

PILARES DE CONCRETO REFORÇADOS POR ENCAMISAMENTO COM POLÍMEROS DE FIBRAS DE CARBONO

Sanvezzo, Rodolfo Coleone¹; Benedito, André Vitor²; Ferrari, Vladimir José³

¹Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, eng.rodolfocoleone@gmail.com

²Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, pg403383@uem.br

³Doutorado em Engenharia de Estruturas, Universidade Estadual de Maringá, vladimirjf@hotmail.com

Resumo: Pilares são elementos estruturais de grande importância numa edificação e que durante sua vida útil podem ser submetidos a um processo de reforço para aumento da sua capacidade. O reforço com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) é atraente pela facilidade de aplicação e não modificação da seção. O material vem sendo utilizado em pilares pelo efeito de confinamento. Entretanto, em pilares com seções não circulares, o efeito do confinamento não é eficiente como em circulares. Em geometrias de seções não circulares, parte do concreto não fica devidamente confinado. A pesquisa busca estudar o comportamento do reforço de pilares de concreto retangulares pelo confinamento com manta de fibras de carbono. O objetivo é avaliar o desempenho e a eficiência do reforço em pilares retangulares não armados, com altura de 800 mm e relação entre os lados igual a 2. Foram ensaiados dois grupos de pilares, um sem reforço e outro reforçado. Os resultados obtidos indicam eficiência do reforço por meio de melhoria na ductilidade e aumento da capacidade de carga em 30%.

Palavras-chave: Pilar, Concreto, Retangular, Encamisamento, Fibras de carbono.

Abstract: Columns are important structural elements in a building and can be reinforced to increase their capacity. Reinforcement by bonding Fiber Reinforced Polymers (FRP) is attractive because it is easy to apply and does not modify the section. This material has been used in columns for its confinement effect. However, the confinement of columns in non-circular sections is not as efficient as in circular ones. Non-circular geometries behave differently because part of the concrete is not confined. This research aims to study the behavior of rectangular concrete columns reinforced with carbon fiber mats. The aim is to evaluate the performance of rectangular columns with a section side ratio of 2 and to determine the efficiency of the reinforcement. Two groups of columns were tested, one without reinforcement and the other reinforced with a layer of mat. The results obtained indicate the efficiency of the reinforcement by improving ductility and increasing load capacity by 30%.

Keywords: Column, Concrete, Rectangular, Jacketing, Carbon fibers.

1. Introdução

Pilares são elementos estruturais lineares de eixo reto em que as forças normais de compressão são preponderantes. A importância dos pilares numa edificação é grande visto que sua ruptura pode provocar o colapso parcial ou até mesmo total da estrutura.

Os pilares, conforme modificações e demandas de uso da edificação ao longo da vida útil, podem ser submetidos a um processo de reforço para aumento de sua capacidade de carga. Para tanto, existem técnicas já difundidas no meio técnico, como a colagem de chapas de aço na superfície do concreto, o aumento da seção transversal do pilar com novas barras de aço e envolvimento com novo concreto e, a colagem de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF).

O uso de PRF para o reforço de pilares é extremamente atraente pois, as dimensões da seção transversal praticamente não são modificadas visto que a espessura dos PRFs é da ordem de milímetros. A depender de qual é a demanda pelo reforço do pilar (como por exemplo, ampliação de espaço do ambiente da edificação), o aumento das dimensões da seção transversal nem mesmo é possível.

O ACI 440.2R [1] comenta que o reforço pelo mecanismo de confinamento da seção transversal com PRF pode ser utilizado para incrementar a resistência e melhorar a ductilidade de pilares de concreto armado. O confinamento do concreto é obtido pelo encamisamento da seção do pilar por meio da orientação das fibras poliméricas transversalmente ao eixo do elemento para restringir a deformação transversal do concreto. Pilares com seção de geometria circular são elementos em que o mecanismo do confinamento com PRF é significativo em termos de eficiência estrutural. Por outro lado, pilares com geometria de seção não-circular (quadrada ou retangular) comportam-se diferentemente de uma seção circular, pois nem todo o concreto da seção fica devidamente confinado. As regiões de canto e o núcleo das seções não-circulares ficam eficientemente confinadas, mas outras partes permanecem desconfinadas (Seible et al. [2]; Carrazedo [3]; Sudano [4]; Triantafillou et al. [5]).

A proposta da pesquisa é estudar o efeito do reforço de pilares de concreto de seção retangular pelo confinamento com manta de fibras de carbono. O objetivo é avaliar o desempenho dos pilares retangulares com relação entre as dimensões da seção igual a 2 ($b = 120 \text{ mm}$ e $h = 240 \text{ mm}$). Para isso, aplica-se uma abordagem baseada em ensaios experimentais e investigações teóricas por meio de modelo numérico e de modelos analíticos. Devido a limitação quanto ao número de páginas, os resultados numéricos e analíticos não são aqui apresentados, devendo o leitor consultar Sanvezzo et al [6].

2. Programa experimental

O programa experimental foi caracterizado por meio ensaios de compressão axial centrada em 8 (oito) pilares de concreto, incluindo o primeiro grupo (P1) com 4 (quatro) pilares de referência e o segundo grupo (P2) com outros 4 (quatro) pilares reforçados pelo encamisamento com uma camada de manta de fibra de carbono. Os

ensaios foram conduzidos no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Os dois grupos de pilares foram idealizados de maneira a analisar, experimentalmente e teoricamente (analítico e numérico), a eficiência do reforço polimérico por meio do confinamento da seção transversal retangular.

Os pilares não foram dotados de armadura (longitudinal e estribos) seguindo tendência das pesquisas que buscam estudo exclusivo do efeito de confinamento promovido pelo reforço. A seção transversal dos pilares é retangular com relação entre o maior lado ($h = 240$ mm) e o menor lado ($b = 120$ mm) igual a 2, conforme indicado na Tabela 1. A altura dos pilares foi definida em 800 mm utilizando-se toda a altura livre disponível do pórtico da máquina de ensaio universal. O índice de esbeltez (λ) para os pilares tem valor de apenas 23 de forma a não ocorrer flambagem nos elementos.

Tabela 1: Nomenclatura e descrição dos grupos de pilares

Grupo		Seção transversal (mm)			Esbeltez		Tipo de reforço
		b	h	h/b	λ	L _e (mm)	
1	P1	120	240	2	23,09	800	Sem reforço
2	P2	120	240	2	23,09	800	Encamisamento com uma camada de fibra de carbono

O traço do concreto em massa é de 1:5:5:0,9 (cimento:areia:brita:a/c), para os dois grupos de pilares, visando-se à obtenção de uma resistência à compressão de aproximadamente 10 MPa na data do ensaio dos pilares (valor de resistência do concreto definido considerando-se a limitação da capacidade da máquina de ensaio). Foram moldados três corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) para caracterização do concreto de cada grupo por meio da determinação do módulo de elasticidade pela ABNT NBR 8522-1 [7] e da resistência à compressão pela ABNT NBR 5739 [8].

Foi utilizado aditivo superplastificante (ADVA® 548 da marca GCP *Applied Technologies* – dosagem recomendada entre 0,4% e de 1,2% sobre a massa de cimento), para garantia de uma trabalhabilidade adequada ao concreto e adensamento homogêneo no interior das fôrmas. O concreto foi dosado com teor de argamassa de 55% e Slump de 130 mm $\pm$ 20 mm (Figura 1a).

As fôrmas utilizadas para moldagem dos pilares foram de madeira do tipo madeirite plastificado com 17 mm de espessura. Para facilitar o processo de retirada das fôrmas e evitar possíveis aberturas durante a moldagem, projetou-se um conjunto de fôrmas modulares com reforço nas abas laterais por caibros e parafusos (Figura 1b). Previamente a moldagem e para garantia do arredondamento dos cantos da seção dos pilares, fez-se uso da adição de rejunte acrílico nos cantos das fôrmas. A massa foi moldada com pressão de tubo plástico PVC para obtenção da geometria e dimensão desejada com raio de arredondamento “ r_c ” igual a 20 mm.

Figura 1: Moldagem do pilar



A manta de fibra de carbono empregada no reforço dos pilares tem nome C-Sheet 300 da S&P Clever do Brasil e a resina epóxi foi a JGtech adesivos e revestimentos. A manta tem espessura de 0,166 mm, resistência à tração de 4.900 MPa e módulo de elasticidade de 230 GPa. A resina é do tipo bi-componente com relação de mistura em volume de 1:1 e resistência à tração de 42,30 MPa. Valores conforme informações dos fabricantes.

A Figura 2a mostra o aspecto do pilar após a execução do encamisamento. A instrumentação nos pilares do grupo P1 foi composta por dois extensômetros elétricos colados diretamente na superfície de concreto na direção do eixo do pilar. Foram também utilizados dois transdutores do tipo LVDT com curso de 10 mm, centralizados ao longo do eixo das duas maiores faces do pilar. A instrumentação dos pilares do grupo P2 foi composta por seis extensômetros elétricos posicionados na direção da fibra de carbono para o registro das deformações específicas da manta de reforço na seção central do pilar como exemplificado pela Figura 3.

Na Figura 4 tem-se o aspecto geral do ensaio dos pilares posicionados na Máquina universal de ensaio do tipo eletromecânica, microprocessada, série 23 Emic com capacidade de 600 kN. Os valores de força foram obtidos por meio de célula de carga, registrados em conjunto com os deslocamentos dos transdutores e deformações dos extensômetros com um sistema eletrônico de aquisição de dados Spider 8 da HBM e software Catman Easy. Adicionalmente ao registro dos dados de força, transdutores (LVDTs) e deformações específicas (extensômetros), foram também aquisitados os valores de deslocamento do pistão do atuador hidráulico da máquina de ensaio por meio do Software Bluehill da Emic/Instron.

Figura 2: Pilar encamisado

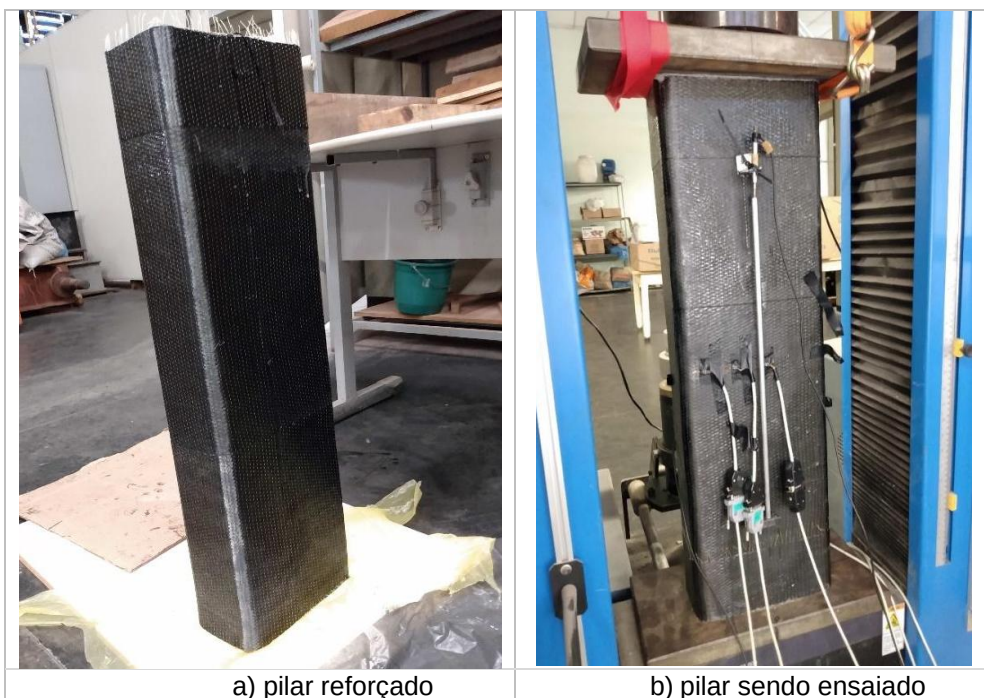


Figura 3: Posição dos extensômetros elétricos

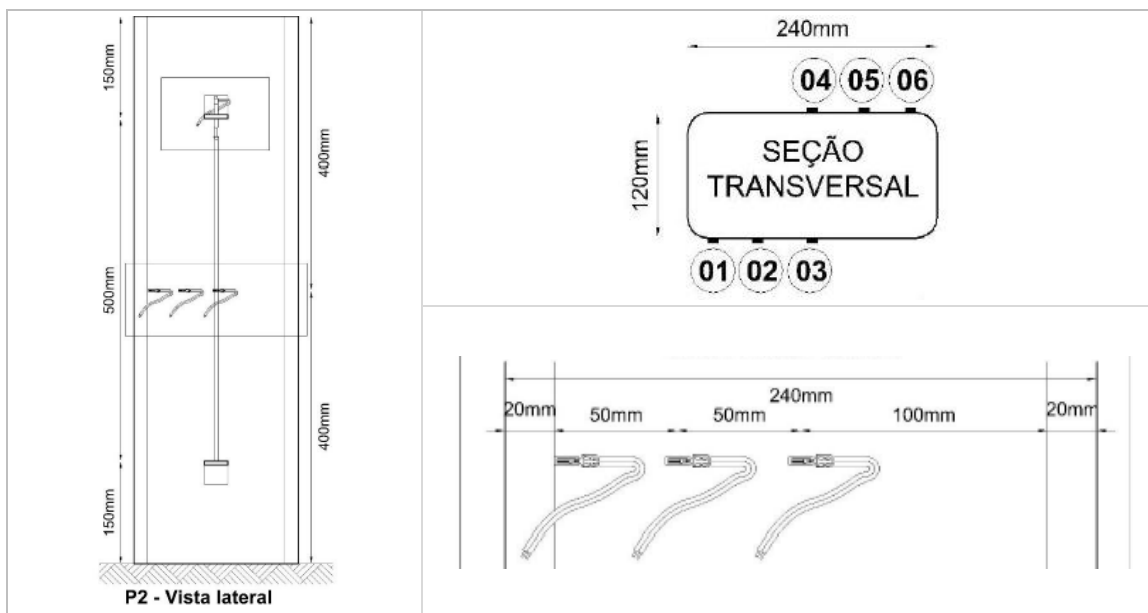
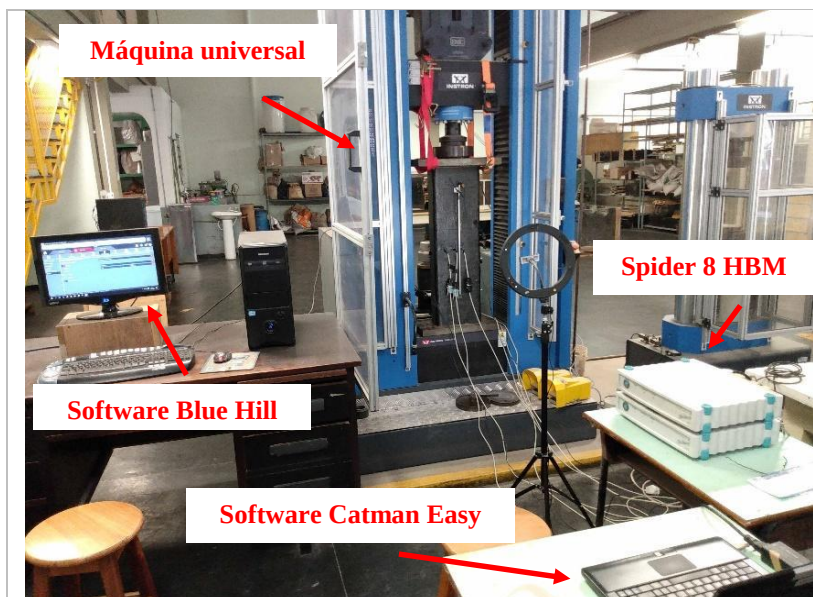


Figura 4: Aspecto geral do ensaio dos pilares



3 Apresentação e análise dos resultados

Na Figura 5 apresentam-se os resultados das curvas força-deformação de cada um dos pilares do grupo P1 bem como a curva média representativa do grupo. Os valores de deformação axial são aqueles obtidos a partir do tratamento dos dados registrados pelo deslocamento do pistão da máquina de ensaio. Devido a problemas ocorridos durante a aquisição dos dados, a curva referente ao pilar P1-2 não é apresentada. A curva média é bem representativa devido a resposta homogênea obtida entre os pilares do grupo. A divergência no comportamento entre os pilares foi apenas aquela registrada no ramo descendente pós-pico.

O valor médio de força máxima para os pilares do grupo P1 foi igual a 270,73 kN (com um desvio padrão de apenas 3,50 kN) e deformação média específica correspondente a 0,12% conforme registro pelos dados do pistão (praticamente igual ao valor obtido pelo extensômetro elétrico: 0,13%).

A ruína dos pilares do grupo 1 é mostrada na Figura 6 (setas em vermelho indicam as superfícies de ruptura em cada pilar) onde se vê que a ruptura dos pilares P1-1 e P1-3 ocorreu região A correspondente ao terço superior do pilar. No P1-4 a ruptura deu-se na região B onde fica evidenciada a expansão lateral do concreto.

Em todos os pilares do grupo P1 foi constatado que a superfície de ruptura deu-se a partir do surgimento de uma trinca vertical a partir da região A e correspondente ao valor da força de pico. Na região A, a trinca propagou-se praticamente na vertical, inclinando-se quando da propagação na região B. Com o surgimento da trinca, a resposta dos pilares foi de deformação sem registros de aumento na capacidade de carga.

Figura 5: Curvas força-deformação dos pilares do grupo P1

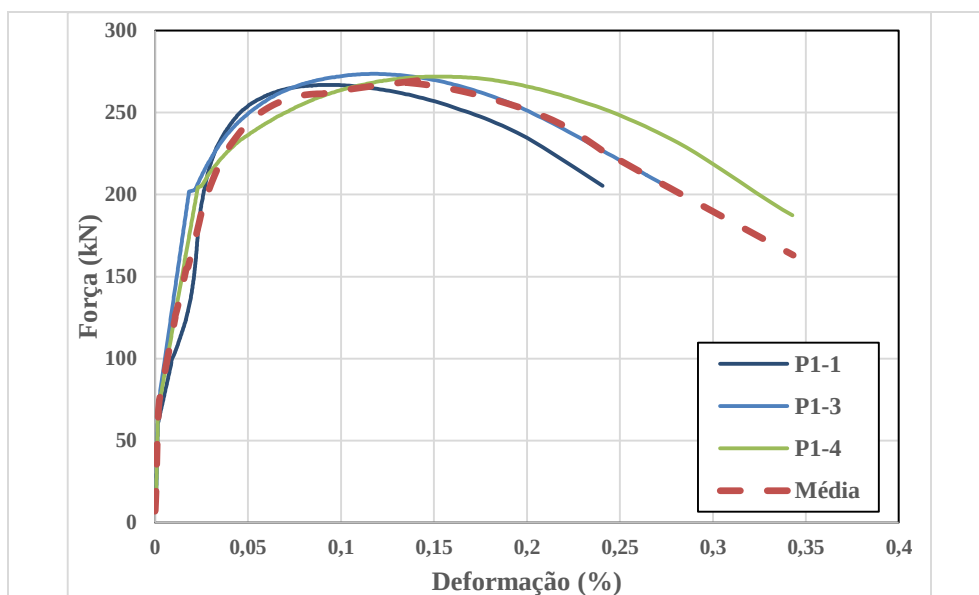
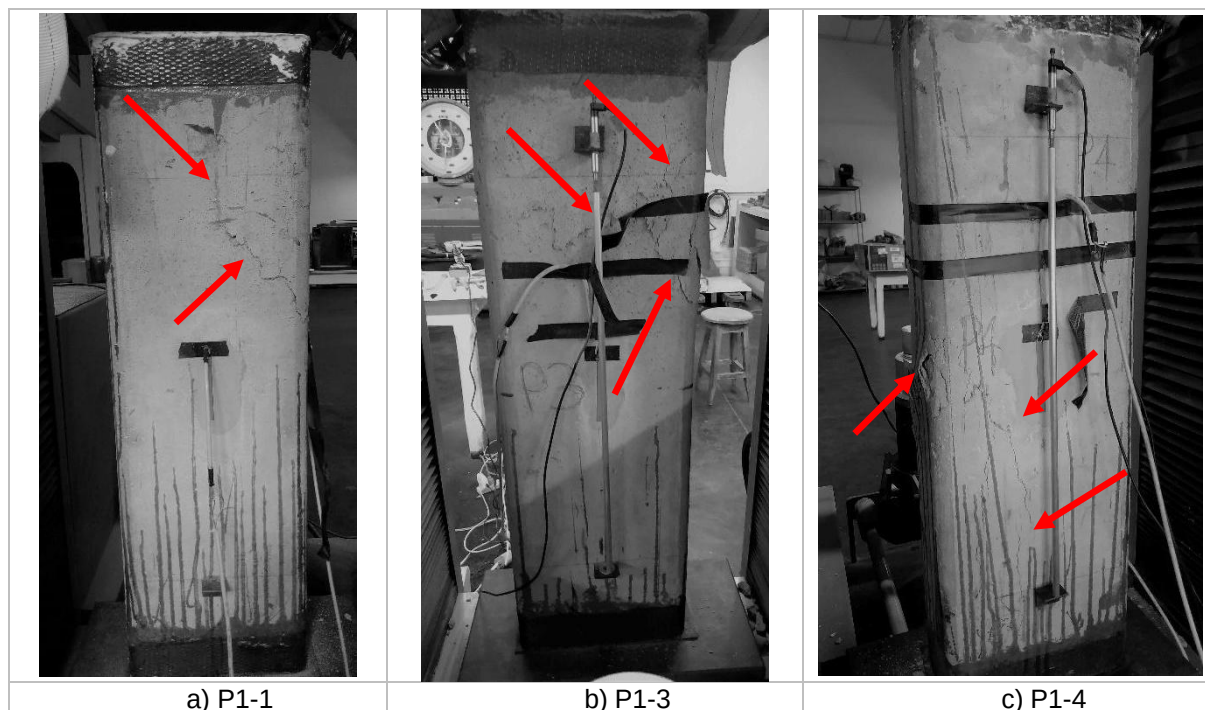
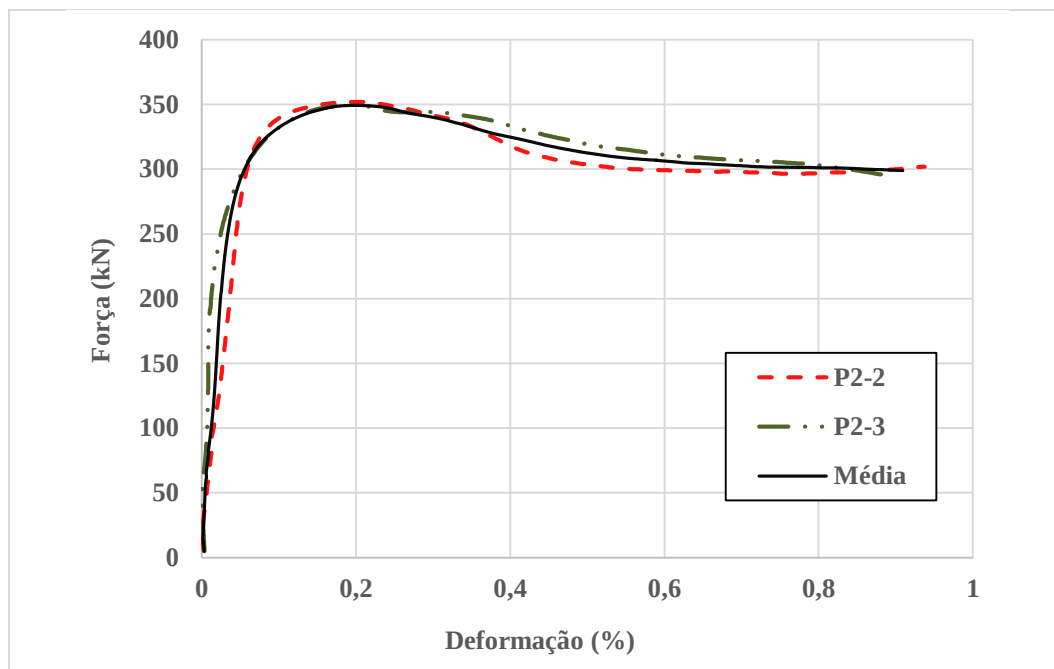


Figura 6: Ruína dos pilares do grupo P1



Na Figura 7 são apresentados os resultados das curvas força-deformação de cada um dos pilares do grupo P2 bem como a curva média representativa do grupo. A curva média foi obtida considerando-se somente o comportamento dos pilares P2-2 e P2-3, pois, o ensaio do pilar P2-4 foi interrompido anteriormente a ruína (questões de segurança devido acentuada deformação lateral do eixo no topo do pilar e inclinação da chapa de aço) e os dados do P2-1 não foram aquisitados corretamente.

Figura 7: Curvas força-deformação dos pilares reforçados do grupo P2



No pilar P2-2 observou-se que ocorreu ruptura da manta na região A do pilar. Primeiramente ocorreu ruptura das fibras localizadas no canto da seção transversal como é mostrado na Figura 8, sendo que a ruptura por tração das fibras foi precedida por elevados níveis de deformação do concreto, tanto axial como lateral. A deformação longitudinal do concreto do pilar resultou, num primeiro momento, em sobreposição das fibras da manta, seguido de visível expansão lateral do concreto e ruptura da manta. Após a ruptura localizada das fibras do canto foi possível constatar desintegração do concreto por meio de resíduos que fluíam pela abertura da manta onde as fibras foram rompidas.

No P2-3 a sobreposição das fibras da manta ocorreu na região B do pilar devido a deformação do concreto como é mostrado na Figura 9. Logo após, observou-se acentuada expansão lateral do concreto, de forma localizada e seguida pelo descolamento de uma faixa da manta de sobreposição e na seção onde se deu visível expansão lateral do concreto.

Na Tabela 2 são indicados os valores de força máxima, tensão correspondente, os valores médios e o desvio padrão (DP) para os pilares dos grupos P1 e P2. São também apresentados os valores das deformações específicas, axial do pilar e as transversais registradas para a manta de reforço, ambas correspondentes a força máxima.

Como esperado, o efeito do confinamento resultou em incremento na capacidade de carga dos pilares do grupo P2 (350,85 kN) em relação aos pilares de referência (270,74 kN) de até 30%.

Figura 8: Ruína do pilar P2-2

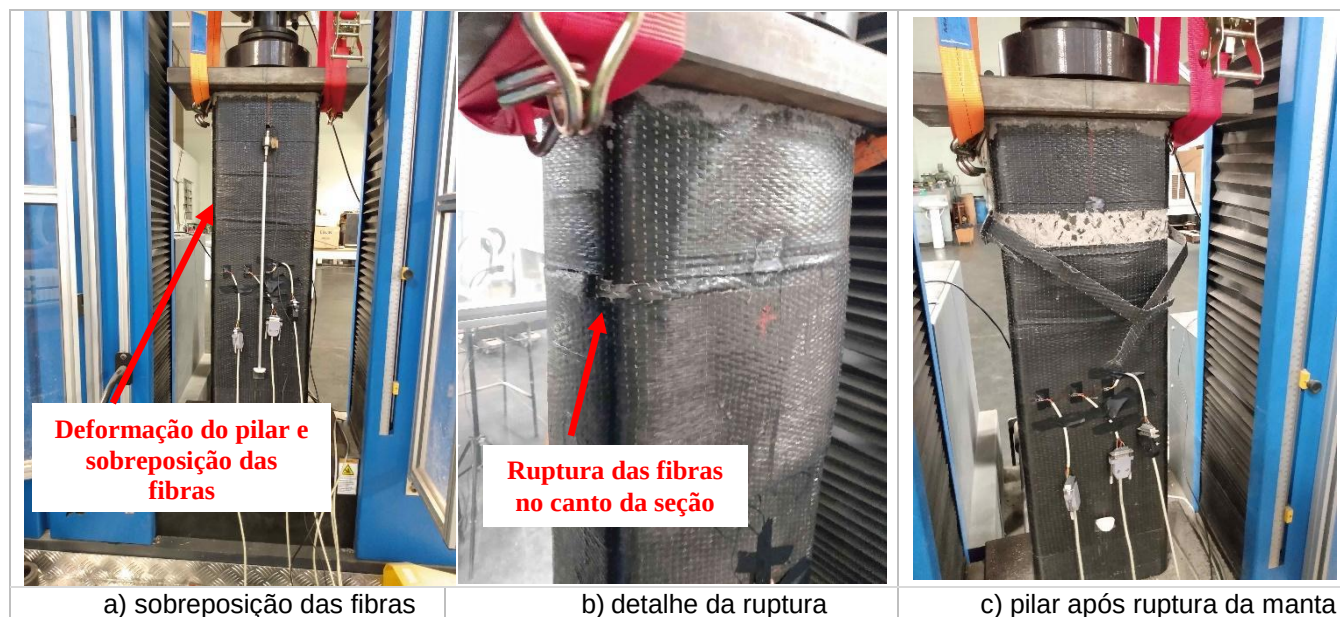
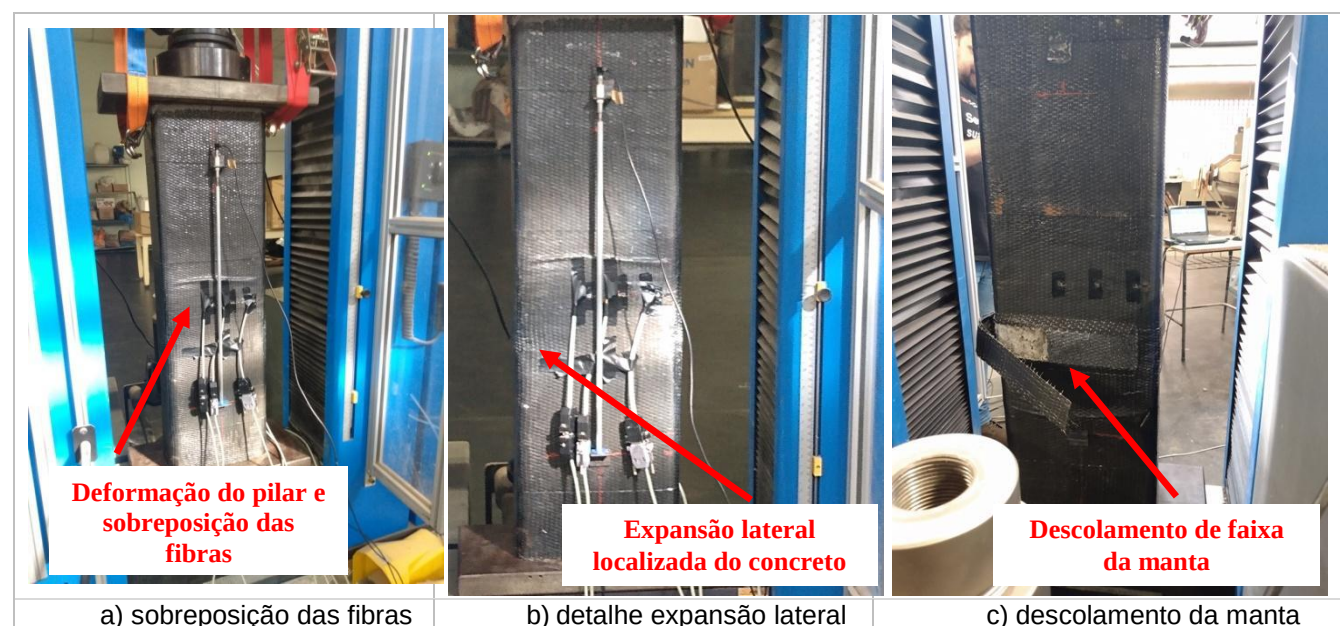


Figura 9: Ruína do pilar P2-3



Os valores de força nos pilares P2-2 e P2-3 são praticamente idênticos e correspondente ao valor médio igual a 350,85 kN, com desvio padrão de 1,58 kN. A tensão média obtida foi igual a 12,33 MPa e o valor de deformação específica axial registrada nos dois pilares, correspondente a força máxima, foi o mesmo e igual a 0,20%. As deformações no reforço e correspondentes a força máxima também foram praticamente as mesmas registradas nos dois pilares, sendo o valor médio igual a 0,05% no canto da seção, 0,06% no centro e de 0,09% na posição intermediária.

Tabela 2: Valores de força máxima, tensão e deformações correspondentes do grupo P2

Grupo	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação axial* (%)	Deformação lateral* (%)		
				01 e 06	02 e 05	03 e 04
P1-1	266,81	9,38	0,10	-	-	-
P1-3	273,52	9,61	0,12	-	-	-
P1-4	271,87	9,55	0,16	-	-	-
Média	270,74	9,51	0,12	-	-	-
DP	3,50	0,12	0,03	-	-	-
P2-2	351,97	12,37	0,20	0,05	0,09	0,05
P2-3	349,73	12,29	0,20	0,04	0,09	0,07
Média	350,85	12,33	0,20	0,05	0,09	0,06
DP	1,58	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01

Pilar P1-2: dados perdidos durante o ensaio por problemas na aquisição;

Pilar P2-1: dados perdidos durante o ensaio por problemas na aquisição;

Pilar P2-4: ensaio interrompido muito antes da ruína;

*correspondente a força máxima;

4. Conclusões

São conclusões da pesquisa:

- Ficou evidenciado aumento na capacidade de carga dos pilares reforçados em relação àqueles de referência de até 30%;
- O reforço por confinamento da seção transversal retangular com polímeros reforçados com fibras de carbono resultou em aumento na resistência à compressão e incremento na ductilidade dos pilares;
- A ruína nos pilares reforçados pela ruptura localizada das fibras, foi precedida por significativa expansão lateral volumétrica da seção, efeito relacionado com a baixa resistência à compressão do concreto;
- No pilar P2-3 em que a ruptura da manta ocorreu próxima da seção onde os extensômetros estavam colados, foram registrados os maiores valores de deformação no reforço. Para esse pilar foi constatada uma tendência de maior evolução dos valores das deformações específicas do reforço no canto da seção transversal.

5. Referências bibliográficas

[1] ACI 440.2R (2017) Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute. Reported by ACI Committee 440. Farmington Hills, Estados Unidos.

- [2] Seible F. *et al.* (1997) Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fibre Jackets, *Journal of Composites in Construction*, ASCE, 1(2), p. 52–62.
- [3] Carrazedo, R. (2002) *Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono*. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- [4] Sudano, A. L. (2005) *Influência da forma da seção transversal no confinamento de pilares de concreto armado encamisados com PRFC (polímero reforçado com fibras de carbono)*. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- [5] Triantafillou, T. C. *et al.* (2015) FRP confinement of wall-like reinforced concrete columns. *Materials and Structures*, v. 49.
- [6] Sanvezzo, R. C.; Benedito, A. V.; Ferrari, V. J. (2024) Comportamento de pilares de concreto retangulares reforçados por encamisamento com polímeros de fibras de carbono. *Revista Ambiente Construído*, v. 24.
- [7] NBR 8522-1 (2021) Concreto endurecido – determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [8] NBR 5739 (2018) Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.