Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE PILARES REFORÇADOS COM CFRP

C. V. S. ARAÚJO
Estudante
Universidade de Brasília
Brasília -DF; Brasil
carlos.valbson.araujo@gmail.com

R. J. C. SILVA
Professor Adjunto
Universidade Estadual Vale do Acaraú
Ceará; Brasil
ricardo.carvalho222@gmail.com

RESUMO

A construção civil é uma indústria que está em constante avanço tecnológico. A cada ano surgem materiais, equipamentos e técnicas construtivas novas. No caso das estruturas de concreto armado e protendido, as inovações buscam um melhor aproveitamento das propriedades do concreto e a garantia de durabilidade dessas estruturas. Porém, os avanços não se limitam à construção de estruturas novas. A necessidade de se recuperar elementos estruturais ou aumentar suas capacidades resistentes tem incentivado o aperfeiçoamento de técnicas de reforço estrutural. Assim, o presente trabalho traz um estudo teórico e experimental sobre o reforço de pilares por encamisamento com mantas de polímero reforçado com fibras de carbono, com o objetivo de verificar o ganho de resistência à compressão axial e contribuir para uma melhor compreensão do comportamento estrutural de pilares reforçados com esta técnica. Para isso, foram realizados ensaios de compressão axial centrada em cinco pilares curtos de concreto armado, sendo um de referência e os outros com diferentes taxas de reforço, onde se observou um considerável aumento da carga de ruptura dos pilares com o aumento das taxas de reforço. Foram feitas também simulações numéricas no *software Abaqus*, a fim de se obter a distribuição de tensões no interior dos pilares. Todos os resultados foram então analisados e, a partir destes, pôde-se obter um modelo simplificado de previsão do ganho na capacidade resistente de pilares reforçados com fibras de carbono.
Palavras-chave: Pilares de Concreto Armado, Reforço Estrutural, Polímero Reforçado com Fibras de Carbono.

ABSTRACT

The civil construction is an industry that is in constant technological advancement. Every year arises new materials, equipment and construction techniques. In the case of reinforced and prestressed concrete structures, innovations seek a better use of concrete properties and ensuring durability of these structures. However, the advances are not limited to the building of new structures. The necessity to recover structural elements or increase its resistant capabilities has encouraged improvement of structural strengthening techniques. Thus, this paper presents a theoretical and experimental study about strengthening of columns by wrapping with carbon fiber composites, in order to check the gain of resistance to axial compression and contribute to a better understanding of structural behavior of columns strengthened with this technique. For this, axial compression tests were performed on five reinforced concrete columns, where one was reference and others had differents strengthening rates, and was registered a considerable increase of breaking load of the columns with the increase of strengthening rates. Were also done numerical simulations in the ABAQUS software in order to obtain the stress distribution inside the columns. All results were then analyzed and, based on these, it was possible to obtain a simplified model for prediction of gain in the resistant capacity of the columns strengthened with carbon fibers.
Keywords: Reinforced Concrete Columns, Structural Strengthening, Carbon Fiber Reinforced Polymer.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas têm-se verificado um grande avanço nas tecnologias construtivas de estruturas de concreto armado e protendido. Aliado a isso, a preocupação com a qualidade geral nas obras tem permitido a execução de obras mais duráveis, assim como mais elegantes, com recordes de altura, vãos e balanços. Entretanto, por vezes surge a necessidade de intervenções, a fim de se recuperar elementos estruturais ou aumentar suas capacidades resistentes.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Nesse caso, o conhecimento acerca de técnicas de reforço estrutural garante o desempenho e a vida útil desejados para a obra.

Dos elementos de uma estrutura, os pilares estão entre aqueles que requerem maior atenção, uma vez que sua ruptura pode levar toda a estrutura à ruína. Há diversos tipos de reforços para pilares de concreto armado, destacando-se a utilização de concreto projetado ou de alta resistência com armadura suplementar, a sobreposição de chapas de aço ao pilar preexistente, o uso de concreto com adição de fibras de aço e, mais recentemente, o encamisamento com mantas de polímeros reforçados com fibras (*FRP – Fiber Reinforced Polymer*). Dentre estes, o último apresenta inúmeras vantagens, como a rapidez e facilidade de execução e o fato de não aumentar as seções transversais dos pilares.

Com isso, visando também contribuir para uma melhor compreensão do comportamento estrutural de pilares reforçados, o presente trabalho traz um estudo teórico e experimental sobre reforço por encamisamento com mantas de fibras de carbono (*CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer*), cujo objetivo foi verificar o ganho de resistência à compressão axial de pilares curtos de concreto armado devido ao encamisamento por CFRP. Para isso, foram realizados ensaios físicos de compressão axial em um pilar de referência (sem reforço) e em outros quatro reforçados com CFRP, onde se variou a taxa de reforço aplicada em cada pilar. Foram também realizadas análises numéricas através de um *software* de modelagem estrutural, o *Abaqus*, que utiliza o Método dos Elementos Finitos para resolver diversos problemas de engenharia, a fim de se analisar a distribuição de tensões no interior dos pilares, visando entender melhor o comportamento do concreto confinado.

2. COMPORTAMENTO DE PILARES DE CONCRETO ARMADO REFORÇADOS COM CFRP

2.1 Reforço com materiais compósitos

Gibson [1] afirma que os materiais estruturais podem ser classificados como metais, polímeros, cerâmicas ou compósitos, sendo estes últimos constituídos pela combinação dos demais, formando um arranjo estrutural macroscópico, com duas ou mais fases distintas. Assim, os materiais compósitos possuem uma matriz, feixes de barras ou fibras e, às vezes, algum aditivo. A Figura 1 ilustra as características macro e microscópicas de sistemas de FRP.

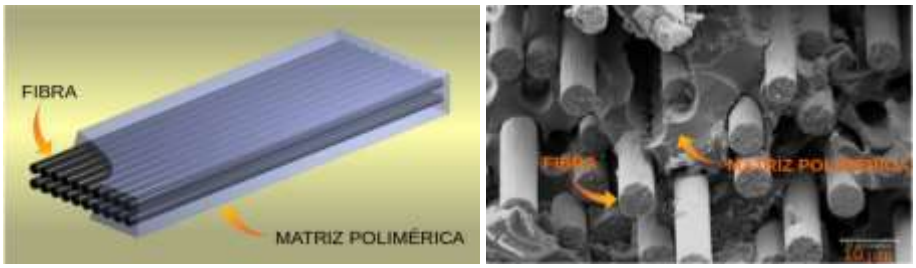


Figura 1: Características dos sistemas FRP

Atualmente, tem-se difundido o uso de compósitos reforçados com fibras para o reforço de estruturas de concreto. Entre as vantagens desse método estão sua elevada resistência mecânica e baixa densidade, grande durabilidade e pouca manutenção devido à sua resistência à corrosão, pode ser ocultado facilmente, e ainda apresenta um procedimento de aplicação bastante simples, quando comparado a alternativas tradicionais de reforço. Esse método tem como desvantagens ainda possuir um custo elevado de mercado, ser sensível a altas temperaturas e raios ultravioletas por conta da matriz polimérica e necessitar de supervisão técnica qualificada para garantir a qualidade do sistema.

As fibras de carbono resultam da oxidação de fibras precursoras orgânicas, tais como o poliacrilonitril (PAN), ou com base em derivados do petróleo ou carvão (PITCH), que em seguida são processadas a elevadas temperaturas, cerca de 1000 ºC a 1500 ºC, podendo chegar até 3000 ºC para fibras de grafite. Segundo Machado [2], após esse processo térmico, as fibras resultantes apresentam os átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, conferindo grande resistência mecânica ao produto final.
Nos compósitos CFRP as fibras de carbono são responsáveis pela resistência mecânica do sistema, cabendo à matriz polimérica a transferência de tensões do substrato de concreto ao sistema compósito. Para isso, a matriz deve ter um alongamento de ruptura bem maior que o alongamento das fibras, para permitir que as mesmas continuem a possuir capacidade de carga, mesmo após a tensão nas fibras ter atingido seu limite de resistência. Quanto ao processo de aplicação dos sistemas CFRP, trata-se de uma sequência bem simples. A Figura 2 apresenta essa sequência, para sistemas de fibras de carbono constituídos de mantas flexíveis.

ISSN 2448-1459

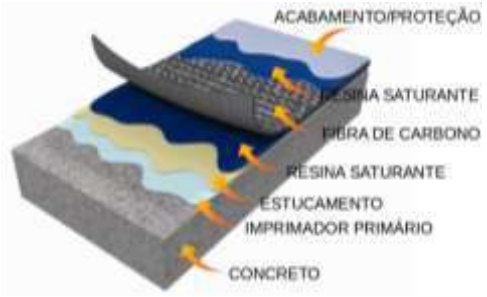


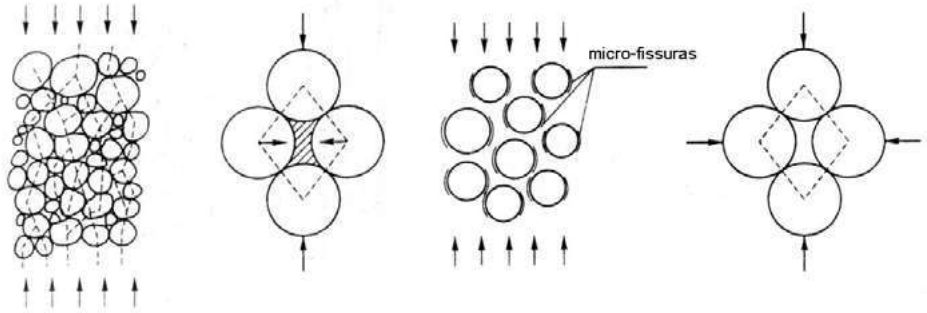
Figura 2: Sequência de aplicação de mantas de CFRP

2.2 Confinamento do concreto

Sem dúvida o mecanismo que traz maiores benefícios a pilares reforçados é o efeito de confinamento do concreto. Com esse efeito aumentam-se consideravelmente a capacidade resistente e a ductilidade do pilar preexistente, aumentando muito pouco as seções transversais desses elementos. O efeito de confinamento se dá com a aplicação de pressões transversais ao eixo longitudinal do pilar, restringindo a expansão lateral do concreto, podendo ser obtido pela aplicação de protensão transversal ou materiais expansivos confinados (confinamento ativo), ou com chapas de aço, estribos e camisas de FRP (confinamento passivo).

2.2.1 Comportamento do concreto confinado sob compressão uniaxial

De acordo com FIB [3] concretos comuns possuem cerca de 75% de agregados de vários tamanhos, sendo os agregados os componentes rígidos desse tipo de concreto (em concretos de alta resistência a pasta de cimento é mais resistente que os agregados) e as forças de compressão caminham através deles (ver Figura 3-a). Para o equilíbrio são necessárias componentes laterais, que no concreto não confinado são provenientes da coesão da pasta de cimento (ver Figura 3-b). Quando o carregamento supera a força de coesão surgem microfissuras entre os agregados e a pasta de cimento (ver Figura 3-c). Com o aumento do carregamento as fissuras crescem e, já que não há mais as componentes laterais para manter o equilíbrio, o concreto rompe com fissuração paralela à aplicação da carga. Porém, quando há o confinamento do concreto há um ganho de coesão, garantindo o equilíbrio das forças atuantes e aumentando a resistência à compressão do concreto (ver Figura 3-d).



(a) (b) (c) (d)

Figura 3: Mecanismo de confinamento no concreto

O ganho de coesão se deve às pressões laterais exercidas pelo confinamento. Pesquisadores como Richart *et al*. [4] e Balmer [5] realizaram ensaios de compressão axial em concreto confinado com fluidos e armaduras transversais e verificaram que a resistência à compressão axial e a deformação última do concreto crescem na presença de pressões confinantes.

2.2.3 Confinamento com camisas de FRP

Segundo Carrazedo [6], há diferenças muito grandes entre o comportamento de concretos confinados com aço e aqueles confinados com FRP. Estudos sobre concreto confinado com aço mostraram que há uma pequena suavização do diagrama tensão-deformação quando o concreto atinge sua resistência máxima f_{cc}, sendo essa resistência de pico atingida logo que a armadura transversal escoa. O diagrama segue então com um trecho descendente e apresenta uma tensão de ruptura menor que f_{cc}, coincidindo com a ruptura da armadura transversal. De acordo com Edwards [7], quando se trata de concreto encamisado com FRP, em virtude das baixas deformações de ruptura e a falta de um

patamar de escoamento, o compósito possibilita uma pressão crescente até a sua ruptura, o que resulta num diagrama tensão-deformação bilinear. A Figura 4 mostra esse comportamento, comparando com o confinamento com aço.

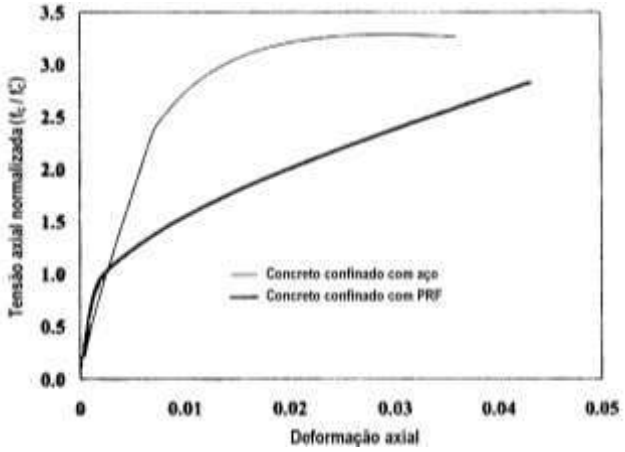


Figura 4: Diagramas tensão-deformação do concreto confinado com aço e com polímeros reforçados com fibras (PRF)

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações Iniciais

O estudo experimental se deu através de ensaios físicos de compressão axial em cinco pilares de concreto armado, sendo um de referência e os outros quatro com diferentes configurações de reforço, realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas, da Universidade Estadual Vale do Acaraú, onde foram feitos também ensaios para obtenção da resistência à compressão do concreto utilizado.

3.2 Materiais

O concreto utilizado nos pilares ensaiados foi dosado e rodado em central, sendo produzido com um traço que objetivava uma resistência à compressão, aos 28 dias, de cerca de 30 MPa. A resistência média à compressão (f_c) encontrada na data dos ensaios é apresentada na Tabela 1. A resistência média à tração do concreto ($f_{ct,m}$) e os módulos de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) e secante (E_{cs}) foram estimados através das fórmulas dadas pela norma brasileira ABNT NBR:6118 [8]. Esses valores também são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do concreto utilizado nos ensaios

Resistência média à compressão (MPa)	Resistência média à tração (MPa)	Módulo tangente inicial (GPa)	Módulo secante (GPa)
26,74	2,68	28,96	25,20

Para a confecção das armaduras longitudinais foram utilizados vergalhões de aço tipo CA-50, com 8,0 mm de diâmetro e superfície nervurada. Já nas armaduras transversais dos pilares, foi utilizado aço do tipo CA-60, com 5,0 mm de diâmetro. Todos os vergalhões eram da marca Gerdau.

As camisas de reforço foram feitas com o sistema compósito Viapol Carbon CFW 300, que é uma manta de fibras de carbono para reforço estrutural com direção única de seus filamentos, a qual é aplicada com resinas especiais à base de epóxi e possui um módulo de elasticidade igual a 230 Gpa e resistência máxima de tração de 4900 MPa.

3.3 Instrumentação

Para a realização dos ensaios, tanto nos pilares quanto para obtenção da resistência à compressão do concreto, foi utilizada uma prensa hidráulica manual com capacidade para cargas de até 120 tf (aproximadamente 1200 kN), de marca Contenco e modelo l-3001-B, possuindo dois manômetros para leitura das cargas, um com escala de 0 – 120 tf e divisão de 200 kgf (aproximadamente 2 kN), e o outro com escala 0 – 24 tf e divisão de 40 kgf. A prensa apresenta ainda um curso máximo do pistão de 35 mm.

Utilizou-se, para a medição dos deslocamentos nos pilares ensaiados, transdutores de deslocamento linear (LVDT's - Linear Variable Differential Transformers), da marca Gefran, modelo PY-2-F-050-S01M, com curso de 10 a 50 mm, resolução infinita e velocidade de deslocamento de até 10 m/s, ligado a um indicador digital da marca Contenco, com display de 4 dígitos, memória de pico e conexão RS-232.

3.4 Metodologia

3.4.1 Produção dos Pilares

Como a finalidade da pesquisa era verificar a eficiência dos reforços com CFRP, todos os pilares foram confeccionados a partir do mesmo concreto, possuindo as mesmas características geométricas e a mesma disposição de armaduras internas, de forma que a única diferença entre eles fosse a disposição dos CFRP's. Assim, foram produzidos cinco pilares, com comprimento de 55,0 cm e seção transversal quadrada de 10,0 cm por 10,0 cm. Foram utilizadas 2 barras de 8,0 mm de diâmetro dobradas para formar as armaduras longitudinais, de modo que as seções transversais possuíssem uma barra em cada canto, e barras de 5,0 mm de diâmetro para compor as armaduras transversais (estribos). A Figura 5 mostra as dimensões dos pilares e a disposição de suas armaduras. Esse arranjo das armaduras longitudinais (parecendo estribos) foi necessário para aumentar a rigidez das extremidades das barras e melhorar o apoio das mesmas.

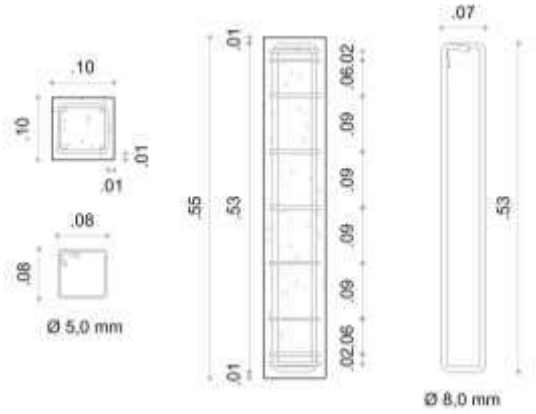


Figura 5: Detalhamento dos pilares (sem escala e cotas em metros)

Os estribos centrais foram espaçados de 9,0 cm, e nas extremidades foram colocados dois estribos próximos para aumentar a resistência, uma vez que nessas regiões as tensões não são uniformes, por conta da aplicação das cargas. Foi ainda, utilizado um cobrimento de 1,0 cm em todas as faces dos pilares.

3.4.2 Reforço com CFRP

Segundo Sudano [9], pilares com seções transversais quadradas apresentam distribuições de tensões internas de forma parabólica em cada uma de suas faces, com inclinação inicial de aproximadamente 45º, causando concentração de tensões nos cantos, o que pode provocar ruptura prematura da camisa de CFRP. Assim, para aumentar a eficiência do reforço é necessário arredondar os cantos dos pilares antes de se aplicar o sistema compósito. Seguindo então recomendações do fabricante do sistema utilizado, os cantos dos quatro pilares que receberiam reforço foram arredondados com uma lixadeira elétrica e disco para concreto, procurando-se garantir um raio de arredondamento de 1,0 cm.

Para análise da eficiência do reforço, buscou-se verificar como o comportamento dos pilares variava com o aumento da área encamisada, identificando-se em que regiões dos pilares a aplicação das fibras seria mais eficiente. Assim, cada um dos quatro pilares a serem reforçados recebeu uma disposição de faixas de fibras diferente, ficando da seguinte forma: o pilar P2 com uma faixa de 10,0 cm de largura, o pilar P3 com duas faixas de 10,0 cm de largura, o pilar P4 com três faixas de 10,0 cm de largura e o pilar P5 com uma faixa de 40,0 cm de largura. As faixas foram dispostas de modo a ficarem centralizadas e equidistantes e todas elas possuíam comprimento de 50,0 cm, sendo 40,0 cm para envolver o pilar e os outros 10,0 cm para o transpasse, necessário para garantir a ancoragem das fibras, de acordo com o fabricante. A Figura 6 a seguir mostra a configuração dos reforços usados e as dimensões das faixas de fibras.

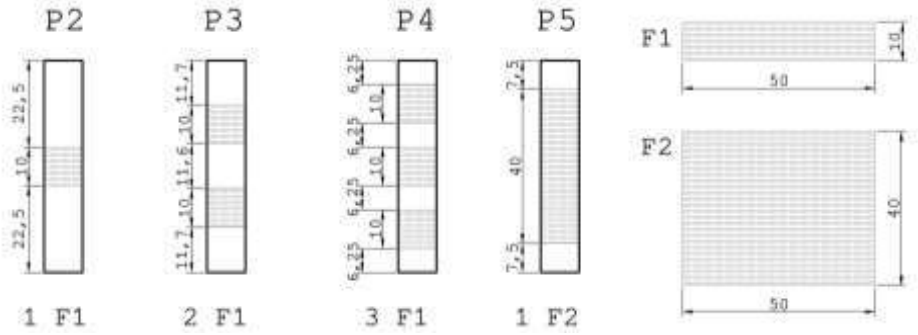
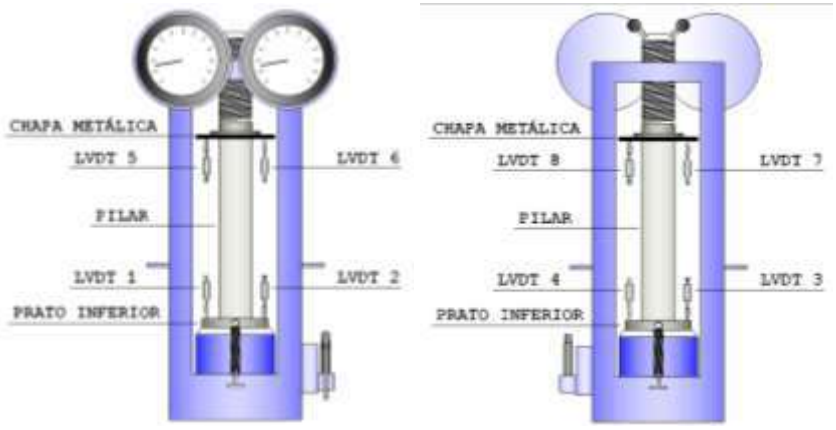


Figura 6: Disposição e dimensões das faixas de CFRP (sem escala e cotas em centímetros)

3.4.3 Ensaios de Compressão Axial

Após decorridos 15 dias da aplicação do sistema compósito CFRP nos pilares, e já estando com 104 dias desde a concretagem dos mesmos, foram realizados os ensaios para verificar a eficiência dos reforços aplicados nos modelos. O ensaio realizado para medir a capacidade resistente dos pilares consistiu em aplicar cargas centralizadas nas extremidades dos modelos, com mesma intensidade e sentidos opostos, de forma a se obter uma compressão axial. Para isso, os pilares foram posicionados na prensa, de forma centralizada, apoiados no prato inferior, e na extremidade superior dos modelos foi colocada uma chapa metálica, de modo a uniformizar a reação aplicada pelo apoio da prensa.

Como consequência da compressão, ocorre um encurtamento axial e uma expansão lateral dos pilares. Para medir o encurtamento dos modelos foram utilizados transdutores de deslocamento (LVDT's) posicionados no prato inferior da prensa e na chapa metálica colocada no topo dos pilares (Figura 7). A diferença entre os valores obtidos para o deslocamento da base e do topo dos pilares é igual ao encurtamento sofrido pelos pilares por causa da compressão axial. Dividindo o valor do encurtamento pelo comprimento inicial dos modelos, obtém-se a sua deformação específica, a qual é usada para avaliar o comportamento carga-deformação dos pilares.



(a) (b)

Figura 7: Esquema de montagem dos LVDT's: (a) vista frontal e (b) vista posterior da prensa

Durante os ensaios, o carregamento foi feito de forma gradual, interrompendo-se a aplicação da carga a cada incremento de 20 kN, de forma que se pudesse registrar os valores dos deslocamentos medidos pelos LVDT's. Seguiu-se com a aplicação das cargas até os pilares não suportarem mais aumento de carga, onde admitiu-se ocorrer a ruptura dos modelos.

4. PROGRAMA TEÓRICO

A análise teórica consistiu em simular numericamente os ensaios físicos realizados em laboratório, através da modelagem computacional dos pilares, realizada com o auxílio do software Abaqus (versão 6.14), que utiliza o Método dos Elementos Finitos para resolver diversos problemas de engenharia. Aliado a isso, buscou-se apresentar um modelo para interpretar o comportamento dos pilares, analisando o ganho de resistência proporcionado pelos reforços, baseando-se no Modelo de Bielas e Tirantes.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

4.1 Modelagem

A geometria dos modelos foi construída no pré-processador Abaqus/CAE. Para simular o corpo de concreto dos pilares foi utilizado um sólido tridimensional deformável, obtido por extrusão, com as dimensões 10 cm x 10 cm x 55 cm, para o pilar de referência. Para os demais pilares foi utilizado um sólido com os cantos arredondados, com raio de arredondamento de 1,0 cm. As barras longitudinais e transversais foram modeladas como barras tridimensionais deformáveis, representadas apenas por seu eixo longitudinal, para simplificar o modelo e reduzir o esforço computacional necessário para as análises. E as faixas de CFRP foram modeladas como cascas tridimensionais deformáveis, obtidas por extrusão, sendo representadas pelo seu plano médio longitudinal, também por questões de simplificação.

O material Aço considerado nas armaduras foi definido com propriedades elásticas genéricas, módulo de elasticidade (E) igual a 210 GPa e coeficiente de Poisson (ν) com valor de 0,3, sendo considerado também seu comportamento dúctil, através das suas resistências de escoamento. Já o material CFRP foi definido com módulo E e resistência à tração de acordo com os valores apresentados anteriormente. O material Concreto foi definido com os valores obtidos para o concreto utilizado nos ensaios físicos.

As simulações foram feitas aplicando-se a carga de ruptura de cada pilar, encontrada nos ensaios físicos, distribuída na superfície superior dos pilares, para verificar a distribuição de tensões internas nos modelos. Como condições de contorno foram restringidas as translações da superfície inferior dos modelos, nas três direções globais X, Y e Z.

4.2 Modelo de Bielas e Tirantes Proposto para os Pilares

Quando um pilar é submetido a forças concentradas de compressão há uma propagação das tensões internas de compressão, inicialmente com um ângulo próximo a 45 graus em relação à vertical, seguindo com direção paralela ao eixo longitudinal do pilar. Utilizando o processo do caminho de cargas, pode-se idealizar um modelo composto por bielas, tirantes e nós, que represente um pilar submetido a forças de compressão centrada. Esse modelo é apresentado na Figura 8, onde as bielas das extremidades têm inclinação de 45 graus e são ligadas a nós de onde partem bielas verticais e tirantes horizontais, que equilibram as componentes vertical e horizontal atuantes nos nós. Aqui, as armaduras transversais do pilar acabam absorvendo as tensões de tração dos tirantes e o concreto, juntamente com as barras longitudinais, resistem às tensões de compressão representadas pelas bielas verticais.

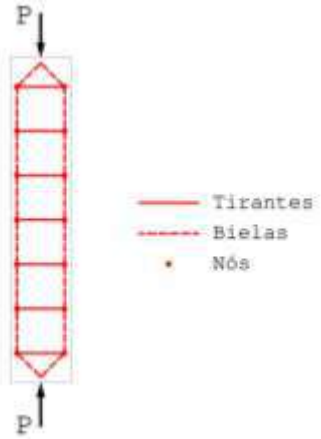


Figura 8: Modelo de bielas e tirantes para pilar sob compressão axial centrada

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaios de compressão axial

O pilar P1, utilizado como parâmetro de comparação para os demais pilares, não possuía reforço e foi o que apresentou a menor carga de ruptura. Sua ruína se deu com grande fissuração do concreto. Sua carga última foi de 350 kN com deformação de 9,63 ‰.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

O pilar P2 possuía uma faixa de CFRP de 10 cm de largura, fixada no meio do pilar. Sua ruptura se deu com considerável fissuração no concreto da parte superior, atingindo uma carga última de 395 kN, cerca de 12,86 % a mais que o pilar de referência P1. Sua deformação última apresentou o valor de 8,19 ‰.

O pilar P3 foi reforçado com duas faixas de CFRP de 10 cm de largura, espaçadas uniformemente ao longo do seu comprimento. Sua ruína aconteceu com uma carga de 420 kN, 20 % a mais que o pilar de referência e cerca de 6,33 % maior que o valor obtido para o pilar P2, que possuía metade da área de reforço. Já a sua deformação de ruptura chegou ao valor de 5,65 ‰.

O pilar P4 tinha 3 faixas de reforço de 10 cm de largura, também distribuídas uniformemente ao longo do seu comprimento. Sua carga de ruína foi de 495 kN, 41,43 % maior que a do pilar sem reforço, e sua deformação última foi de 8,24 ‰. Por conta das faixas de CFRP estarem mais próximas das extremidades do pilar, houve grande solicitação nas fibras para impedir a expansão lateral do concreto, sendo que a ruína do pilar se deu com a ruptura da faixa inferior de CFRP. Porém o que rompeu foi a resina polimérica, que mantém as fibras da manta unidas, e não as próprias fibras de carbono, indicando que se a resina possuísse uma resistência maior a ruptura poderia ter sido adiada. Também houve fissuração do concreto entre a faixa de CFRP do meio e a inferior, além de fissuras no concreto da extremidade superior do pilar.

O pilar P5, que possuía a maior área de CFRP entre os modelos analisados, foi reforçado com uma faixa de 40 cm de largura, e foi o pilar que apresentou maior carga de ruptura, com o valor de 500 kN. Sua deformação de ruptura foi de 6,67 ‰. Apesar de ter cerca de 33,33 % a mais de área encamisada com CFRP, sua resistência foi apenas 1,01 % maior que a do pilar P4, ou seja, o reforço com faixas de CFRP distribuídas uniformemente ao longo de todo o comprimento do pilar mostrou-se ser tão eficiente quanto encamisar o pilar com faixa única, mesmo esta última cobrindo uma área maior do pilar. A Figura 9 apresenta os pilares após a ruptura.



Figura 9: Pilares após a ruptura

A Figura 10 apresenta o comportamento carga-deformação de todos os pilares. Como pode ser percebido, houve ganho na capacidade resistente com o aumento da taxa de reforço dos pilares. Porém, quanto à ductilidade, não se pode tirar uma conclusão apenas a partir dos valores de deformação última, uma vez que a prensa utilizada não permitiu realizar o ensaio com variação uniforme da deformação longitudinal, o que teria possibilitado obter o trecho do diagrama referente à ductilidade dos pilares durante o ensaio.

A Tabela 2 mostra os valores da carga de ruptura ($N_{ruptura}$) e da deformação última (ε_u) dos pilares. Essa tabela também apresenta a carga nos pilares ($N_{3,50‰}$) correspondente à deformação específica de 3,50‰, que é considerada a deformação última para o concreto à compressão. Para essa deformação, verifica-se também um aumento na carga resistida pelos pilares, sendo que os valores para os pilares P4 e P5 são praticamente iguais, evidenciando a eficiência do reforço com faixas distribuídas em todo o pilar. Como as taxas de armadura transversal são as mesmas em todos os pilares, fica evidente o aumento na resistência do concreto por conta do confinamento gerado pelas camisas de CFRP, aumentando a capacidade resistente do pilar para uma mesma deformação longitudinal.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

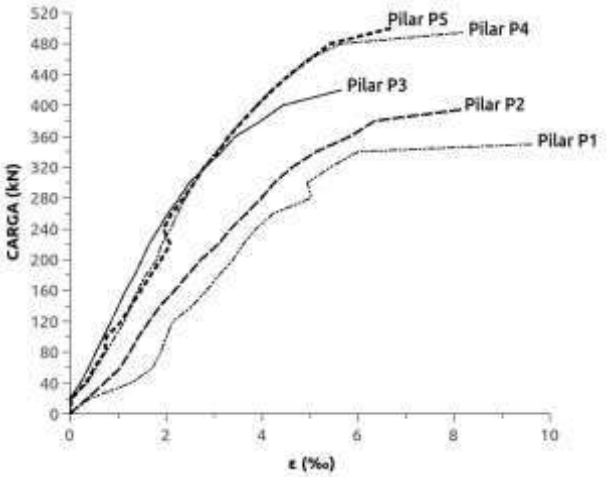


Figura 10: Comportamento carga-deformação de todos os pilares

Tabela 2 – Resultados dos ensaios

Pilar	Reforço	$N_{ruptura}$ (kN)	ε_u (‰)	$N_{3,50‰}$ (kN)
P1	-	350	9,63	210
P2	1 F1	395	8,19	249
P3	2 F1	420	5,65	362
P4	3 F1	495	8,24	374
P5	1 F2	500	6,67	373

Dividindo-se a área de reforço aplicada em cada pilar ($A_{reforço}$) pela soma das áreas das faces laterais dos pilares ($A_{concreto}$), obtêm-se os valores das taxas de reforço ($A_{reforço/Aconcreto}$) em cada modelo. A Tabela 3 mostra os valores dessas taxas. Dividindo-se também a carga de ruptura ($N_{ruptura}$) de cada pilar pelo valor da carga última do pilar sem reforço ($N_{rup.\ P1}$), tem-se o aumento da capacidade resistente gerado pelo encamisamento com CFRP, como mostrado na última coluna da Tabela 3.

Tabela 3 – Taxas de reforço e aumento da capacidade resistente dos pilares

Pilar	$A_{reforço}$ (cm²)	$A_{concreto}$ (cm²)	$A_{reforço}/A_{concreto}$	$N_{ruptura}$ (kN)	$N_{ruptura}/N_{rup.\ P1}$
P1	0	2200	0	350	1,0
P2	400	2200	0,182	395	1,128
P3	800	2200	0,364	420	1,20
P4	1200	2200	0,545	495	1,414
P5	1600	2200	0,727	500	1,428

Relacionando-se os valores das taxas de reforço com o aumento da capacidade resistente observado nos ensaios, tem-se a distribuição crescente apresentada na Figura 11. Fazendo-se então uma regressão não linear a partir desses dados, pode-se obter uma função polinomial de segundo grau que represente a linha de tendência dos pontos desse gráfico. Essa função e sua linha de tendência são mostradas na Figura 11.

Assim, tendo-se o valor da taxa de reforço aplicada no pilar (variável x), pode-se obter o ganho na capacidade resistente desse pilar reforçado (valor de f(x)). E também, pode-se obter a taxa de reforço necessária para se alcançar determinado ganho na capacidade resistente do pilar, resolvendo-se a equação de 2º grau para x.

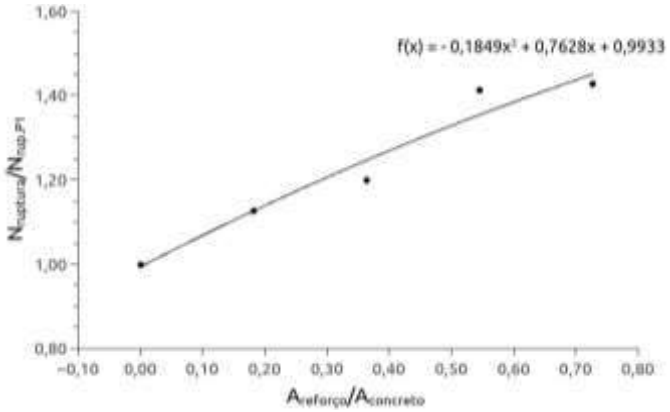


Figura 11: Linha de tendência para a relação taxa de reforço versus ganho de resistência

Conforme apresentado anteriormente, a partir de um modelo simplificado de bielas e tirantes pode-se obter a capacidade resistente de um pilar submetido a compressão axial centrada. Porém, esse modelo não considera o ganho na resistência do pilar devido ao confinamento do concreto. Assim, utilizando-se a função da linha de tendência apresentada na Figura 11, obtém-se um coeficiente k, a partir da Equação 1 a seguir, para a correção da capacidade resistente do pilar calculada com o modelo simplificado de bielas e tirantes ilustrado na Figura 8. Ou seja, após encontrada a carga P, resistida pelo piar, basta multiplicar seu valor pelo coeficiente de correção k, e será obtida uma estimativa da carga máxima suportada pelo pilar reforçado com CFRP.

$$k = - 0{,}1849\eta^2 + 0{,}7628\eta + 0{,}9933 \quad (1)$$

Sendo η o valor da taxa de reforço aplicada no pilar, ou seja, a área de faixas de CFRP utilizada dividida pela soma das áreas das faces laterais do pilar.

5.2 Análises no Abaqus

A Figura 12 mostra a distribuição de tensões de compressão no pilar de referência P1. Pode-se perceber que nas faces desse pilar o valor da compressão varia em torno 0,0 MPa e 35,0 MPa, já nas barras longitudinais, no interior do pilar, os valores chegam a 260,0 MPa, isso porque o aço das armaduras tem um módulo de elasticidade bem maior que o concreto. Já a Figura 13 ilustra a variação das tensões de compressão no concreto do interior desse pilar, onde se pode notar tensões que variam entre 13,0 e 19,0 MPa na maior parte do centro do pilar, chegando a valores próximos de 28,0 MPa na extremidade superior, onde foi aplicada a carga. Esse valor se assemelha ao da resistência média à compressão do concreto utilizado, o que pode explicar o esmagamento do concreto nessa região, como mostrado na Figura 9.

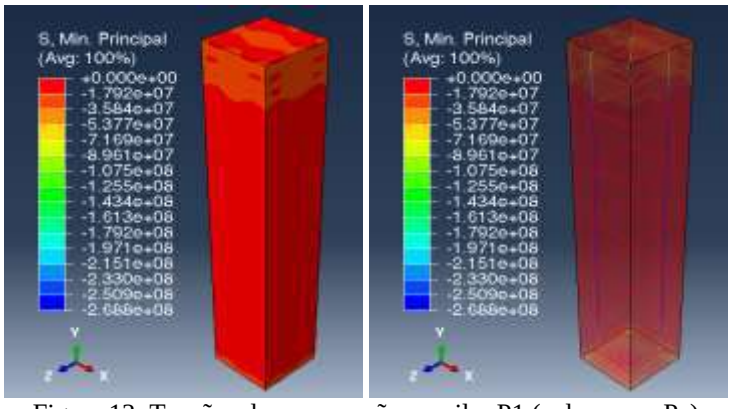


Figura 12: Tensões de compressão no pilar P1 (valores em Pa)

A Figura 14 mostra as tensões de compressão nos modelos dos pilares P2, P3, P4 e P5, onde se percebe uma grande semelhança entre eles. Porém, pode-se perceber uma ligeira diminuição no valor máximo da tensão de compressão. Esse valor é a máxima tensão atuando nas barras longitudinais, no interior dos pilares. Isso indica um pequeno aumento na mobilização do concreto com o aumento das taxas de reforço, ou seja, o aumento no confinamento modificou, ainda que ligeiramente, para as análises realizadas, a distribuição de tensões no interior dos pilares.

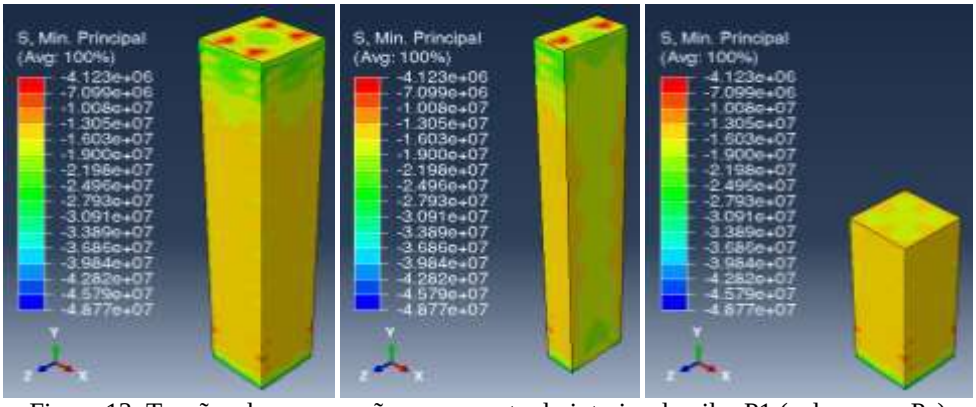
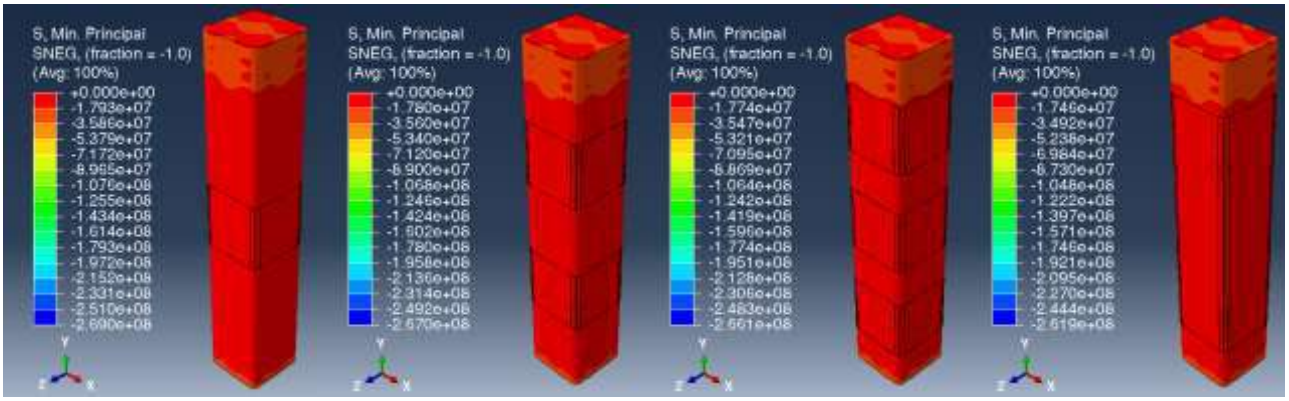


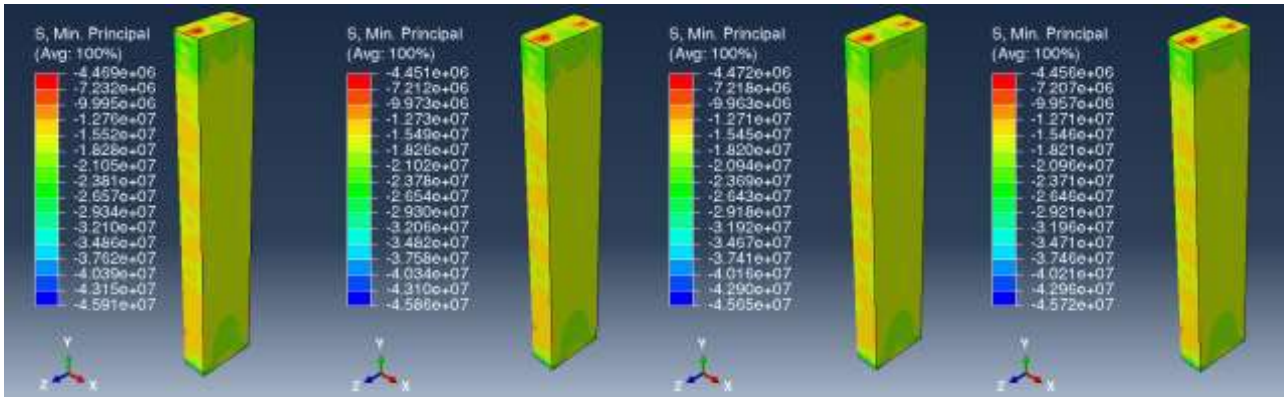
Figura 13: Tensões de compressão no concreto do interior do pilar P1 (valores em Pa)

A Figura 15 mostra a distribuição das tensões no interior do concreto dos pilares reforçados, evidenciando essa ligeira alteração na distribuição das tensões, como pode ser percebido pelos valores máximos e mínimos apresentados nas legendas. Essa semelhança entre os modelos, apesar do aumento da área de reforço, se deve a simplificações na modelagem do material CFRP e na configuração do comportamento da interface concreto-CFRP. Porém, comparando as Figuras 15 e 13, percebe-se que a presença das faixas de CFRP altera consideravelmente a distribuição das tensões de compressão no interior do concreto. Pode-se ver que o confinamento mobiliza o concreto da região central dos pilares, suportando uma faixa maior de tensões, o que explica o aumento na capacidade resistente dos pilares reforçados em relação ao de referência.



(a) (b) (c) (d)

Figura 14: Tensões de compressão nos pilares: (a) P2, (b) P3, (c) P4 e (d) P5 (valores em Pa)



(a) (b) (c) (d)

Figura 15: Tensões de compressão no concreto do interior dos pilares: (a) P2, (b) P3, (c) P4 e (d) P5 (valores em Pa)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O reforço dos pilares por encamisamento com CFRP foi muito eficiente no aumento da capacidade resistente dos pilares submetidos à compressão axial. Pôde-se perceber também que o ganho nessa capacidade é diretamente proporcional ao valor da taxa de reforço utilizada.

Verificou-se que o reforço com faixas de CFRP distribuídas em todo o comprimento do pilar, como feito com o pilar P4, é tão eficiente quanto o reforço utilizado no pilar P5, que consistiu de uma única faixa cobrindo quase todo o pilar, mesmo este último tendo uma maior taxa de reforço.

Pôde-se perceber que as armaduras transversais causam um confinamento no concreto, aumentando a ductilidade dos pilares, fazendo com que eles apresentem deformações últimas bem maiores que a deformação de ruptura do concreto sob compressão.

O uso do Modelo de Bielas e Tirantes, aliado ao Método dos Elementos Finitos, é uma forma bastante confiável de se prever o comportamento de pilares submetidos a cargas de compressão. Assim como tem sido demonstrado sua eficiência para o dimensionamento de diversos elementos estruturais, podem-se utilizar estes modelos também em pilares.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Viapol, empresa patrocinadora desta pesquisa, por fornecer as mantas de fibras de carbono e assim incentivar o desenvolvimento de conhecimento tecnológico e o aperfeiçoamento de técnicas de reforço estrutural, sempre contribuindo para o engrandecimento da Engenharia Civil.

Agradecem também à Construtora Cameron, pelo custeio dos materiais e mão de obra empregados na confecção dos pilares, e pelo apoio de sempre às pesquisas realizadas pelo GEM, mostrando ser uma empresa que se preocupa com o futuro da Construção Civil.

8. REFERÊNCIAS

[1] Gibson, R. F. *Principles of composite material mechanics.* McGraw-Hill, 1994.
[2] Machado, A. P. *Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono.* Viapol. s/d.
[3] Fédération Internationale du Béton – FIB. *Structural concrete: textbook on behaviour, design and performance.* Bulletin 1, v. 1, p. 35-37, p. 206-212, 1999.
[4] Richart, F. E.; Brantzaeg, A.; Prown, R. L.; *A study f the failure of concrete under combined compressive stress*. Urbana: Engineering Experimental Station, University of Illinois. Bulletin n. 190, 1928.
[5] Balmer, G. G. *Shearing Strentgh of Concrete Under High Triaxial Stress-Computation of Mohr's Envelope as a Curve.* Structural Research Laboratory Report No. SP-23. Bureau of Reclamations, United States Department of the Interior, 1949.
[6] Carrazedo, R. *Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono.* Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.
[7] Edwards, K. L. *An overview of the technology of fibre-reinforced plastics for design purposes.* Materials and Design, v. 19, p. 1-10, 1998.
[8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.* ABNT: Rio de Janeiro, 2014.
[9] Sudano, A. L. *Influência da forma da seção transversal no confinamento de pilares de concreto armado encamisados com PRFC (polímero reforçado com fibra de carbono).* Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.