|-------------|------------------------|-------|-------|
| P <sub>2,3</sub> | 598,90      | 0,01225                | 46500 | 37,95 |

