

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

ANA PAULA MENDES
NATHÁLIA CLIVATTI
SOPHIA KAROLINA DE ARAUJO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE
CARBONO UTILIZADOS COMO REFORÇO ESTRUTURAL EM
PILARES ESBELTOS DE CONCRETO ARMADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2016

ANA PAULA MENDES
NATHÁLIA CLIVATTI
SOPHIA KAROLINA DE ARAUJO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE
CARBONO UTILIZADOS COMO REFORÇO ESTRUTURAL EM
PILARES ESBELTOS DE CONCRETO ARMADO**

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

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Janine Nicolosi Corrêa

CURITIBA

2016

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE
CARBONO UTILIZADOS COMO REFORÇO ESTRUTURAL EM
PILARES ESBELTOS DE CONCRETO ARMADO**

Por

ANA PAULA MENDES
NATHÁLIA CLIVATTI
SOPHIA KAROLINA DE ARAUJO

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

Prof. Orientador: Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Profª. Co-orientadora: Janine Nicolosi Corrêa, Drª.
UTFPR

Prof. Amacin Rodrigues, Msc.
UTFPR

Agradecimentos

Agradecemos, primeiramente, ao nosso orientador, Prof. Dr. Wellington Mazer, pela disposição, auxílio e por ter compartilhado seu conhecimento que permitiu a realização deste trabalho.

À Prof^a. Janine Nicolosi Corrêa, pela orientação neste trabalho e pelo apoio e dedicação ao longo do curso.

Ao servidor da UTFPR, senhor Paulo Sabino, pelo auxílio operacional na realização dos ensaios.

À nossa família, aos amigos e colegas que nos incentivaram, apoiaram e estiveram presentes em todos os momentos, ajudando-nos a superar as dificuldades do caminho.

Agradecemos a todos que, de alguma forma, colaboraram para a construção desta pesquisa.

Por fim, agradecemos àquelas pessoas especiais que já se foram, mas deixaram seu legado de sabedoria em nossas vidas. Temos certeza que a conclusão deste trabalho seria motivo de muito orgulho para elas.

RESUMO

ARAUJO, Sophia K. de; CLIVATTI, Nathália; MENDES, Ana P. **Análise da eficiência de compósitos de fibra de carbono utilizados como reforço estrutural em pilares esbeltos de concreto armado.** 2016. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

As estruturas de concreto, em geral, possuem uma vida útil limitada, sendo que após este período pode ser necessário uma intervenção. Entretanto, muitas estruturas ainda jovens têm o período de vida útil reduzido devido a problemas patológicos. As peças esbeltas apresentam maior vulnerabilidade a ataques de agentes agressivos, pois podem não possuir reservas suficientes para enfrentá-los, além de serem mais flexíveis e conseqüentemente estarem suscetíveis a maiores deformações. O reforço de uma estrutura tem como principal finalidade a restauração da segurança e garantia da durabilidade durante sua vida útil. Os polímeros reforçados com fibras são uma alternativa para reforço de estruturas, pois apresentam propriedades como resistência à tração e à corrosão, baixo peso específico, bom amortecimento ao choque e isolamento eletromagnético. Porém, apesar disso, seu uso ainda não é muito difundido na construção civil. Nesse sentido, a utilização como reforço estrutural deve ser estudada nos diferentes componentes das estruturas, a fim de avaliar sua eficiência e propagar suas vantagens em relação a outros métodos, visto que ainda existe certa dificuldade de aceitação no mercado principalmente em relação ao custo. Esta pesquisa tem como finalidade analisar a eficiência dos compósitos de fibra de carbono utilizados como reforço estrutural em pilares esbeltos de concreto armado, através de ensaios de compressão em pilares sem reforço e com uma, duas e três camadas de reforço com fibra de carbono, cujo reforço é garantido pelo confinamento das peças. A fim de medir a deformação dos pilares, foram posicionados dois transdutores de deslocamento digitais em eixos perpendiculares à seção transversal. Analisou-se que há um incremento na capacidade de carga com a aplicação de uma camada fibra de carbono em relação ao pilar sem reforço, porém, a resistência não é crescente em função do aumento de camadas. Os pilares revestidos com fibra se mostraram mais dúcteis, tendo capacidade de reverter a deformação após o alívio da carga.

Palavras-chave: Compósitos de fibra de carbono. Reforço estrutural. Pilares esbeltos de concreto armado. Capacidade de carga.

ABSTRACT

ARAUJO, Sophia K. de; CLIVATTI, Nathália; MENDES, Ana P. **Analysis of the efficiency of carbon fiber components used as structural reinforcement in thin columns of reinforced concrete.**2016. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Concrete structures, in general, have a limited useful life, and after this period, an intervention is necessary. However, many structures while still young have their shelf life time reduced due to pathological problems. Slender pieces are more vulnerable to attack by aggressive agents, as they may not have enough reserves to deal with them, as well as being more flexible and consequently more susceptible to bigger deformation. The reinforcement of a structure has as main purpose the restoration of the safety and guarantee of the durability during its useful life. Fiber reinforced polymers are an alternative for reinforcing structures, as they have properties such as tensile strength, corrosion resistance, low specific weight, good shock damping and electromagnetic insulation. Despite this, its use is not yet widespread in civil construction. In this sense, its use as structural reinforcement must be studied in different components of structures, in order to evaluate its efficiency and to propagate its advantages in comparison to other methods, since there is still some difficulty of acceptance in the market mainly due to the cost. This research aims to analyze the efficiency of carbon fiber composites used as structural reinforcement in thin columns of reinforced concrete, through compression tests on columns without reinforcement and with one, two and three layers of carbon fiber, whose reinforcement is guaranteed by the confinement of the pieces. In order to measure the deformation of the columns, two digital meter clocks were positioned on the axes perpendicular to the transversal sections. It was analyzed that there is an increase in the load capacity with the application of one layer of carbon fiber compared to the column without reinforcement, however, the resistance does not increase with the addition of layers. The fiber-coated columns were more ductile, showing the ability to revert the deformation after the relief of the load.

Key words: Carbon fiber composites. Structural reinforcement. Thin columns of reinforced concrete. Load capacity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comprimentos de flambagem de acordo com as condições de apoio.....	19
Figura 2 - Relação momento fletor-curvatura	21
Figura 3 - Diagrama Tensão normal x Deformação específica das fibras.....	23
Figura 4 - Processo construtivo do sistema composto de fibra de carbono (CFRP) .	26
Figura 5 - Confinamento de pilares com sistemas compostos de fibra de carbono (CFRP).....	28
Figura 6 - Tensões normais e deformações específicas em sistemas não confinados e confinados.....	29
Figura 7 - Diagrama tensão normal x deformação específica (σ/ϵ) para vários graus de confinamento de sistemas compostos de fibra de carbono (CFRP)	30
Figura 8 - Seção transversal típica de pilares circulares	32
Figura 9 – Gráfico de tensão normal x deformação específica para diferentes tipos de confinamento	33
Figura 10 - Concretagem do pilar	37
Figura 11 - Cura dos corpos de prova de controle	38
Figura 12 - Aplicação do reforço	39
Figura 13 - Regularização dos pilares	39
Figura 14 - Eixos de deslocamento do pilar medidos pelos transdutores de deslocamento.....	40
Figura 15 - Ensaio de compressão centrada com transdutores de deslocamento....	41
Figura 16 - Pilares após a ruptura	54
Gráfico 1 - Curva de ganho de capacidade de carga com aumento de camadas de fibra.....	44
Gráfico 2 - Resistência média à compressão axial centrada (MPa).....	46
Gráfico 3 - Deslocamentos no eixo X dos pilares de referência (mm)	48
Gráfico 4 - Deslocamentos no eixo Y dos pilares de referência (mm)	49
Gráfico 5 - Deslocamentos no eixo X dos pilares com 1 camada (mm).....	49
Gráfico 6 - Deslocamentos no eixo Y dos pilares com 1 camada (mm).....	50
Gráfico 7 - Deslocamentos no eixo X dos pilares com 2 camadas (mm)	51
Gráfico 8 - Deslocamentos no eixo Y dos pilares com 2 camadas (mm)	51
Gráfico 9 - Deslocamentos no eixo X dos pilares com 3 camadas (mm)	52
Gráfico 10 - Deslocamentos no eixo Y dos pilares com 3 camadas (mm)	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensão, em MPa, resistida pelos corpos de prova	42
Tabela 2 - Carga, em kN, suportada pelos pilares	43
Tabela 3 - Ganho de resistência, em %, pelos pilares.....	45
Tabela 4 - Resistência à compressão axial centrada dos pilares, em MPa	46
Tabela 5 - Deslocamento dos pilares, em mm, no eixo X.....	47
Tabela 6 - Deslocamentos dos pilares, em mm, no eixo Y	47
Tabela 7 - Pressões laterais e resistências do concreto confinado	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades típicas da fibra de carbono à tração	27
--	----

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CFRP	Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (do original <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>)
FRP	Polímero Reforçado com Fibras (do original <i>Fiber Reinforced Polymer</i>)
GFRP	Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (do original <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
1.2	JUSTIFICATIVA	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	ELEMENTOS ESTRUTURAIS	14
2.1.1	Concreto armado	15
2.1.2	Pilares	16
2.1.3	Flambagem em pilares	17
2.1.4	Pilares esbeltos	19
2.2	POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS	22
2.2.1	Fibra de carbono	23
2.2.2	Resinas epóxi	25
2.2.3	Sistemas compostos de fibra de carbono	25
2.2.4	Reforço em pilares	28
2.2.5	Modelos de confinamento	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4	RESULTADOS E ANÁLISES	42
5	CONCLUSÃO	56
6	TEMAS SUGERIDOS PARA PESQUISAS FUTURAS	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado foi consolidado como um dos mais importantes materiais da engenharia estrutural no século XX, mas as estruturas em geral possuem uma vida útil limitada, sendo que após este período é necessário uma intervenção. Entretanto, muitas estruturas ainda jovens têm o período de vida útil reduzido devido a diversos problemas patológicos, que podem ser provenientes de falhas de execução, projeto, uso inadequado de materiais, aplicação de cargas excepcionais, entre outros casos (BEBER, 2003).

Com o desenvolvimento dos materiais de construção e do cálculo das estruturas, houve uma maior preocupação com a racionalização dos materiais, utilizando as dimensões mínimas seguras das estruturas e fazendo com que surgissem mais soluções estruturais com peças esbeltas, que possuem a vantagem, dentre outras, de serem mais leves. Porém, estas estruturas também estão mais vulneráveis a ataques de agentes agressivos, pois podem não possuir reservas suficientes para enfrentá-los, além de serem mais flexíveis e conseqüentemente estarem suscetíveis a maiores deformações. Estes são alguns dos motivos para o desenvolvimento de estudos das manifestações patológicas nestas estruturas (CÁNOVAS, 1988).

O reparo de uma estrutura através do reforço tem como principal finalidade a restauração da segurança e garantia da durabilidade durante sua vida útil, e tem sido comum devido a razões como o aumento da esbeltez da estrutura, maiores e mais intensas solicitações, agressividade ambiental mais elevada, maior conhecimento de responsabilidade pela manutenção, mudança no uso para o qual a construção foi projetada, inviabilidade da reconstrução, importância do imóvel, dentre outras razões (HELENE, 1992).

Os problemas apresentados por uma estrutura pouco resistente ou danificada, em que será necessário executar reforço ou reparo, podem ser variados e complexos. Com isso, é de extrema importância conhecer o comportamento das estruturas em relação aos diversos problemas que elas podem apresentar e as soluções adotadas, para assim devolver a estabilidade perdida de uma maneira mais eficaz (CÁNOVAS, 1988).

Existem diferentes técnicas e materiais para solucionar os problemas das estruturas de concreto armado através de reforço, como os compósitos de fibra de vidro, compósitos de fibra de carbono, resinas epóxi, concreto armado, cintamento, perfis metálicos, entre outros (CÁNOVAS, 1988).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é analisar a eficiência dos compósitos de fibra de carbono utilizados como reforço estrutural em pilares esbeltos de concreto armado.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo consistem em:

- a) Avaliar o incremento da capacidade de carga a partir do aumento das camadas de fibra;
- b) Desenvolver uma curva de ganho de resistência (%) x número de camadas de reforço;
- c) Comparar os resultados obtidos com os resultados gerados pelas equações teóricas para o confinamento de pilares com fibra de carbono.

1.2 JUSTIFICATIVA

Muitas estruturas construídas no passado estão evidenciando efeitos de envelhecimento e o fim de seu período de vida útil. Além disso, estruturas que ainda estão no começo da vida útil já apresentam indícios de degradação prematura. Em

ambos os casos, surge a necessidade de intervenções visando principalmente a segurança e garantia da durabilidade durante a vida útil. Este é um dos motivos pelo qual se deve dar grande importância ao estudo das manifestações patológicas e à recuperação de estruturas.

O surgimento de novas tecnologias em materiais e métodos de reforço traz consigo a necessidade de novos estudos de sua eficiência e viabilidade. O uso de compósitos para reforço de estruturas na construção civil ainda não é muito difundido, enquanto que na indústria automobilística, aero-espacial, ferroviária e naval estes materiais são utilizados em larga escala na execução de estruturas. Devido a isso, profissionais da engenharia civil começaram a mostrar interesse pelos polímeros reforçados com fibras, de sigla internacional FRP: "*Fiber Reinforced Polymer (or Plastic)*", que apresentam propriedades como resistência à tração e à corrosão, baixo peso específico, bom amortecimento ao choque e isolamento eletromagnético.

Nesse sentido, o uso de fibra de carbono como reforço estrutural deve ser estudado nos diferentes tipos componentes das estruturas a fim de avaliar sua eficiência e propagar suas vantagens em relação a outros métodos, como rapidez e facilidade de execução, visto que ainda existe certa dificuldade de aceitação no mercado principalmente em relação ao custo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Segundo Clímaco (2008), estrutura é o conjunto das partes resistentes de uma edificação. A superestrutura de uma edificação se subdivide em três categorias, de acordo com a finalidade e a responsabilidade na segurança da edificação:

a) Estrutura terciária: sua finalidade é de suportar a aplicação direta das cargas distribuídas em superfície. É composta pelas lajes.

b) Estrutura secundária: confere resistência localizada às diferentes partes da construção. Recebe cargas diretas ou apenas as reações da estrutura terciária. É composta pelas vigas.

c) Estrutura primária: tem a finalidade de garantir a resistência global da construção. É composta pelos pilares (FUSCO, 1976apud CLÍMACO, 2008).

As estruturas de concreto são muito utilizadas pelo fato de serem otimizadas do ponto de vista estrutural e econômico. Entretanto, são mais sensíveis a qualquer defeito dos materiais, da execução ou do cálculo, podendo gerar situações de risco. Atualmente as estruturas de concreto armado possuem maiores riscos de apresentar um quadro patológico do que as mais antigas, pois eram dimensionadas com uma margem de segurança superior (BEBER, 2003).

Durante o processo de fabricação de concreto, pequenas variações em sua composição, como quantidade de agregado, consumo de cimento e relação água/cimento, podem determinar se o concreto será durável ou vulnerável (SOUZA e RIPPER, 1998). Depois de consolidada a estrutura, é difícil reajustar o concreto, principalmente em relação à sua capacidade de carga (JUVANDES, 1999).

Modificações, envelhecimento natural e a deterioração por meio de ações de agentes agressivos alteram as condições iniciais consideradas no projeto original (BEBER, 2003). Estes aspectos podem contribuir para que o período de vida útil previsto seja atingido pelas estruturas de concreto armado antecipadamente. A manutenção das estruturas é de extrema importância para manter a durabilidade e vida útil destas estruturas (JUVANDES, 1999).

2.1.1 Concreto armado

O concreto armado é, conceitualmente, um material composto pela associação do concreto simples com uma armadura passiva, ou seja, a armadura só trabalha se houver solicitação, sendo que ambos resistem solidariamente aos esforços submetidos pela peça. Esta ação conjunta é garantida pela aderência concreto – aço, não havendo deslizamento ou escorregamento relativo no momento da solicitação, garantindo o comportamento monolítico (CLÍMACO, 2008).

A perfeita aderência entre o concreto e a armadura, tanto pela semelhança entre coeficientes de dilatação térmica quanto pela proteção química e física oferecida pelo concreto às armaduras, garante a viabilidade do concreto armado, tornando-o um material viável, com grande durabilidade e confiável (SÜSSEKIND, 1987).

As principais características estruturais do concreto armado, segundo Carvalho e Filho (2014), são:

- a) Boa resistência à maioria das solicitações;
- b) Boa trabalhabilidade, que garante a adaptação às diversas formas;
- c) Estrutura monolítica, pela aderência entre o concreto e o aço;
- d) Material com durabilidade e resistência ao fogo superiores à madeira e ao aço, desde que bem executado e de acordo com as normas;
- e) Resistência a choques, vibrações, efeitos térmicos, atmosféricos e desgastes mecânicos;
- f) Peso próprio elevado, devido ao alto peso específico do concreto (em torno de 25 kN/m³), o que pode limitar o uso e elevando o custo;
- g) Necessário sistema de formas, escoramentos e processo de cura;
- h) Dificuldade na execução de reformas e intervenções.

De acordo com Carvalho e Filho (2014), as propriedades do concreto fresco são a consistência, a trabalhabilidade e a homogeneidade, que auxiliam na garantia, no estado endurecido, de propriedades como a resistência à tração e à compressão.

Devido à inexistência de uma única lei que determine, a partir de um ensaio do elemento submetido a uma solicitação, a resistência do material à todas as solicitações possíveis, considera-se por aproximação a resistência do concreto para diversas solicitações como função da resistência à compressão, obtida em ensaios.

Porém, nas construções, o elemento está sujeito a algumas ações, como o peso próprio, atuando de forma permanente, o que reduz a resistência ao longo do tempo, o mesmo não acontece durante os ensaios de um corpo de prova, cuja aplicação da carga é feita de forma rápida (CARVALHO e FILHO, 2014).

A norma brasileira utilizada para projeto de estruturas de concreto é a NBR 6118/2014, que estabelece as exigências básicas para projetos de estruturas de concreto simples, armado e protendido, exceto os que empregam concretos leves, pesados ou especiais. Segundo esta norma, as estruturas de concreto devem atender aos requisitos de: capacidade resistente, desempenho em serviço e durabilidade. A capacidade resistente consiste na segurança à ruptura. O desempenho se refere ao material manter as condições de utilização durante a vida útil, não apresentando danos que comprometam o uso previsto no projeto, desde que seja feita a manutenção prescrita. E a durabilidade é a resistência às influências ambientais previstas (ABNT, 2014).

2.1.2 Pilares

A NBR 6118/2014 define os elementos estruturais básicos de acordo com a sua forma geométrica e função estrutural. Os pilares são considerados como “elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes”. Os elementos lineares são aqueles em que o comprimento longitudinal é pelo menos três vezes maior que a dimensão da seção transversal (ABNT, 2014).

Os esforços atuantes nas vigas e lajes de uma construção são transferidos para os pilares, e assim são transmitidos dos andares superiores para os elementos inferiores até a fundação (PINHEIRO, 2007).

De acordo com Clímaco (2008), os pilares são essenciais à segurança global de uma estrutura, pois fazem parte da estrutura primária da superestrutura de uma edificação. A força normal e o momento fletor são predominantes nesses elementos, denominadas solicitações normais. A classificação a seguir leva em conta a consideração ou não do momento fletor para cálculo do pilar:

a) Compressão centrada: não há consideração do momento fletor para pilares curtos, apenas as forças normais (paralelas ao eixo longitudinal) solicitam a estrutura;

b) Flexão composta: atuam em conjunto a força normal e o momento fletor. Levando em consideração a atuação do momento fletores relação aos eixos principais de inércia da seção, tem-se:

b.1) Flexão composta plana: momentos fletores atuando em um dos eixos principais;

b.2) Flexão composta oblíqua: momentos fletores atuando nos dois eixos principais.

A flexão composta é predominante em pilares de edifícios de forma absoluta. Devido ao refinamento dos métodos de cálculo, as normas passaram a exigir o cálculo de pilares à flexão composta, com a consideração, em peças esbeltas, dos efeitos de 2ª ordem, em que o equilíbrio é analisado a partir da configuração deformada das peças estruturais (CLÍMACO, 2008).

2.1.3 Flambagem em pilares

A flambagem é um fenômeno que pode causar a instabilidade de equilíbrio de uma peça com predominância da compressão, podendo causar ruptura. É um efeito de 2ª ordem, quando a análise do equilíbrio passa a ser efetuada com a consideração da configuração deformada, adicionados aos obtidos na análise de primeira ordem (em que o equilíbrio da estrutura é estudado na configuração geométrica inicial). O parâmetro de referência dos efeitos da flambagem é o índice de esbeltez (λ) (CLÍMACO, 2008).

De acordo com o item 15.8.1 da NBR 6118/2014, os pilares devem ter índice de esbeltez menor ou igual a 200, podendo ser maior apenas nos casos de elementos pouco comprimidos com força normal determinada pela equação (1) (ABNT, 2014).

$$f_n \leq 0,10 \times f_{cd} \times A_c \quad (1)$$

Em que:

f_n é a força normal;

f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto;

A_c é a área da seção transversal.

Os pilares podem ser classificados de acordo com a sua esbeltez como:

- a) Pilares curtos: $\lambda \leq 35$;
- b) Pilares moderadamente esbeltos: $35 < \lambda \leq 90$;
- c) Pilares esbeltos: $90 < \lambda \leq 140$;
- d) Pilares muito esbeltos: $140 < \lambda \leq 200$ (SILVA, 2010).

A NBR 6118/2014 determina que o valor limite para o índice de esbeltez (λ_1), para desprezar os esforços locais de 2ª ordem em elementos isolados, é $35 \leq \lambda_1 \leq 90$ e pode ser calculado pela equação (2) (ABNT, 2014).

$$\lambda_1 = \frac{25 + 12,5 \times e_1/h}{\alpha_b} \quad (2)$$

Onde, de acordo com a NBR 6118/2014:

e_1/h é a excentricidade relativa de 1ª ordem;

α_b é um coeficiente relacionado com a vinculação dos extremos da coluna isolada.

Segundo a NBR 6118/2014, no item 15.8.2, o índice de esbeltez (λ) é calculado pela equação (3) (ABNT, 2014).

$$\lambda = \frac{l_e}{i} \quad (3)$$

De acordo com Clímaco (2008):

l_e é o comprimento de flambagem do pilar;

i representa o raio de giração da seção em relação a um eixo baricêntrico.

O comprimento de flambagem depende das condições de apoio, ilustrados na figura (1) (CLÍMACO, 2008).

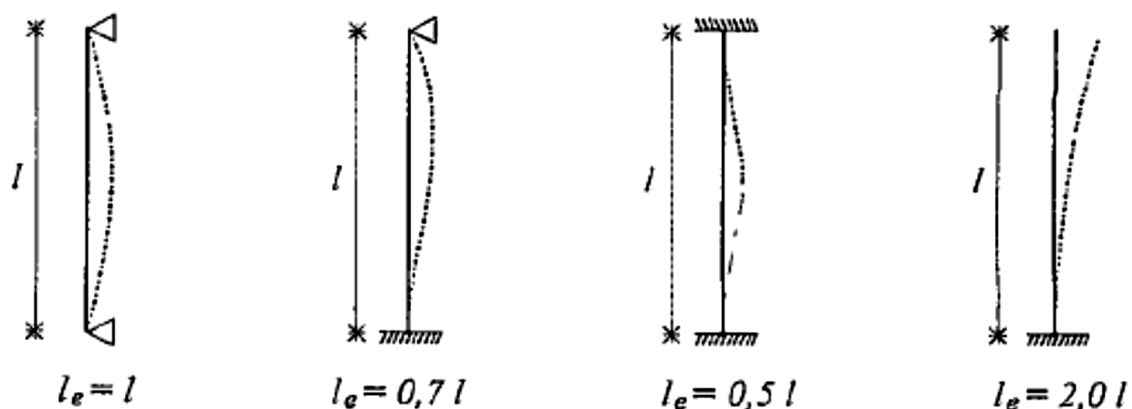


Figura 1 - Comprimentos de flambagem de acordo com as condições de apoio

Fonte: Clímaco(2008).

O cálculo do raio de giração pode ser determinado pela equação (4) (CLÍMACO, 2008).

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (4)$$

Em que I é o momento de inércia da seção em relação a um eixo baricentral e A é a área da seção transversal. O pilar estará mais sujeito a flambagem em torno do eixo de momento de inércia mínimo, sendo este o eixo para o qual se obtém o valor da área da seção transversal (CLÍMACO, 2008).

2.1.4 Pilares esbeltos

A consideração da fluência e do efeito das deformações de segunda ordem é obrigatória para pilares esbeltos, conforme o item 15.8.4 da NBR 6118/2014 (ABNT, 2014). De acordo com Clímaco (2008), fluência ou deformação lenta são as deformações que ocorrem no concreto ao longo do tempo, mesmo sob a atuação de cargas constantes, podendo causar excentricidade em pilares. A consideração da fluência pode ser efetuada de maneira aproximada de acordo com a equação (5) (ABNT, 2014).

$$e_{cc} = \left(\frac{M_{sg}}{N_{sg}} + e_a \right) \times \left(2,718^{\frac{\phi N_{sg}}{N_e - N_{sg}}} - 1 \right) \quad (5)$$

Em que N_e é determinado pela equação (6).

$$N_e = \frac{10 \times E_{ci} \times I_c}{\ell_e^2} \quad (6)$$

Sendo:

e_{cc} : excentricidade adicional;

e_a : excentricidade devida a imperfeições locais;

M_{sg} e N_{sg} : esforços solicitantes devidos à combinação quase permanente;

ϕ : coeficiente de fluência;

E_{ci} : módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal;

I_c : momento de inércia da seção do concreto;

ℓ_e : comprimento de flambagem.

Os efeitos de 2ª ordem em pilares com $\lambda \leq 140$ são avaliados através do método do pilar-padrão ou pilar-padrão melhorado acoplado a diagramas M (momento fletor), N (força normal) e $1/r$ (raio de curvatura). De acordo com a NBR 6118/2014, para o cálculo dos efeitos de 2ª ordem, pode ser utilizada a formulação de segurança (7) (ABNT, 2014).

$$S_{d,tot} = \gamma_{f3} \times S(F) \quad (7)$$

Em que F é calculado pela equação (8).

$$F = \left[\frac{\gamma_f}{\gamma_{f3}} \times F_{gk} + \frac{\gamma_f}{\gamma_{f3}} \left(F_{q1k} + \sum_2^n \Psi_{0j} \times F_{qjk} \right) \right] \quad (8)$$

Com:

$S_{d,tot}$: solicitação total de projeto;

γ_{f3} : coeficiente de majoração de cargas, com o valor de 1,1;

γ_f e Ψ_{0j} : coeficientes de majoração das ações;
 F_{gk} : valor característico das ações permanentes diretas;
 F_{q1k} : valor característico da ação variável direta principal;
 F_{qjk} : valor característico das ações variáveis diretas.

A escolha da combinação de ações e dos coeficientes γ_f e Ψ_0 pode ser determinada através da NBR 6118/2014. Assim, a relação momento-curvatura apresenta o aspecto da figura (2) (ABNT, 2014).

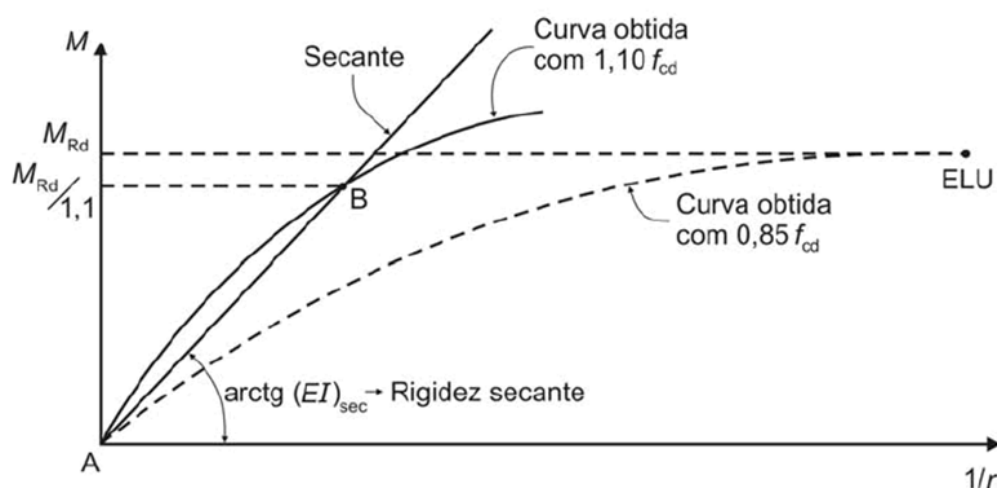


Figura 2 - Relação momento fletor-curvatura

Fonte: NBR 6118/2014

Para o efeito das imperfeições locais, no caso de verificação do estado-limite último ou dimensionamento de um lance de pilar, deve ser considerado o desaprumo ou falta de retilineidade do eixo do pilar. Este efeito nos pilares pode ser substituído, em estruturas reticuladas, pela consideração do momento mínimo de 1ª ordem, que pode ser obtido de acordo com a equação (9). A este momento devem ser adicionados os momentos de 2ª ordem (ABNT, 2014).

$$M_{1d,min} = N_d \times (0,015 + 0,03 \times h) \quad (9)$$

Em que:

$M_{1d,min}$ é o momento mínimo de primeira ordem;

N_d é a solicitação normal de cálculo;

h representa a altura total da seção transversal na direção considerada, expressa em metros.

2.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS

Os FRP (*fiber reinforced polymer*) são exemplos de materiais utilizados como reforço estrutural, apresentando propriedades como leveza, resistência à tração e à corrosão. Os polímeros reforçados com fibras podem ser fabricados em perfis laminados finos, que são envolvidos com resina polimérica na estrutura sem prejudicá-la esteticamente (ACI, 2008). São bastante aplicáveis como reforço estrutural por reduzirem o tempo e o custo de execução do serviço, já que não requerem equipamentos pesados em sua aplicação. Este tipo de compósito pode ser aplicado como uma placa fina ou em camadas (BALAGURU et al., 2009). Também tem a vantagem da possibilidade de uso em áreas com acesso limitado, onde os reforços tradicionais enfrentariam dificuldade de aplicação (ACI, 2008).

Os compósitos sintéticos mais utilizados como reforço são os de fibras de vidro, fibra de carbono e fibras de aramida, e como matriz, os termorrígidos. Dentre as matrizes termorrígidas, as resinas epóxi têm maior custo, mas apresentam propriedades mecânicas e resistências ao calor e umidade superiores às resinas poliéster (NETO e PARDINI, 2006).

É possível combinar dois ou mais tipos de fibras a fim de obter propriedades melhoradas, por exemplo, a fibra de carbono intensifica o módulo de elasticidade e resistência à tração dos compostos de fibra de vidro (GFRP). Do mesmo modo, a energia de impacto do composto de fibra de carbono (CFRP) é aumentada quando combinada com fibras de vidro ou aramida (HANCOX, 1981; SHAN e LIAO, 2002 apud BALAGURU et al., 2009).

Os reforços fibrosos são usados para melhorar a rigidez e a resistência mecânica da matriz, além de conferir estabilidade dimensional e bom desempenho a temperaturas elevadas (FREIRE et al., 1994). A figura (3) compara diagramas de tensão normal x deformação específica de fibras de diferentes materiais.

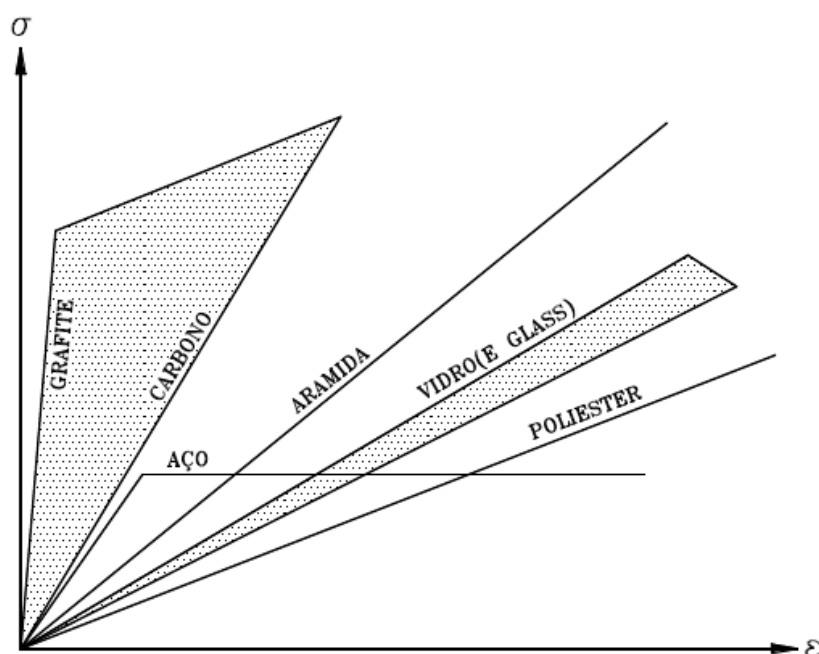


Figura 3 - Diagrama Tensão normal x Deformação específica das fibras
Fonte: Machado (2002).

Nota-se no diagrama que o módulo de elasticidade da fibra de carbono é bastante similar ao do aço no regime elástico, porém, com o aumento da tensão, possui uma deformação elástica levemente inferior ao do aço.

O módulo de elasticidade das fibras é diretamente proporcional à temperatura aplicada do processo de produção, podendo variar entre 100 GPa e 300 GPa para fibras de carbono e até 650 GPa para fibras de grafite (MACHADO, 2002).

2.2.1 Fibra de carbono

A fibra de carbono é um material com excepcionais características mecânicas, resultado da carbonização de fibras de polímeros orgânicos, cujo processamento requer temperaturas na ordem de 3000° C, na qual a maioria das fibras se desintegraria. Porém, isto não acontece com certas fibras, que mantêm sua estrutura molecular e ocorre o alinhamento dos átomos de carbono ao longo das fibras originais. Um agrupamento da ordem de milhares desses filamentos forma

uma estrutura com elevado módulo de elasticidade, semelhante ao aço de construção e elevada resistência à tração, sendo estas características mecânicas dependentes da estrutura molecular obtida. Os compósitos de fibras de carbono são mais empregados como reforço de estruturas (SOUZA e RIPPER, 1998).

Os sistemas compósitos que utilizam a fibra de carbono apresentam como propriedades elevada resistência mecânica, resistência a diversos ataques químicos, proteção contra a corrosão, por serem inertes, estabilidade térmica e reológica, bom comportamento à atuação de cargas cíclicas, extrema leveza (com peso específico na ordem de 1,8 g/cm³), dentre outras. Em alguns tipos de fibra de carbono, o coeficiente de dilatação térmica é negativo, o que faz o composto sofrer contração com o aumento da temperatura e dilatação quando há diminuição da mesma; essa propriedade varia de acordo com o tipo e volume de fibra empregado no composto, também com o tipo de resina vinculado (MACHADO, 2002).

Os três materiais mais utilizados comercialmente para a fabricação de fibra de carbono são: *rayon*, poliacrilonitrila (PAN) e piche de petróleo. *Rayon* é um material derivado da celulose, cuja taxa de conversão em fibra de carbono é aproximadamente 25%, mas é utilizado devido a sua vasta disponibilidade apesar de ser o mais caro dos materiais citados. A poliacrilonitrila gera a fibra com a maior resistência à tração em virtude de sua superfície ser mais uniforme e sem defeitos; a taxa de conversão desse material chega a 55%. Já o piche tem a maior concentração de carbono em sua composição natural, o que, por consequência, gera a maior taxa de conversão em fibra de carbono; apesar do baixo custo, o piche não garante uniformidade entre as produções (HANSEN, 1987; PEBLY, 1987; MALLICK, 1993 apud BALAGURU et al., 2009).

As fibras de carbono podem ser utilizadas em vigas e lajes, para aumento da resistência à flexão e ao esforço transversal, porém deve-se ter o estudo das tensões de deslizamento na interface compósito-concreto e adotar sistema de amarração do compósito (SOUZA e RIPPER, 1998). As técnicas mais usuais para o reforço com este compósito são a colagem exterior, chamada de EBR (*External Bonded Reinforcement*) e, a colagem num rasgo, denominada NRS (*Near-surface Mounted Reinforcement*), ambas considerando a hipótese de pré-reforço do material (JUVANDES, 2011).

2.2.2. Resinas epóxi

As resinas epóxi são termorrígidos de alto desempenho que contêm por molécula pelo menos dois grupos epóxi terminais (grupos oxirano ou etoxilina). A alta viscosidade destas resinas à temperatura ambiente permite a maior facilidade de moldagem em superfícies complexas (NETO e PARDINI, 2006).

Vários agentes de cura são utilizados no processamento de resinas epóxi, e são os responsáveis pelo tipo de reação de cura que ocorre. Isto influencia a cinética de cura e o ciclo de processamento (viscosidade em função do tempo) e a gelação, o que afeta as propriedades do material curado (NETO e PARDINI, 2006).

Os endurecedores são agentes de cura utilizados no processamento da resina. A relação epóxi/endurecedor afeta, após a cura, a transição vítrea, o módulo de elasticidade e a resistência mecânica. A resistência à tração de sistemas epóxi curados variam de 40 MPa a 90 MPa, enquanto o módulo de elasticidade varia de 2,5 GPa a 6,0 GPa, com a deformação de ruptura variando de 1% a 6% e a resistência à compressão de 100 MPa a 220 MPa (NETO e PARDINI, 2006).

A temperatura de transição vítrea é caracterizada a partir da qual o polímero começa a “amolecer” e muda a sua estrutura molecular, o que acarreta na diminuição expressiva do seu módulo de elasticidade. Quando associada à fibra de carbono, a resina pode suportar maiores temperaturas, porém perde eficiência em sua função como colante, ocasionando a redução da resistência à tração do composto como um todo (MACHADO, 2002).

2.2.3. Sistemas compostos de fibra de carbono

O sistema composto de fibra de carbono é um dos tipos de Polímero Reforçado com Fibras, da sigla FRP. Os sistemas FRP são abordados na norma americana ACI 440.2R-08. Trata-se de uma norma que orienta sobre o uso do sistema, propriedades dos materiais, recomendação para o projeto, construção e inspeção do sistema de reforço (ACI, 2008).

Dois elementos principais são necessários para se formar um sistema compósito: a matriz polimérica, cuja função é dar coesão às fibras e transferir as tensões cisalhantes entre os elementos estruturais, e um elemento estrutural em si, neste caso a fibra de carbono, que atua absorvendo as tensões de tração geradas pelos esforços solicitantes, que não são absorvidas pelo elemento de concreto armado (MACHADO,2002). Segundo Juvandes (2011), o composto *FRP (Fiber Reinforced Polymer)* só existe após a polimerização da resina aplicada *“in situ”* com a fibra de carbono junto ao elemento estrutural de concreto.

O processo construtivo de um composto de fibra de carbono (CFRP) é apresentado na figura (4).

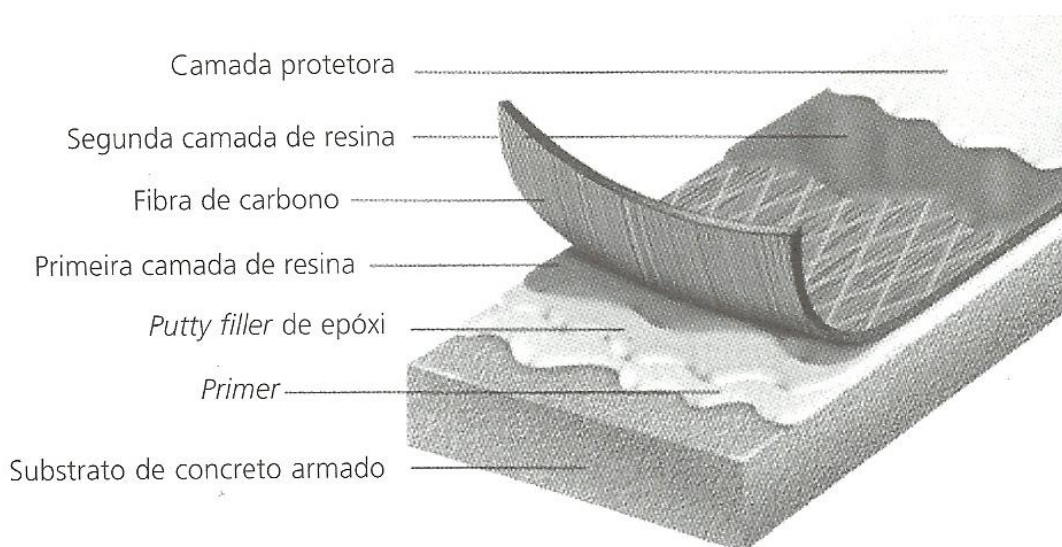


Figura 4 - Processo construtivo do sistema composto de fibra de carbono (CFRP)

Fonte: Machado (2002).

Deve-se seguir as etapas de construção descritas por Machado (2002):

- a) Recuperação do substrato de concreto armado para garantir a aderência;
- b) Imprimação da superfície para estabelecimento de uma ponte de aderência entre o substrato e o compósito, com um imprimador epoxídico (*primer*);
- c) Estabelecimento de um plano nivelado através de uma pasta epoxídica (*putty filler*), corrigindo imperfeições superficiais;

- d) Aplicação da primeira camada de resina saturante, a fim de impregnar a fibra de carbono e aderi-la à superfície;
- e) Aplicação da lâmina de fibra de carbono;
- f) Aplicação de segunda camada da resina saturante, conformando a matriz epoxídica;
- g) Aplicação opcional de uma película protetora, resistente à corrosão, garantindo o acabamento.

É importante que o sistema seja executado seguindo o critério que a fibra tenha ruptura frágil e a matriz polimérica ruptura dúctil, deste modo a matriz de polímero permite à fibra ter capacidade de carga mesmo após atingir sua tensão de ruptura (MACHADO, 2002).

Segundo Machado (2002), a norma Americana ACI - 440.2R-08 relaciona as propriedades dos compostos de fibra de carbono (CFRP) à tração, conforme apresentado no quadro (1).

Quadro 1 - Propriedades típicas da fibra de carbono à tração

Tipo da fibra de carbono	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência máxima de tração (MPa)	Deformação específica de ruptura (%)
De uso geral	220-235	<3790	>1,2
Alta resistência	220-235	3790-4825	>1,4
Ultra alta resistência	220-235	4825-6200	>1,5
Alto módulo	345-515	>3100	>0,5
Ultra alto módulo	515-690	>2410	>0,2

Fonte: Machado (2002).

De acordo com os estudos de Machado (2002), para que os sistemas compostos de fibra de carbono(CFRP) sejam eficientes, deve-se garantir a integridade do substrato de concreto a receber o reforço, para que recebam e transfiram os esforços na interface concreto/compósito.

2.2.4. Reforço em pilares

O reforço com compostos de fibras de carbono (CFRP) pode ser utilizado em pilares, para aumentar a resistência e ductilidade. O reforço é garantido pelo confinamento, proporcionado pela colocação das fibras transversalmente ao eixo (ACI, 2008). O confinamento de pilares está ilustrado na figura (5).



Figura 5 - Confinamento de pilares com sistemas compostos de fibra de carbono (CFRP)

Fonte: Machado (2002).

No confinamento do concreto pela orientação transversal, a ação das fibras é semelhante à do aço e as fibras colocadas longitudinalmente tem contribuição desconsiderada para a ação axial (ACI, 2008).

Com a compressão axial nos pilares, ocorrem deformações radiais, pelo efeito de Poisson, com expansão lateral. Para baixas deformações longitudinais, a deformação transversal é proporcional ao coeficiente de Poisson e o comportamento

do concreto continua elástico. Para valores críticos da tensão longitudinal, as fissuras formadas na pasta de concreto aumentam as deformações transversais para pequenos acréscimos da tensão longitudinal. Este súbito incremento da deformação resulta em rápida expansão volumétrica. É ilustrado na figura (6) o comportamento da peça em sistemas não confinados e confinados (MACHADO, 2002).

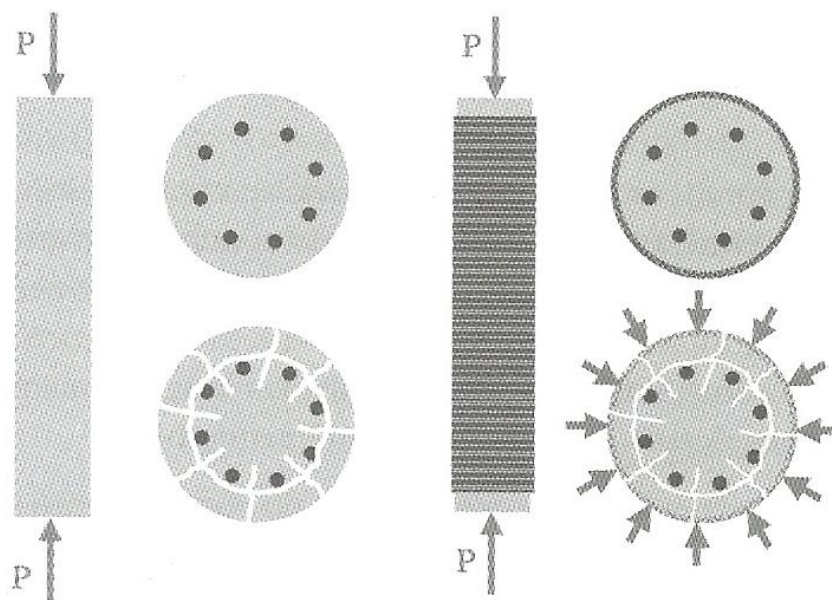


Figura 6 - Tensões normais e deformações específicas em sistemas não confinados e confinados

Fonte: Machado (2002).

Com o envolvimento do concreto pelas fibras de carbono, a resistência à tração das fibras induz uma pressão de confinamento, cujo efeito é o de induzir tensões triaxiais no concreto. Para baixas tensões longitudinais, as deformações são baixas, assim, as fibras de carbono produzem um pequeno confinamento. Porém, para tensões acima do valor crítico, o aumento na deformação transversal é significativo, fazendo com que a pressão de confinamento seja alta (MACHADO, 2002).

O concreto confinado tem uma resposta bilinear para tensão/deformação (σ/ϵ). No início, o comportamento tensão/deformação (σ/ϵ) não difere do sistema não confinado. Porém, próximo da tensão máxima para o concreto não confinado, as

tensões no concreto confinado continuam a aumentar juntamente com as deformações. O incremento é proporcional ao grau de confinamento, conforme ilustrado na figura (7) (MACHADO, 2002).

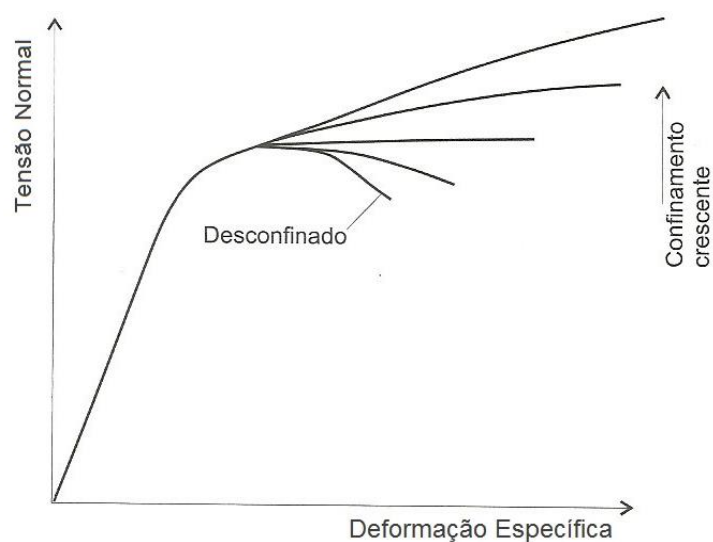


Figura 7 - Diagrama tensão normal x deformação específica (σ/ϵ) para vários graus de confinamento de sistemas compostos de fibra de carbono (CFRP)

Fonte: Machado (2002).

Em pilares de pontes e viadutos, os compósitos estruturados com fibras de carbono são utilizados para a melhora do desempenho, visto que há comprovado aumento na ductilidade destes elementos quando reforçados, em sistema confinante (SOUZA e RIPPER, 1998).

De acordo com Machado (2002), as seções transversais circulares são as mais eficientes para a utilização do reforço com sistemas compostos de fibras de carbono (CFRP), pois estes estabelecem uma pressão uniformemente distribuída ao longo da circunferência.

Segundo Machado (2002), para um pilar de seção circular, existem duas contribuições para o cálculo da pressão de confinamento pelos sistemas compostos de fibras de carbono (CFRP):

- a) Pressão devido ao sistema escolhido;
- b) Pressão devido aos estribos existentes.

Considerando separadamente, de acordo com Machado (2002), a norma ACI-440.2R-08 recomenda o uso da equação (10) para o cálculo da pressão lateral devida ao sistema composto de fibra de carbono (CFRP).

$$f_l = \frac{k_a \times \rho_f \times f_{fe}}{2} \quad (10)$$

Sendo:

f_l a pressão lateral devido ao sistema composto de fibra de carbono (CFRP);

k_a o coeficiente de redução da eficiência da fibra;

f_{fe} a tensão de tração nas fibras de carbono.

O valor de k_a é unitário para seções circulares e ρ_f é determinado pela equação (11).

$$\rho_f = \frac{4 \times n \times t_f}{h} \quad (11)$$

Em que:

n é o número de camadas de fibras de carbono;

t_f é a espessura de uma camada da fibra;

h é o diâmetro do pilar, como indicado na figura (8).

O valor de f_{fe} pode ser calculado pela equação (12).

$$f_{fe} = \xi_{fe} \times E_f \quad (12)$$

Sendo:

ξ_{fe} a deformação específica longitudinal;

E_f o módulo de elasticidade da fibra.

Substituindo a equação (11) em (10), obtém-se a equação (13).

$$f_l = \frac{2 \times n \times t_f \times f_{fe}}{h} \quad (13)$$

Para determinar o valor de f_{fe} , considera-se que a deformação longitudinal (ξ_{fe}) vale 0,004 e o módulo de elasticidade da fibra de uso geral (sistema Mbrace™) vale 23.500 kN/cm² (MACHADO, 2002).

É exemplificado na figura (8) uma seção transversal típica de pilares circulares.

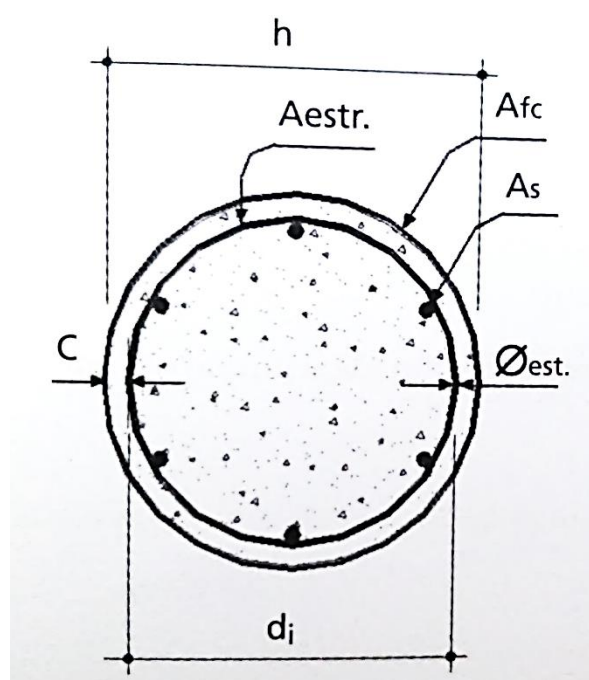


Figura 8 - Seção transversal típica de pilares circulares

Fonte: Machado (2002).

2.2.5. Modelos de confinamento

De acordo com os estudos de Henriques (2015), o confinamento de pilares de concreto traz uma melhora na resistência à compressão, à flexão e à força cortante. O confinamento pode ser feito com armaduras transversais, chapas metálicas ou com FRP. Richard et al. (1928) apud Henriques (2015), conduziram os

primeiros estudos sobre o tema, propondo equações relacionando a pressão lateral trazida pelo confinamento com a resistência (f_{cc}) e a deformação última (ε_{cc}) do concreto confinado, respectivamente apresentados nas equações (14) e (15)

$$\frac{f_{cc}}{f_{c0}} = 1 + k_1 \times \frac{f_l}{f_{c0}} \quad (14)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + k_2 \times \frac{f_l}{f_{c0}} \quad (15)$$

Sendo:

f_{cc} : resistência do concreto confinado;

f_{c0} : resistência do concreto não confinado;

f_l : pressão lateral;

ε_{cc} : deformação última do concreto confinado;

ε_{c0} : deformação última do concreto não confinado;

k_1, k_2 : coeficientes determinados experimentalmente. Richard et al. (1928) apud Henriques (2015) propuseram coeficientes $k_1 = 4,1$ e $k_2 = 5,1$.

A comparação entre diagramas de tensão normal x deformação específica do concreto não confinado, confinado com aço, com fibra de vidro e com FRP é demonstrada na figura (9).

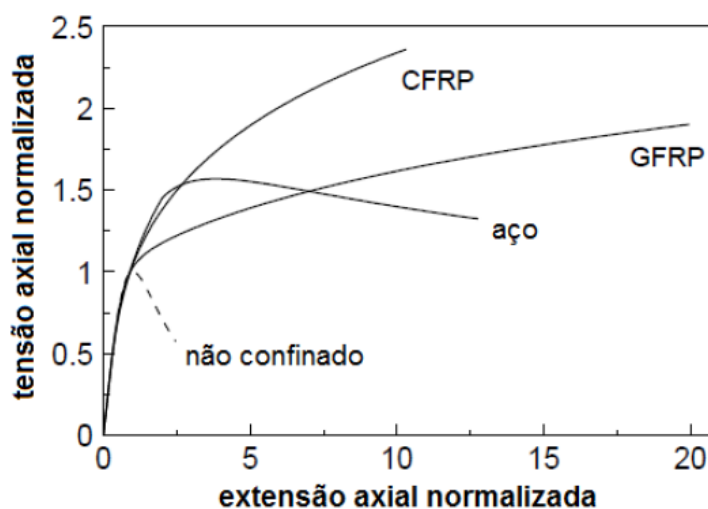


Figura 9 – Gráfico de tensão normal x deformação específica para diferentes tipos de confinamento

Fonte: Henriques (2015).

A partir das pesquisas de Richard et al., vários pesquisadores estudaram o comportamento do concreto confinado com FRP, resultando em modelos de confinamento empíricos. Dentre os modelos existentes, serão explicitados os modelos de Samaan et al., e Lam e Teng, ambos orientados para o dimensionamento (HENRIQUES, 2015).

De acordo com Henriques (2015), o modelo de Samaan et al. baseia-se na relação bilinear para as curvas tensão-deformação do concreto confinado com FRP. A tensão resistente do concreto confinado (f_{cc}) depende diretamente da tensão lateral (f_l), conforme mostrado na equação (16).

$$f_{cc} = f_{c0} + 6 f_l^{0,7} \quad (16)$$

O modelo proposto por Lam e Teng, adotado com devidas alterações pela norma ACI 440.2R-08, traz o cálculo da tensão resistente do concreto confinado proporcional à relação de confinamento, de acordo com a equação (17) (HENRIQUES, 2015).

$$f_{cc} = f_{c0} \left(1 + k_1 \frac{f_l}{f_{c0}} \right) \quad (17)$$

Sendo k_1 o coeficiente de eficácia do confinamento, com valor 3,3.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com o item 1.1, o objetivo desta pesquisa é analisar a eficiência dos compósitos de fibra de carbono utilizados como reforço estrutural em pilares esbeltos de concreto armado, para assim obter um incremento da capacidade de carga a partir do aumento das camadas de fibra, desenvolver uma curva de ganho de resistência (%) x número de camadas de reforço e comparar os resultados obtidos com os resultados gerados pelas equações teóricas para o confinamento de pilares esbeltos com fibra de carbono. Para atingir tal objetivo foram feitos ensaios laboratoriais, descritos a seguir.

No estudo realizado foram ensaiados três pilares esbeltos de concreto armado para cada situação: sem reforço, com uma, duas e três camadas de reforço de fibra de carbono.

O número de pilares de cada tipo foi escolhido devido ao tratamento estatístico feito com os resultados, pois com a existência de três dados foi possível calcular o desvio padrão, além de que, a existência de mais pilares elevaria o custo da pesquisa, principalmente atribuído à fibra de carbono.

A seção transversal dos pilares ensaiados foi determinada como circular, e com a utilização das equações (3) e (4) do item 2.1.3, foi possível calcular as dimensões do pilar:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi \times D^4}{64}}{\frac{\pi \times D^2}{4}}} = \sqrt{\frac{D^2}{16}} = \frac{D}{4}$$

Em que D é o diâmetro do pilar.

Substituindo na equação (4), obtém-se a equação (18).

$$\lambda = \frac{4l_f}{D} \quad (18)$$

Adotou-se o índice de esbeltez de 90,1, característica de um pilar esbelto, e a altura do pilar de 1,125 m, determinada de acordo com a altura da prensa disponível em laboratório. Substituindo em (18), obteve-se:

$$D = \frac{4 \times 1,125}{90,1} = 0,0499m = 5cm$$

O item 17.3.5.3.1 da NBR 6118/2014 determina a armadura longitudinal mínima para pilares de acordo com a equação (19) (ABNT, 2014).

$$A_{s, \text{mín}} \geq 0,004 \times A_c \quad (19)$$

Substituindo o valor para a área da seção transversal, obtém-se:

$$A_{s, \text{mín}} \geq 0,004 \times \frac{\pi \times 5^2}{4}$$

$$A_{s, \text{mín}} \geq 0,079 \text{ cm}^2$$

O item 17.3.5.3.2 da NBR 6118/2014 determina a armadura longitudinal máxima para pilares de acordo com a equação (20).

$$A_{s, \text{máx}} = 0,08 \times A_c \quad (20)$$

$$A_{s, \text{máx}} = 1,57 \text{ cm}^2$$

Para a armadura longitudinal foi utilizada uma barra centralizada com diâmetro de 5mm, totalizando em $A_s = 0,196 \text{ cm}^2$, valor acima do mínimo e abaixo do máximo estabelecidos pela NBR 6118/2014.

Os pilares foram moldados em tubos de PVC com diâmetro de 50 mm, garantindo assim o diâmetro necessário do pilar e cantos arredondados, cuja finalidade é evitar possíveis danos ao reforço de fibra de carbono. Foi colocado um CAP de PVC em uma das extremidades do tubo para garantir a vedação, facilitando a moldagem e transporte.

O concreto foi dosado para resistência esperada de 30 MPa, com traço igual a 1:2:3:0,6 (cimento:areia:brita:relação água/cimento). O cimento utilizado foi o CPV, areia média e brita com granulometria 1. A mistura foi feita em uma betoneira de 200 litros e eixo vertical. Em seguida, o concreto foi lançado e adensado, no sentido

vertical ao eixo do pilar, como mostrado na figura (10). Após a concretagem de aproximadamente 5 cm de altura, a armadura foi posicionada, sendo mantida no centro do pilar. O adensamento foi feito por meio de golpes na lateral do tubo aproximadamente a cada 10 cm de concreto lançado. Durante a concretagem dos pilares, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos no tamanho 10 cm x 20 cm com o concreto produzido, para o controle da resistência obtida.



Figura 10 - Concretagem do pilar

Fonte: Autores (2016).

Os corpos de prova foram retirados dos moldes 2 dias após a moldagem e colocados em um tanque com água dentro da câmara úmida, conforme a figura (11), sendo retirados do tanque no dia do ensaio de compressão, aproximadamente 90 dias após a moldagem.



Figura 11 - Cura dos corpos de prova de controle

Fonte: Autores (2016).

Os pilares permaneceram dentro dos tubos de PVC na câmara úmida por aproximadamente 60 dias, para a cura adequada do concreto. Para a desmoldagem, os tubos de PVC foram quebrados, com o auxílio de martelo e formão.

Depois de retirados dos moldes, os pilares foram regularizados com argamassa polimérica, e no dia seguinte foram lixados para garantir a porosidade da superfície para receber a resina. A fibra de carbono estava em rolos de 50 cm de largura, devido ao sentido das fibras para garantir o confinamento da peça, foi necessário colocar três faixas de fibra ao longo do pilar, sendo duas faixas de 50 cm e uma de 10 cm de comprimento. A largura foi calculada em função do diâmetro do tubo, considerando também uma área de sobreposição da fibra para garantir sua ancoragem no momento da colagem, o cálculo resultou em 20 cm.

A aplicação do reforço foi feito com uma camada de aproximadamente 1 mm de resina epóxi, com uma resina impregnadora entre e acima as camadas da fibra, conforme indicado na figura (12). A resina impregnadora em cima do reforço tem a finalidade de protegê-lo. Tomou-se o cuidado de não deixar as emendas de ancoragem das faixas alinhadas longitudinalmente, para garantir que não causasse uma linha de ruptura no reforço. As emendas transversais das camadas superiores também não foram sobrepostas.

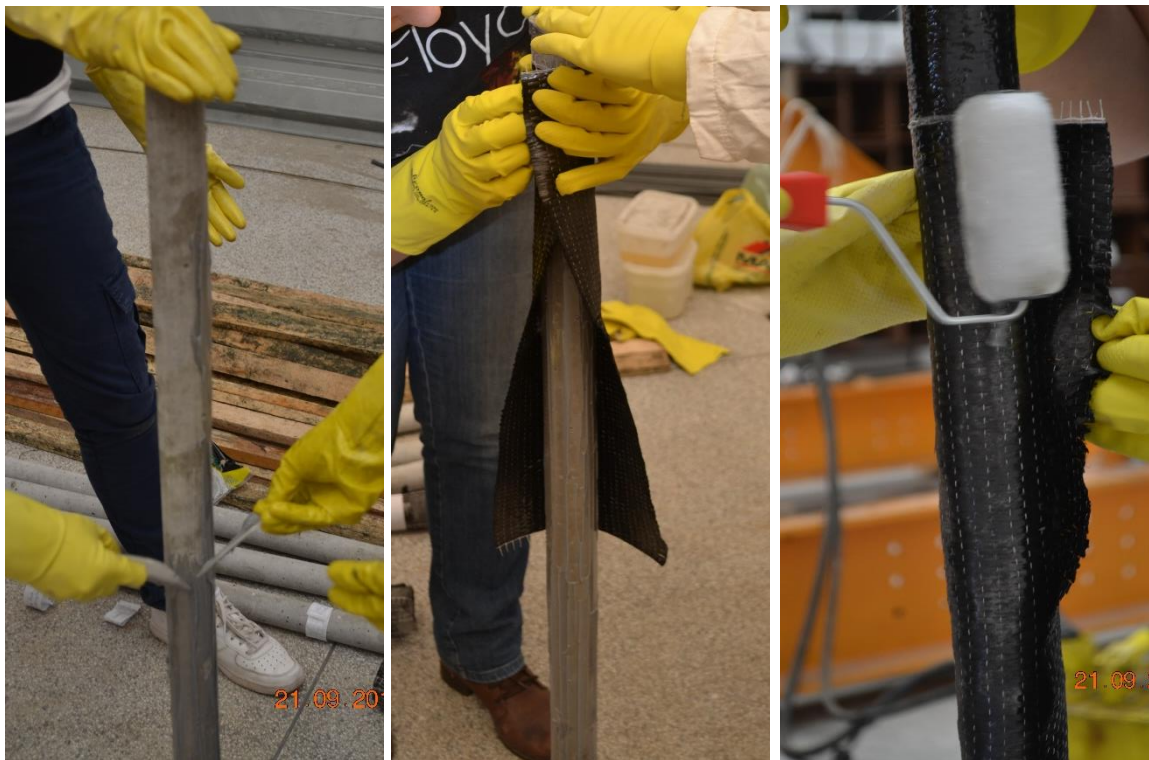


Figura 12 - Aplicação do reforço

Fonte: Autores (2016).

Após a secagem das resinas utilizadas para a aplicação da fibra de carbono, as extremidades dos pilares foram cortadas na serra circular com disco diamantado, a fim de regularizá-las, conforme a figura (13), melhorando a distribuição da carga aplicada em toda a superfície.



Figura 13 - Regularização dos pilares

Fonte: Autores (2016).

O ensaio de compressão consistiu na aplicação de uma carga axial centralizada até a ruptura dos pilares, cujos vínculos estavam rotulados em ambas as extremidades, com a utilização da prensa EMIC DL-30, através de carregamento tipo monotônico crescente. O pilar foi posicionado e aplicada uma carga axial centralizada de 3,45 kN para manter o pilar na posição. Feito isso, foram posicionados dois transdutores de deslocamento digitais em eixos perpendiculares à seção transversal, conforme a figura (15). Os transdutores foram zerados a fim de medir o deslocamento do pilar em duas direções, consideradas como X e Y, conforme a figura (14).

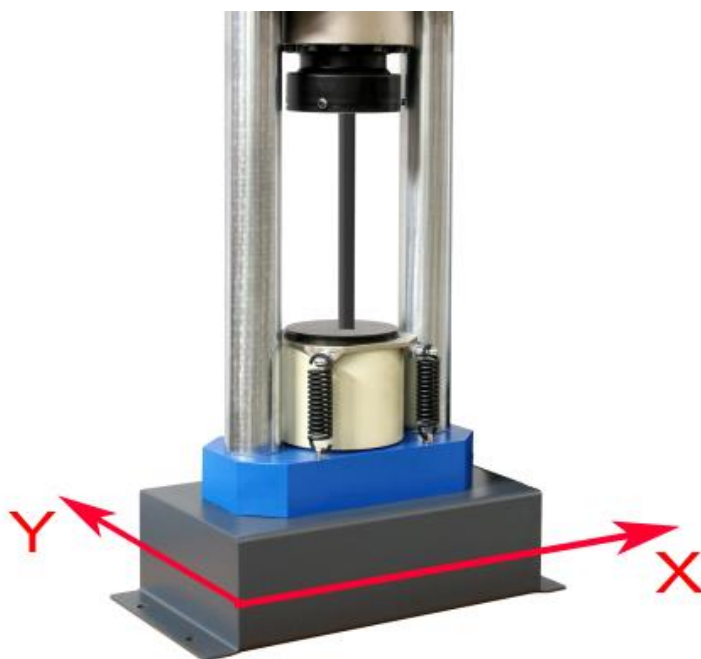


Figura 14 - Eixos de deslocamento do pilar medidos pelos transdutores de deslocamento

Fonte: Autores (2016).



Figura 15 - Ensaio de compressão centrada com transdutores de deslocamento

Fonte: Autores (2016).

Em seguida, aplicou-se carga, com um aumento constante, e os deslocamentos foram medidos a cada 5 kN de carga a partir de 5 kN até 30 kN nos pilares com reforço e até 15 kN nos pilares de referência. A partir disto, os transdutores de deslocamento foram retirados para evitar danos ao equipamento devido à ruptura do pilar, então a carga foi aplicada até a ruptura.

Após a ruptura na prensa, foram analisados o modo e a resistência de ruptura dos pilares ensaiados através dos dados obtidos.

Os corpos de prova de controle do concreto foram submetidos ao ensaio de compressão axial com aplicação de carga centralizada, gradativamente aumentada até a ruptura na mesma prensa.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Os pilares e os corpos de prova foram submetidos à uma carga axial de compressão centralizada até a ruptura, na prensa EMIC DL-30. Os 6 corpos de prova foram rompidos com o intuito de obter a resistência do concreto utilizado, os resultados estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1–Tensão, em MPa, resistida pelos corpos de prova

CP	Tensão (MPa)
1	22,2
2	23,0
3	31,2
4	33,6
5	30,8
6	27,4

Fonte: Autores (2016).

Com estes dados, foram calculados média e desvio padrão da amostra através das equações (21) e (22).

$$\bar{x} = \sum \frac{P}{N} \quad (21)$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (X_j - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (22)$$

Em que \bar{x} representa a média, P representa os valores das tensões, N o número de dados e σ_p o desvio padrão.

Os corpos de prova de controle de concreto resultaram em uma resistência à compressão média de 28,1 MPa, com desvio padrão de 4,7 MPa, o que está abaixo do valor esperado para o traço de concreto, calculado em 30 MPa.

O valor da carga resistido pelos pilares está apresentado na tabela 2, onde os pilares estão identificados como $P_{i,j}$ sendo "i" o número de camadas e "j" o número do pilar ensaiado.

Tabela 2 - Carga, em kN, suportada pelos pilares

PILAR	CARGA (kN)	MÉDIA (kN)	DESVIO PADRÃO (kN)
P0,1	43,7		
P0,2	29,6	34,2	8,2
P0,3	29,3		
P1,1	59,8		
P1,2	76,2	71,0	9,7
P1,3	77,2		
P2,1	53,8		
P2,2	65,3	61,9	7,1
P2,3	66,6		
P3,1	77,6		
P3,2	96,3	78,3	17,7
P3,3	61,0		

Fonte: Autores (2016).

Através da equação de Euler (23) é possível obter a carga de ruptura para os pilares de referência.

$$P_{cc} = \frac{\pi^2 \times EI}{l_f^2} \quad (23)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade longitudinal;

I é o momento de inércia;

l_f é o comprimento de flambagem.

De acordo com a equação de Euler, obteve-se uma carga de ruptura esperada para os pilares de referência da ordem de 55 kN, no entanto a carga média de ruptura foi de apenas 62% da carga esperada. Esta diferença pode ter sido causada por um desaprumo do pilar.

Ainda é possível observar que a rigidez (EI) teve um aumento médio superior a 100% devido ao confinamento com CFPR, passando de 4364 N.m² do pilar de referência para 9000 N.m² para os pilares reforçados, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre o aumento das camadas de reforço.

É possível observar no gráfico (1) a curva de ganho de capacidade de carga de acordo com o aumento de camadas de fibra, com os respectivos desvios padrão.

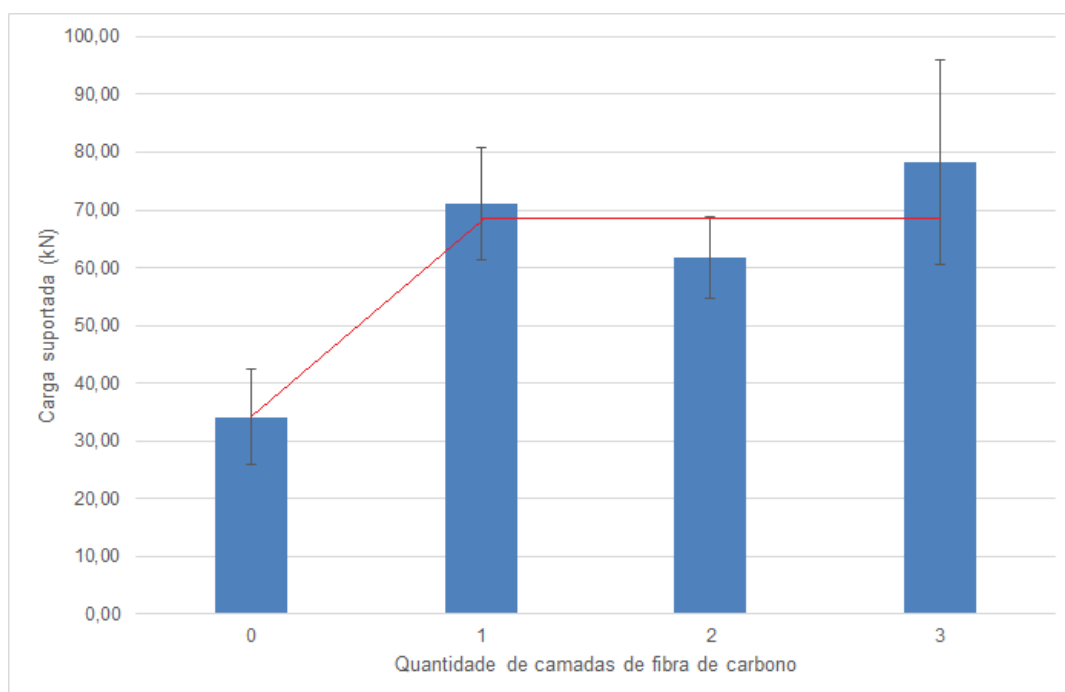


Gráfico 1 - Curva de ganho de capacidade de carga com aumento de camadas de fibra
Fonte: Autores (2016).

É apresentado no gráfico (1) uma curva de ganho de capacidade de carga em função do aumento de camadas de fibra de carbono em relação ao pilar sem reforço. É possível observar que o aumento das cargas suportadas por cada grupo de pilares não são significativas, então, considerando o desvio padrão, não há ganho de resistência com o aumento do número de camadas.

Os valores apresentados na tabela (3) mostram o aumento de resistência, em porcentagem, em relação ao pilar sem reforço.

Tabela 3 - Ganho de resistência, em %, pelos pilares

CAMADAS FIBRA	% RESISTÊNCIA
0	100,0
1	207,9
2	181,0
3	229,2

Fonte: Autores (2016).

Com isso, foi possível analisar, considerando as médias obtidas, que há um incremento de até 129,2% (equivalente a 44,1kN) da capacidade de carga com a utilização de uma camada fibra de carbono em relação ao pilar sem reforço, porém, é possível visualizar que a resistência não é crescente em função do aumento de camadas. O incremento maior aconteceu nos pilares com três camadas de reforço.

A área de seção transversal do pilar foi calculada pela equação (24):

$$A = \frac{\pi x D^2}{4} = \frac{\pi x 0,05^2}{4} = 0,00196 \text{ m}^2 \quad (24)$$

A partir dos valores da carga suportada por cada pilar e da área da seção transversal circular obtida, foram calculadas as resistências à compressão axial centrada através da equação (25), cujos resultados estão apresentados (em MPa) na tabela 4 e no gráfico 2. Para o cálculo da tensão, foi feita uma aproximação da resistência real, pois não foram considerados os efeitos da flambagem dos pilares.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (25)$$

Em que F representa a carga suportada e A, a área da seção transversal.

Tabela 4 - Resistência à compressão axial centrada dos pilares, em MPa

PILAR	RESISTÊNCIA (MPa)	MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)
P0,1	22,3		
P0,2	15,1	17,4	4,2
P0,3	14,9		
P1,1	38,8		
P1,2	30,5	36,2	5,0
P1,3	39,3		
P2,1	27,4		
P2,2	33,2	31,5	3,6
P2,3	33,9		
P3,1	39,5		
P3,2	49,1	39,9	9,0
P3,3	31,1		

Fonte: Autores (2016).

A resistência à compressão dos pilares foi calculada como compressão simples pois foram desconsiderados os efeitos de segunda ordem. Além disso, não foram medidos os deslocamentos até a ruptura, devido a metodologia empregada, não possibilitando assim, realizar os cálculos da flexão composta.

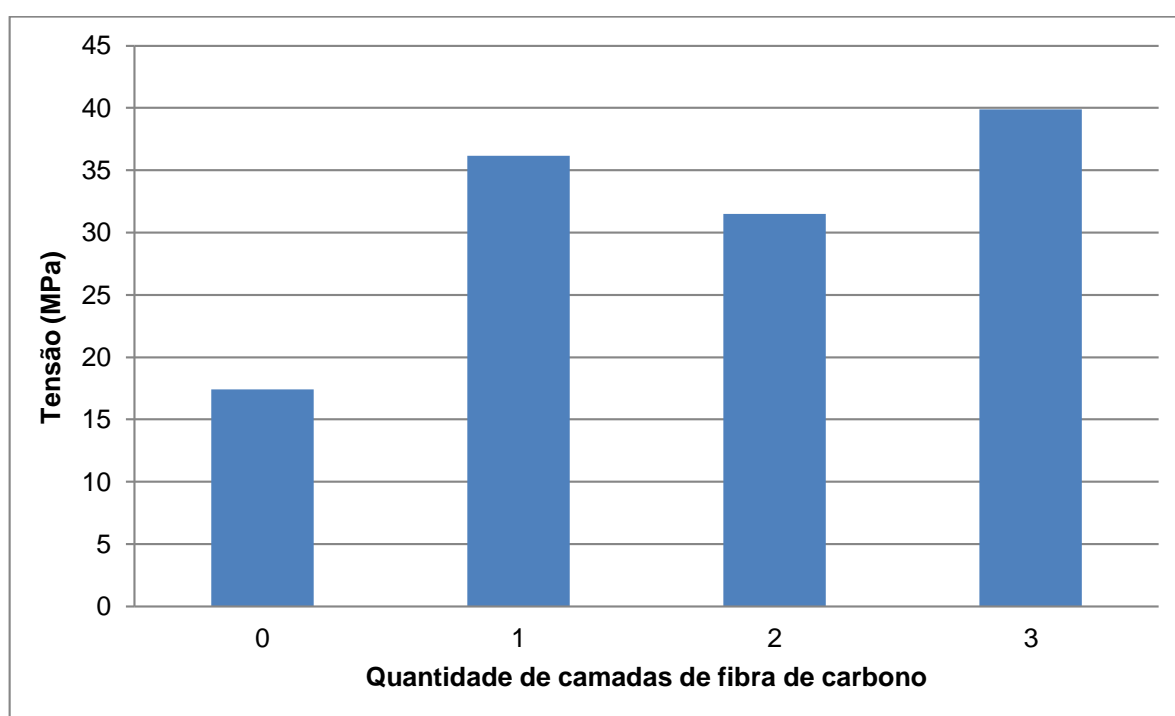


Gráfico 2 - Resistência média à compressão axial centrada (MPa)

Fonte: Autores (2016).

Observa-se que o confinamento dobrou a tensão resistente. A tensão do pilar de referência teve resultados inferiores à médias dos corpos de prova 10 cm x 20 cm devido à esbeltez e flambagem.

Através da utilização dos transdutores de deslocamento, obteve-se os deslocamentos dos pilares esbeltos nos eixos considerados X e Y com o aumento da carga aplicada, conforme a tabela 5 e tabela 6, respectivamente.

Tabela 5 - Deslocamento dos pilares, em mm, no eixo X

Deslocamento x (mm)												
Carga (kgf)	P0,1	P0,2	P0,3	P1,1	P1,2	P1,3	P2,1	P2,2	P2,3	P3,1	P3,2	P3,3
345	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	0	0,08	0,09	-0,39	-0,62	0	0,13	0	-0,22	0,19	0	0,4
1000	0,09	0,99	0,92	-1,38	-1,55	0,37	0,72	-0,53	-1,13	0,3	0,67	1,68
1359	-	-	0,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1500	0,37	1,71	-	-1,96	-1,29	0,7	1,38	-1,13	-1,79	0,3	1,05	1,68
2000	-	-	-	-2,21	-0,96	0,84	2,08	-1,96	-2,5	0,3	-	-
2500	-	-	-	-	-0,47	0,56	2,78	-2,35	-2,83	-	1,05	-
3000	-	-	-	-	0,15	0,4	2,81	-2,35	-	-	1,04	-

Fonte: Autores (2016).

Tabela 6 - Deslocamentos dos pilares, em mm, no eixo Y

Deslocamento y (mm)												
Carga (kgf)	P0,1	P0,2	P0,3	P1,1	P1,2	P1,3	P2,1	P2,2	P2,3	P3,1	P3,2	P3,3
345	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	0	0,4	-0,13	-0,03	-0,08	0	0	0	0	0	0,11	0
1000	0,35	0,4	-0,97	-0,33	-0,14	-0,12	-0,37	-0,45	-	0	-0,034	-0,76
1500	0,72	0,4	-	-0,62	-0,49	-0,47	-0,71	-0,83	-	0,13	-0,46	-0,94
2000	-	-	-	-1,3	-0,74	-0,89	-1,18	-1,21	-	1,07	-	-1,1
2500	-	-	-	-	-0,97	-0,81	-1,77	-1,5	-	1,58	-0,38	-1,23
3000	-	-	-	-	-1,13	-0,42	-2,34	-1,86	-	-	-0,38	-

Fonte: Autores (2016).

Analisando os dados de deslocamento, observou-se que a maioria dos pilares reforçados se deslocaram menos comparados aos pilares de referência, em ambas as direções, sendo o deslocamento menor quanto mais camadas de reforço o pilar possui devido a um maior confinamento. Este fato pode ser observado

conforme o diagrama da figura (7), o que confirma a teoria. Não foi possível fazer um acompanhamento mais preciso dos deslocamentos, pois quando os pilares se deformavam para lado positivo dos eixos considerados, os transdutores atingiam fim de curso e cessavam a leitura. São apresentados nos gráficos 3 a 10 os deslocamentos dos pilares nas direções X e Y.

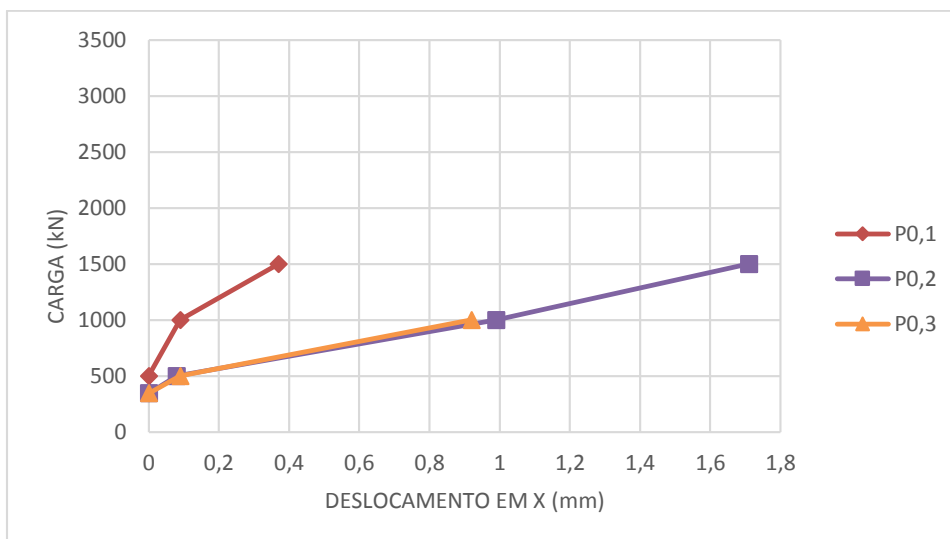


Gráfico 3 - Deslocamentos no eixo X dos pilares de referência (mm)

Fonte: Autores (2016).

Para os três pilares sem reforço, o deslocamento no eixo x foi crescente com o aumento de carga em todos os pilares, conforme o gráfico (3).

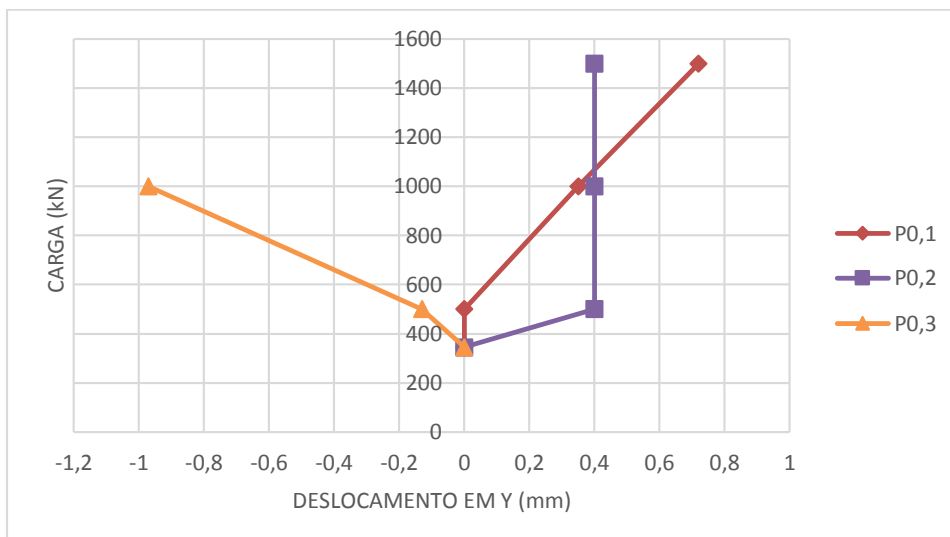


Gráfico 4 - Deslocamentos no eixo Y dos pilares de referência (mm)

Fonte: Autores (2016).

No gráfico (4), é possível observar que o transdutor atingiu fim de curso, cessando a medição, para o pilar P_{0,2}.

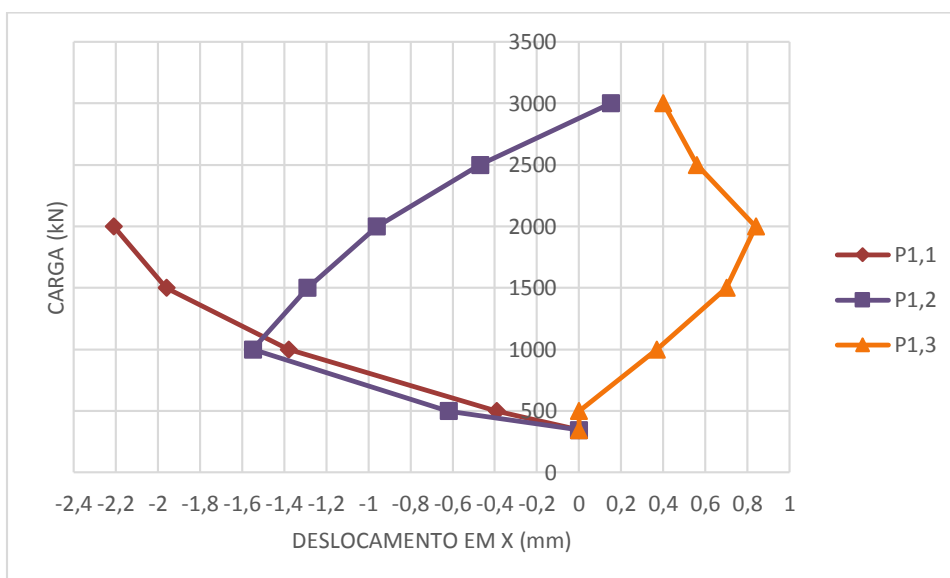


Gráfico 5 - Deslocamentos no eixo X dos pilares com 1 camada (mm)

Fonte: Autores (2016).

No gráfico (5), observa-se que as curvas mostram o pilar se deslocando em um sentido e depois diminuindo o valor do deslocamento, isso pode ser explicado pelo fato do deslocamento ocorrer em duas direções. Os transdutores foram posicionados nos eixos X e Y, porém como o deslocamento aconteceu na diagonal, fez com que o medidor saísse do eixo e fizesse a leitura de outros pontos na superfície do pilar.

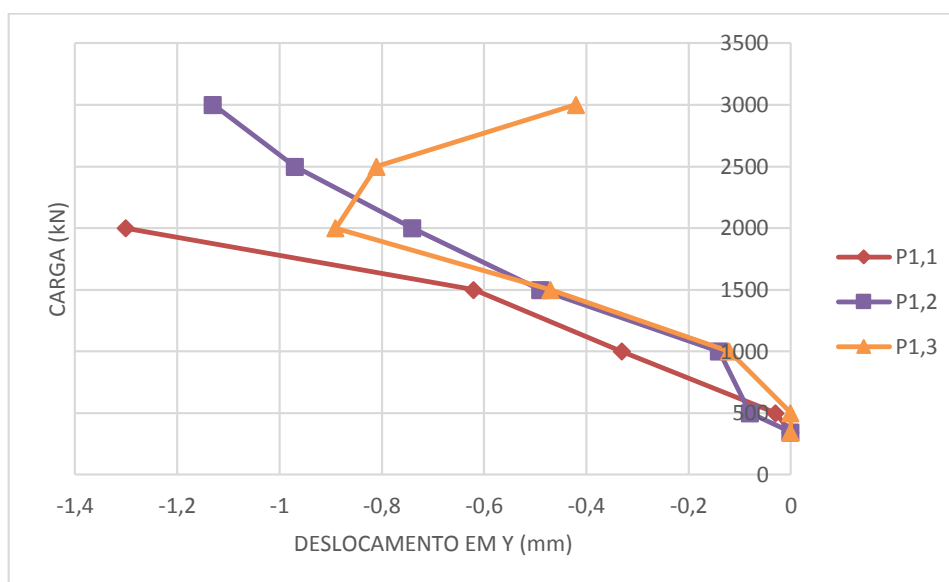


Gráfico 6 - Deslocamentos no eixo Y dos pilares com 1 camada (mm)

Fonte: Autores (2016).

As variações no deslocamento em relação ao eixo Y do pilar P_{1,3} do gráfico (6) podem ser justificados pelo mesmo motivo apresentado no gráfico (5).

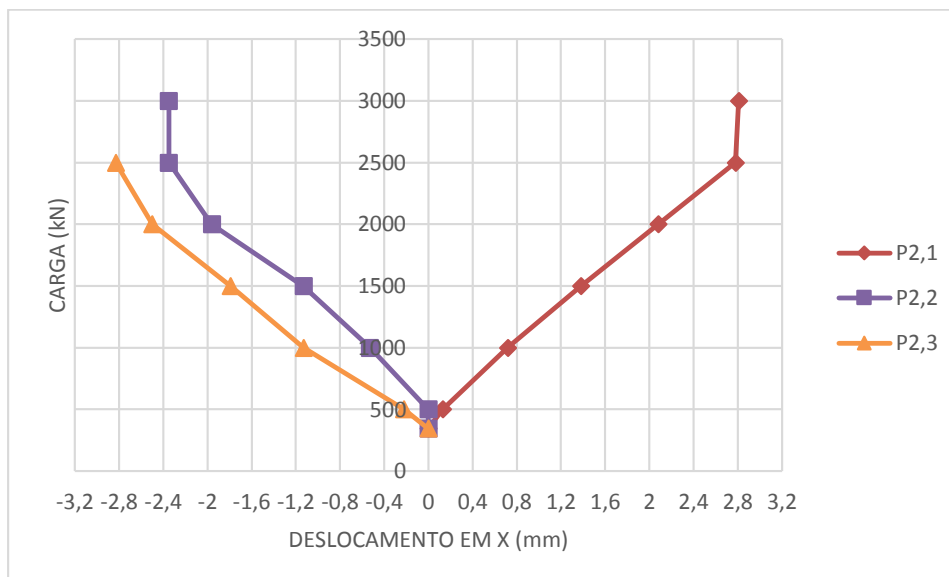


Gráfico 7 - Deslocamentos no eixo X dos pilares com 2 camadas (mm)

Fonte: Autores (2016).

Em todos os pilares apresentados no gráfico (7) o valor do deslocamento é crescente com o aumento da carga, porém é possível observar que a variação do deslocamento diminui com o acréscimo da carga aplicada.

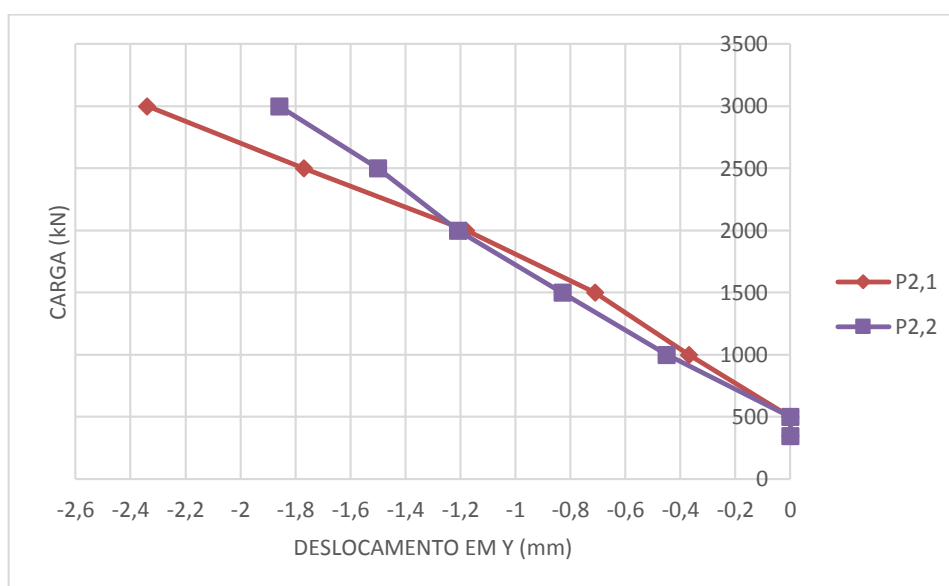


Gráfico 8 - Deslocamentos no eixo Y dos pilares com 2 camadas (mm)

Fonte: Autores (2016).

No gráfico (8) as informações apresentadas são de apenas dois pilares com duas camadas de reforço, pois não foi possível medir o deslocamento do pilar P_{2,3}.

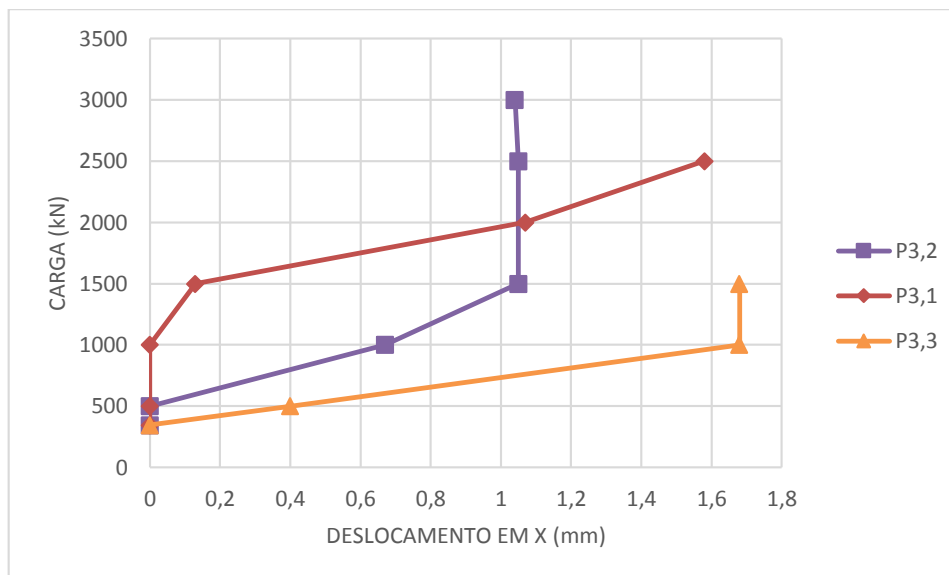


Gráfico 9 - Deslocamentos no eixo X dos pilares com 3 camadas (mm)

Fonte: Autores (2016).

No gráfico (9) é possível observar que após uma certa carga aplicada, os pilares P_{3,2} e P_{3,3} atingiram fim de curso dos transdutores. Já o pilar P_{3,1} teve um deslocamento pequeno no início do carregamento e depois aumentou significativamente.

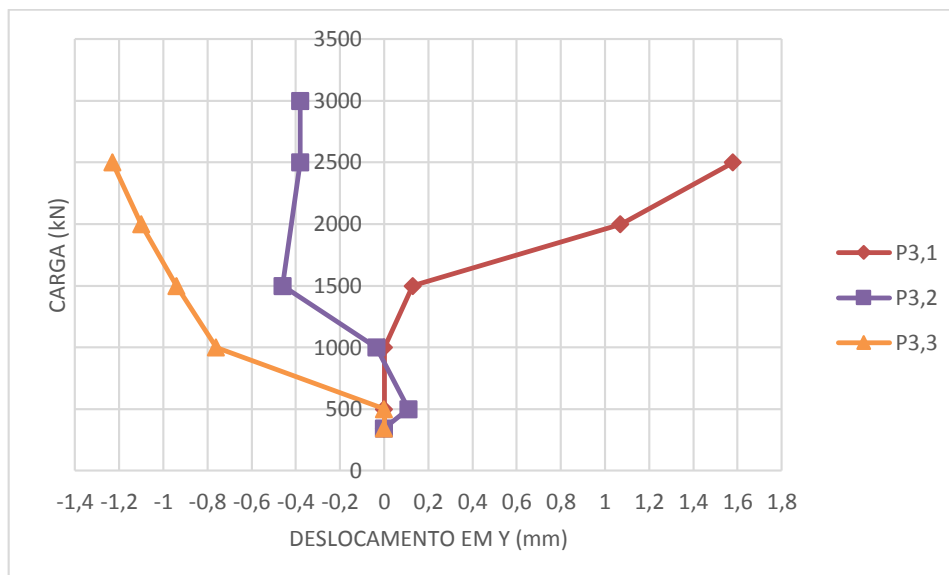


Gráfico 10 - Deslocamentos no eixo Y dos pilares com 3 camadas (mm)

Fonte: Autores (2016).

É possível observar no gráfico (10) que, da mesma forma que o pilar P_{3,1} na direção x, os pilares P_{3,1} e P_{3,3} apresentaram deslocamento em y pequeno no início da aplicação de carga. No pilar P_{3,2} ocorreu falha na leitura devido ao deslocamento em 2 direções.

Uma dificuldade encontrada durante a preparação dos corpos de prova, foi na colagem da fibra de carbono. A resina impregnadora, responsável por fazer a aderência entre as camadas de fibra, desenvolve sua propriedade colante conforme a secagem, o que pode demorar algumas horas, então partes da fibra ficaram soltas nas últimas camadas. Considerando que a ancoragem é importante para garantir uma boa estabilidade do reforço, este fator pode ter prejudicado o desempenho dos pilares em que isso ocorreu.

Durante a realização dos ensaios, notou-se que a ruptura dos pilares ocorreu após a flambagem dos mesmos, o que é comum para elementos esbeltos, sendo que os pilares com reforço apresentaram uma ruptura menos abrupta, ocorrendo geralmente nas emendas da fibra, como pode-se visualizar na figura (16). Também foi observado que os pilares reforçados com fibra se mostraram mais dúcteis, tendo capacidade de reverter a deformação após o alívio da carga, cuja propriedade era proporcional ao aumento da quantidade de camadas.



Figura 16 - Pilares após a ruptura

Fonte: Autores (2016).

Foram calculadas as resistências do concreto confinado, utilizando as equações (16) e (17), dos modelos apresentados em 2.2.5. Para isto, também foram calculadas as pressões laterais, com as equações (12) e (13) do item 2.2.4, utilizando a espessura da fibra de 0,0165 cm e h de 5 cm. Os resultados das resistências do concreto confinado são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Pressões laterais e resistências do concreto confinado

Camadas (n)	f_l (MPa)	f_{cc} (MPa) (Samaan)	f_{cc} (MPa) (Lam e Teng)	f_c (MPa) (obtido)
1	6,2	38,92	37,86	36,2
2	12,4	52,36	58,32	31,5
3	18,6	63,83	78,78	39,9

Fonte: Autores (2016).

Através da comparação dos resultados obtidos entre as equações teóricas de confinamento de Samaan et al., e Lam e Teng, e os valores obtidos no ensaio realizado, é possível perceber que ambos valores da tensão resistente do concreto

confinado se aproximam muito para os pilares com uma camada de fibra de carbono, porém com o aumento do número de camadas começam a divergir. Em ambas as equações teóricas o valor aumenta com o acréscimo de camadas de reforço. A tensão resistente do concreto confinado obtido com as equações crescem muito com o aumento das camadas comparado ao diagrama da figura (7), em que o aumento não é tão acentuado. Com isso, é possível perceber que as equações não se adéquam aos pilares esbeltos com mais de uma camada de reforço de fibra de carbono, pois as equações utilizadas são utilizadas para pilares curtos.

5 CONCLUSÃO

Com esta pesquisa é possível concluir que há um aumento da capacidade de carga de até 129,2% (equivalente a 44,1 kN) com a aplicação da fibra de carbono em relação aos pilares de referência. Porém, para pilares esbeltos de seção circular, o aumento da quantidade de camadas de fibra de carbono não corresponde a um aumento de resistência da estrutura, pois a diferença de resistência obtida entre os pilares com uma, duas e três camadas não é estatisticamente significativa. O valor ótimo para esta situação é correspondente aos pilares com a aplicação de três camadas de reforço, mas a aplicação de mais de uma camada não se mostrou eficiente quando o intuito for de ganho de resistência, pois a resistência obtida com os pilares com uma camada de reforço e de três camadas são muito próximas. Nesta situação, o custo seria muito alto para a aplicação de mais camadas de reforço, em relação ao benefício obtido.

O benefício em utilizar mais camadas de fibra de carbono está relacionado com o deslocamento da estrutura, pois há um menor deslocamento quanto mais camadas a estrutura possui, e também relacionado à ductilidade, que foi maior conforme o aumento das camadas de reforço, com a capacidade de reverter a deformação sofrida após o alívio da carga.

O gráfico 1, da curva de ganho de capacidade de carga com aumento de camadas de fibra, apresentou uma inclinação crescente considerando os pilares de referência até os pilares com uma camada de reforço, o que representa que há ganho de capacidade de carga; já para o aumento das camadas de reforço, o gráfico pode ser aproximado por uma reta horizontal, considerando a margem de erro, isto representa que não há uma diferença significativa entre estes dados.

Através da comparação entre os valores obtidos com as equações teóricas de confinamento para o cálculo da tensão resistente do concreto confinado e os valores obtidos na prática, os resultados foram próximos apenas para os pilares com uma camada de reforço, o que torna o uso das equações teóricas não adequadas para os pilares esbeltos com mais de uma camada de fibra de carbono. As equações teóricas obtiveram valores crescentes de acordo com o acréscimo de camadas de fibra de carbono, o que não foi observado na prática, onde a tensão resistente teve variações não significativas com o aumento do número de camadas.

Finalmente, concluiu-se que o FRP é uma boa opção para reforço estrutural em pilares esbeltos considerando que o aumento da capacidade de carga gerado pela aplicação de uma camada de fibra foi superior a 100%. Embora não seja viável economicamente aplicar mais camadas, o confinamento com fibra de carbono mostrou-se interessante no sentido de conter o deslocamento do pilar.

6 TEMAS SUGERIDOS PARA PESQUISAS FUTURAS

Alguns temas sugeridos para estudo e desenvolvimento de pesquisas futuras na área de reforço estrutural são:

- Análise da viabilidade econômica do uso da fibra de carbono em pilares, em termos de custo x benefício;
- Análise da eficiência de compósitos de fibra de carbono em pilares de concreto armado a partir da aplicação de carga excêntrica;

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440. 2R-08**: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. USA, 2008.

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

BALAGURU, Perumalsamy; NANNI, Antonio; GIANCASPRO, James. **FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures**. 1ª edição. New York (USA): Taylor e Francis Group, 2009.

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

CÁNOVAS, Manuel F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo. PINI, 1988.

CARVALHO, Roberto C.; FILHO, Jasson R. de F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: segundo a NBR 6118: 2014**. 4. ed. São Paulo: EdUFScar, 2014.

CLÍMACO, João C. T. S. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2ª Edição, revisada. Brasília: Editora Universidade de Brasília: Finatec, 2008.

FREIRE, Estevão; MONTEIRO, Elisabeth E. C.; CYRINO, Julio C. R. **Propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibra de vidro**. Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto de Macromoléculas. Rio de Janeiro, 1994.

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

HENRIQUES, Sérgio C. **Reforço de pilares de betão por encamisamento híbrido com mantas de FRP**. 2015. 244f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Técnico Lisboa.

JUVANDES, Luís F. P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP**. 1999. 396f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 1999.

JUVANDES, Luís. F. P. **Aplicações de Compósitos FRP no Reforço de Estruturas**. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 2011.

MACHADO, Ari de P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo. PINI, 2002.

NETO, Flamínio L.; PARDINI, Luiz C. **Compósitos estruturais – Ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo, 2006: Edgard Blücher.

PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia de Estruturas. São Carlos, 2007.

SILVA, Danilo O. **Estudo comparativo entre os métodos de cálculo dos efeitos locais de segunda ordem no dimensionamento de pilares de edifícios**. 2010. 66f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2010.

SOUZA, Vicente C. M.; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo. PINI, 1998.

SÜSSEKIND, José C. **Curso de Concreto**. 5.ed. Rio de Janeiro, 1987: Globo. v. I.