CBPAT 2020 ANAIS
CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES
DE 15 A 17 DE ABRIL | FORTALEZA - CE
http://dx.doi.org/10.4322/CBPAT.2020.081
ISBN 978-65-86819-05-2

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO NA REABILITAÇÃO DE PILARES CURTOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO CONCÊNTRICA – ESTUDO DE CASO

DAMASCENO, DAVI LUIZ GRUHN
Engenheiro Civil, M.Sc.
Tribunal Regional do Trabalho da 11ª Região
Manaus/Amazonas; Brasil
engdavi@gmail.com

SANTOS, JOSÉ RICARDO RIBEIRO DOS
Engenheiro Civil
Tribunal Regional do Trabalho da 11ª Região
Manaus/Amazonas; Brasil
ricardo9718@hotmail.com

RESUMO

No campo da patologia das construções, a reabilitação de estruturas de concreto é uma temática bastante discutida no meio técnico. O surgimento de manifestações patológicas em pilares de concreto armado – oriundas de falhas no projeto, execução e/ou manutenção –, requer intervenções precisas e adequadas que devolvam às peças suas condições iniciais de desempenho, prevalecendo seu aspecto técnico-econômico. Dentre os métodos disponíveis, os polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) têm sido uma técnica bastante utilizada, sobretudo por apresentar propriedades mecânicas muito superiores às do aço. Este trabalho tem por objetivo apresentar o estudo de caso de um prédio de múltiplos pavimentos, em que alguns pilares apresentaram insuficiência de sua resistência à compressão, ora estabelecida em projeto. Para tanto, foi simulado – seguindo os procedimentos da ACI 440.2R (2017) – o reforço com uso de compósitos de PRFC encamisando os pilares, sendo avaliada a aplicabilidade e eficiência da técnica frente ao método convencional, que consiste no aumento da área de aço da peça (barras suplementares). Os resultados demostraram que o uso de polímeros reforçados com fibras de carbono nas propriedades padronizadas do estudo elevaram satisfatoriamente a resistência à compressão axial do concreto pelo efeito do confinamento, com diferentes camadas de encamisamento, mostrando a viabilidade da técnica. Todavia, há a necessidade de realização de testes para comprovação da efetividade da técnica, considerando que as relações geométricas prescitas pela norma americana foram excedidas.
Palavras-chave: fibra de carbono, PRFC, realibitação estrutural, pilares, patologia.

ABSTRACT

In the field of construction pathology, the rehabilitation of concrete structures is a topic widely discussed in the technical field. The emergence of pathological manifestations in reinforced concrete pillars – arising from flaws in the design, execution and/or maintenance –, requires precise and appropriate interventions that return the parts to their initial performance conditions, prevailing their technical-economic aspect. Among the available methods, polymers reinforced with carbon fiber (PRFC) have been a widely used technique, mainly because they present mechanical properties much superior to those of steel. This work aims to present the case study of a building with multiple floors, in which some pillars presented insufficient resistance to compression, as established in the project. Therefore, it was simulated – following the procedures of ACI 440.2R (2017) – the reinforcement with the use of PRFC composites jacketing the pillars, being evaluated the applicability and efficiency of the technique compared to the conventional method, which consists of increasing the steel area part (supplementary bars). The results showed that the use of polymers reinforced with carbon fibers in the standardized properties of the study satisfactorily increased the resistance to axial compression of concrete by the effect of confinement, with different layers of jacketing, showing the feasibility of the technique. However, there is a need to carry out tests to prove the effectiveness of the technique, considering that the geometric relationships required by the american standard have been exceeded.
Keywords: carbon fiber, CFRP, structural realibitation, pillars, pathology.

1. INTRODUÇÃO

ISBN 978-65-86819-05-2

Durante a fase de projeto, as escolhas dos materiais constituintes do concreto, sua proteção e manutenção são fatores primordiais para a preservação das estruturas. A probabilidade de que a estrutura venha a apresentar deterioração será tanto menor quanto maiores forem os cuidados com a qualidade (Bauer, 2000).

A ABNT NBR 15575 (2015) estabelece que o desempenho dos sistemas deve ser prescrito pela vida útil de projeto que, para uma edificação convencional, equivale ao mínimo de 50 anos. A precoce incapacidade de uma estrutura em resistir aos esforços a que foi projetada gera a imperiosa necessidade de reabilitação, a fim de recuperar suas condições iniciais de desempenho, cujas causas foram geradas em uma das fases do ciclo de vida da edificação.

Segundo Souza e Ripper (1998), os problemas patológicos ocasionados por manutenção inadequada têm sua origem no desconhecimento técnico, na incompetência, no desleixo e em problemas econômicos. Quando ausente, a manutenção pode vir a tornar-se o principal fator pelo surgimento de problemas estruturais de maior monta, implicando em gastos significativos e, em caso extremo, a própria demolição da estrutura. Cerca de 90% das falhas diagnosticadas nas etapas de uso dos edifícios são consequências oriundas das fases de planejamento, projeto, fabricação e execução da obra. (Bolina; Tutikian; Helene, 2019).

O objetivo deste artigo é apresentar um estudo de caso de um prédio de múltiplos pavimentos em concreto armado que apresentou insuficiência na resistência à compressão de pilares, sendo avaliada a aplicabilidade e eficiência da técnica de compósitos de fibra de carbono na reabilitação de pilares submetidos à compressão, frente ao método convencional de aumento da área de aço com barras suplementares.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Denomina-se materiais compósitos aqueles cuja estrutura é constituída por mais de dois materiais entre si (matriz polimérica e produtos de reforço), sendo a matriz a responsável por aglomerar os materiais de reforço e protegê-los contra a agressividade do meio podendo, ainda, conter adições e/ou materiais de enchimento na composição do material, com fins de melhorar suas propriedades. O material é comercializado na forma de laminados pré-fabricados unidirecionais, tecidos bidirecionais ou folhas flexíveis unidirecionais.

Utilizado na construção civil desde 1954, os polímeros reforçados com fibras de carbono – PRFC resultam do tratamento térmico de fibras de polímeros orgânicos denominado processo de carbonização, sendo que suas características mecânicas estão diretamente ligadas à estrutura molecular obtida. O sistema surge como alternativa ao aço para fins de reforço de elementos estruturais (Souza e Ripper, 1998). O autor cita que, em geral, opta-se pelo uso de fibras com elevada resistência mecânica à tração e módulo de elasticidade semelhante ao do aço de construção. Para uma mesma espessura, as fibras de carbono apresentam um quarto do peso e resistência à tração oito a dez vezes maior para um mesmo módulo de elasticidade. A curva comportamental destes compósitos até a ruptura é linear, característica de um comportamento frágil na ruptura, sendo as tensões últimas da ordem de 3500 MPa com correspondentes 1,5% de alongamentos.

Outras importantes propriedades constam na literatura técnica, que devem ser consideradas quando da aplicabilidade do sistema como reforço. Genericamente, Figueira (2016) cita pontos positivos e negativos, sendo apontado como vantagens: elevada resistência a ataques químicos; estabilidade térmica e reológica; leveza (relevante característica, por prescindir da utilização de andaimes e escoramentos); diminuição dos custos com mão de obra; alta rigidez e resistência à tração; elevada deformabilidade; bom comportamento sob atuação de cargas cíclicas.

Por outro lado, são citadas como características desfavoráveis do PRFC: material anisotrópico; comportamento elástico linear até sua ruptura, diferentemente do aço; elevado custo comercial do produto; coeficiente de dilatação término diferente da do concreto; necessidade de proteção para casos de incêndio, vez que apresenta perda de desempenho sob temperaturas moderadamente altas.

Souza e Ripper (1998) citam que a aplicação originária do reforço com fibra de carbono era no sentido de aumentar-se a capacidade resistente das peças, quer sejam à flexão ou ao esforço transversal. Mais tarde, as fibras começaram a ser utilizadas também no aumento da ductilidade. Segundo Carneiro (2004), os compósitos podem ser aplicados em confinamento total ou parcial, dispostas perpendicularmente ou inclinada em relação ao eixo longitudinal do pilar a ser reforçado.

ISBN 978-65-86819-05-2

Vasconcelos Neto, Muniz, Silva (2018) realizaram análise qualitativa de protótipos de pilares reforçados com camadas horizontais e inclinadas, ficando demonstrado que camadas horizontais são mais eficientes para cargas axiais, ao passo que a disposição inclinada é indicada para os casos em que hajam excentricidades da carga.

Saraiva, Teixeira, Carneiro (2013) realizaram revisão bibliográfica quanto aos parâmetros de reforço aplicados especificamente em pilares. Nesta, foi sintetizada importantes propriedades (objeto de pesquisa de vários autores), dentre as quais reproduzimos:

a) aderência – a eficácia da aderência tem maior influência no aumento da rigidez do elemento do que no aumento da resistência à compressão do concreto;
b) tipo de fibra – as fibras de maior módulo de elasticidade (E) tendem a aumentar a resistência à compressão do concreto, para mesma espessura de compósito; já as fibras com módulo menores proporcionam aumento na ductilidade;
c) orientação das fibras – transversalmente, as fibras aumentam a rigidez axial e a resistência do concreto, além de um suporte adicional contra a flambagem pelo efeito do confinamento; longitudinalmente, a eficiência se dá em pilares com maior índice de esbeltez (λ);
d) geometria da seção – reforços em pilares circulares apresentam melhor desempenho se comparados aos pilares com seção transversal retangular, dada maior eficiência na distribuição das tensões destas em relação àquelas;
e) resistência à compressão – o efeito do confinamento para concretos de maior resistência é menor se comparado com concretos de menor resistência.

Embora o uso de PRFC seja prática corrente no Brasil, não há normativo técnico nacional para reforço estrutural com uso de compósitos em geral, sendo necessário basear-se em normas estrangeiras. Em âmbito geral, a ABNT NBR 6118 (2014) estabelece que para o dimensionamento de pilares, os momentos de 2º ordem podem ser desconsiderados em análise isolada caso o pilar seja classificado como pouco esbelto (curto). Desta forma classifica-se a esbeltez de um pilar com a determinação de seu índice de esbeltez (λ) vez que, para ser denominado como curto, o índice deve ser confrontado com o parâmetro normativo λ_1 (sendo $35 \leq \lambda_1 \leq 90$) e satisfazer a condição $\lambda \leq \lambda_1$.

3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O edifício objeto de estudo localiza-se na região Sul da cidade de Manaus, capital do estado do Amazonas, região norte do Brasil. O prédio é destinado para uso institucional, com área construída de 26.117,13 m² e projetado em concreto armado convencional, contendo 3 subsolos, pavimento térreo e 14 pavimentos superiores. O concreto foi especificado com f_{ck} de 30 MPa, com slump test especificado em 10 +/- 2 cm e fornecido por centrais dosadoras de concreto locais. Durante a execução da obra, em procedimentos de controle tecnológico e rastreabilidade, foi verificado que o concreto empregado em alguns pilares entre o 1º e 2º pavimentos apresentaram f_{ck} inferior ao especificado, da ordem de 20 MPa. Dentre estes, para efeitos deste estudo, serão abordados os pilares P17, P28, P37, P41, P58 e P63.

Com isso, o responsável pelo projeto estrutural foi consultado, sendo apresentada a necessidade de intervenção com reforço nas peças para sua reabilitação. A solução consistiu no aumento da área transversal de aço com inserção de barras suplementares (metodologia convencional). A tabela abaixo apresenta um resumo destes pilares, apresentando o acréscimo nominal na área de aço dos elementos.

Tabela 1 – Especificações do projeto original e de reforço convencional

Pilar	Geometria	Seção (cm)	Projeto original		Projeto de reforço		
			Bitolas	Área nominal (cm²)	Bitolas	Área nominal (cm²)	Acréscimo de área nominal (%)
P17	Retangular	40x100	14φ16	2,24	28φ16	4,48	100,00%
P28	Retangular	40x80	4φ16 / 12φ12,5	2,14	12φ16 / 12φ12,5	3,42	59,81%
P37	Retangular	40x80	10φ12,5 / 6φ10	1,85	10φ12,5 / 14φ10	2,65	43,24%
P41	Retangular	40x100	12φ16	1,92	12φ16 / 6φ10	2,52	31,25%
P58	Retangular	40x100	12φ16	1,92	12φ16 / 6φ20	3,12	62,50%
P63	Retangular	30x80	4φ12,5 / 8φ10	1,30	4φ12,5 / 8φ10 / 6φ16	2,26	73,85%

ISBN 978-65-86819-05-2

O processo executivo seguiu o protocolo convencional, com aberturas de sulcos nas faces dos pilares, implementação das novas barras e posterior grauteamento. Como demonstração, a Foto 1 trás os pilares P17 e P28 na fase executiva do reforço (etapa de inserção das novas barras).



Foto 1: Barras suplementares nos pilares P17 e P28 (respectivamente)

O reforço foi executado seguindo um planejamento prévio de intervenção prescrito pelo projetista, possibilitando a racionalização da mão de obra e reduzindo os potenciais impactos à estabilidade global do prédio. Entretanto, percebeu-se que o método, apesar de seguro e amplamente utilizado na região, trazia consigo algumas desvantagens, como necessidade de escoramento prévio, geração de resíduos da demolição, aumento (ainda que ínfimo) das dimensões transversais e necessidade de cura do graute.

Isto levou à busca de outras alternativas que se mostrassem mais viáveis, considerando o contínuo aperfeiçoamento tecnológico da equipe técnica. Como opção à solução adotada, foi proposto o reforço com o emprego de material compósito com fibra de carbono, justificado pelas vantagens ora descritas nesse artigo, seguindo a metodologia apresentada no capítulo seguinte.

4. METODOLOGIA

A metodologia para o cálculo do reforço com fibras de carbono adotada neste trabalho baseou-se nas recomendações da "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strenghthening concrete structures"– ACI 440.2R (2017) do American Concrete Institute e, no que couber, da ABNT NBR 6118 (2014).

O método aplica-se ao dimensionamento do reforço de pilares curtos a cargas concêntricas, cujo aumento de resistência lateral é promovido pelo confinamento do PRFC. A filosofia do método estabelece que o sistema de reforço seja capaz de absorver as tensões impostas pelo efeito do confinamento lateral do elemento. A equação para o cálculo da resistência à compressão acrescido pelo confinamento do concreto é dado pela Eq. 1 e correlatas. A expressão geral para o cálculo da compressão admissível num pilar curto reforçado com PRFC aplicados em elementos não protendidos e com estribos convencionais (não espirais) é dada pela Eq. 2.

$$f'_{cc} = f'_c + \psi_f \,.\, 3{,}3 \,.\, \kappa_a \,.\, f_l \quad \text{(MPa)} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Em que:
f'_c – resistência característica à compressão do concreto, f_{ck} (MPa);
ψ_f – fator de redução igual a 0,95;
κ_a – fator de eficiência relativo à geometria da peça;
f_l – contribuição da resistência lateral da fibra de carbono equivalendo a $(2 \,.\, E_f \,.\, n \,.\, t_f \,.\, \varepsilon_{fe}) / D$ (MPa).

$$\kappa_a = A_e/A_c \,.\, (b/h)^2 \qquad \text{(Eq. 1.1)}$$

Em que:
A_e – área da seção transversal efetivamente confinada (mm²);
A_c – área da seção de concreto (mm²);

ISBN 978-65-86819-05-2

b e h – menor e maior dimensões do elemento, respectivamente (mm).

$$f_l = (2 \cdot E_f \cdot n \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fe}) / D \quad (MPa) \qquad \text{(Eq. 1.2)}$$

Em que:
E_f – módulo de elasticidade do compósito de fibra de carbono (MPa);
n – número de camadas de reforço;
t_f – espessura do compósito de fibra de carbono (mm);
ε_{fe} – deformação efetiva da fibra (mm/mm);
D – diâmetro da seção circular equivalente à diagonal da seção retangular do elemento (mm).

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_e \cdot \varepsilon_{fu} \quad (mm/mm) \qquad \text{(Eq. 1.3)}$$

Em que:
κ_e – fator de eficiência da fibra de carbono que considera a diferença entre a deformação de ruptura observada no confinemento e a deformação de ruptura determinada em ensaios de tração, no valor de 0,58;
ε_{fu} – deformação de ruptura do material (mm/mm).

$$D = (b^2 + h^2)^2 \quad (mm) \qquad \text{(Eq. 1.4)}$$

Em que:
b e h – menor e maior dimensões do elemento, respectivamente (mm).

$$\varphi P_n = 0{,}80\ \Phi\ [0{,}85 \cdot f'_{cc}\ (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}] \quad (kN) \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Em que:
Φ – coeficiente de redução da resistência;
A_g – área da seção transversal da peça (mm²);
A_{st} – área da seção transversal da armadura longitudinal (mm²);
f_y – tensão de escoamento do aço CA50 (MPa).

De acordo com a ACI 440.2R (2017), após obtido o valor de f_l, deve ser verificada a condição $f_l / f'_c > 0{,}08$, com base em testes experimentais realizados. Na utilização do PRFC como elemento de reforço de elementos de concreto armado, uma das consequências é a redução da ductilidade do elemento original. Segundo a norma americana, em alguns casos pode-se desprezar esta perda, porém seções com redução significativa de ductilidade devem ser verificadas. Assim, a norma recomenda que o fator de redução Φ seja estabelecido em função de dois fatores: a deformação de escoamento do aço (ε_{sy}) e a deformação de tração líquida proveniente da tensão extrema do aço na força nominal (ε_t), podendo variar entre os extremos de 0,65 (seções frágeis) e 0,90 (seções dúcteis).

Assim, há três condições a serem verificadas para se precisar o valor deste fator redutor: para $\varepsilon_t \geq 0{,}005$, utilizar $\Phi = 0{,}90$; para a condição: $\varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0{,}005$, usar $\Phi = 0{,}65 + (0{,}25 \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})) / (0{,}005 - \varepsilon_{sy})$; por fim, para $\varepsilon_t < \varepsilon_{sy}$, deve-se utilizar $\Phi = 0{,}65$.

Para o cálculo de ε_t, as condições ao Estado Limite Último (ELU) devem ser verificadas, não sendo o objetivo da presente pesquisa. Contudo, considerando que este trabalho restringiu-se ao estudo de pilares curtos com cargas concêntricas, o fator de redução Φ foi assumido como de 0,80, afastando-se da posição mais conservadora (fragilidade da seção) porém mantendo determinada margem de segurança na consideração da ductilidade da mesma.

Preliminarmente, foram coletados os dados técnicos do projeto. Foram eles: seção transversal, cargas, comprimento equivalente, momentos atuantes nas direções “x” e “y”, índice de esbeltez nessas direções principais dos esforços e o parâmetro normativo para avaliação, os quais foram consolidados na Tabela 2. Todos os elemetos estudados mantiveram-se na faixa aceitável para pilares curtos.

ISBN 978-65-86819-05-2

Tabela 2 – Dados técnicos do projeto

Pilar	Seção (cm)	Pu (kN)	Mx (t.m)	My (t.m)	le (cm)	λx	λy	λ1	Classificação
P17	40x100	5.305,90	14,81	12,90	385	33,34	13,34	62,50	Pilar curto (λ < λ1)...OK
P28	40x80	3.862,80	13,32	7,91	385	33,34	16,67	62,50	Pilar curto (λ < λ1)...OK
P37	40x80	3.598,60	12,50	6,10	385	33,34	16,67	62,50	Pilar curto (λ < λ1)...OK
P41	40x100	4.611,90	8,55	4,38	385	33,34	13,34	62,50	Pilar curto (λ < λ1)...OK
P58	40x100	4.767,80	13,19	5,80	385	33,34	13,34	62,50	Pilar curto (λ < λ1)...OK
P63	30x80	2.576,20	12,68	3,61	385	44,46	16,67	62,50	Pilar curto (λ < λ1)...OK

Por conseguinte, tomou-se como padrão a resistência característica do concreto de 20 MPa considerando as falhas advindas do fornecimento/execução, ainda que para alguns elementos essa resistência tenha se mostrado pouco maior que este valor (a favor da segurança). Foi empregado o aço CA 50 (500 MPa), sendo utilizadas as áreas nominais de aço empregadas no projeto original para todas as amostras. Estas medidas foram asseguradas para refletir com a máxima exatidão os parâmetros utilizados pelo projetista estrutural quando do cálculo do reforço convencional.

O material de reforço foi selecionado após pesquisa de mercado junto às principais fabricantes do ramo. Dentre estas, foi percebido semelhanças nas fichas técnicas das mantas de carbono de alta resistência, com pequenas diferenças em suas propriedades mecânicas. Para este reforço, utilizou-se para efeitos de cálculo um tecido unidirecional de fibra de carbono de alta resistência da fabricante Sika (modelo SikaWrap-300 C), com tensão de tração de 4000 MPa, módulo de elasticidade de 230.000 MPa, densidade de 314 g/m² e espessura de 0,17 mm e alongamento na ruptura de 1,7% (Sika Brasil, 2017).

De posse dos dados, a marcha de cálculo deu-se na seguinte sequência: a) cálculo das cargas atuantes Pu (kN); b) cálculo da tensão contribuinte do PRFC (f_l, dado em MPa); c) cálculo da resistência à compressão acrescida do confinamento (f'_{cc}, dado em MPa); d) verificação da condição fl/f'c > 0,08, conforme prescrição da ACI 440.2R (2017); e) cálculo da carga resistente do sistema de reforço φP_n (kN); f) verificação da carga resistente *versus* carga atuante. Os resultados do reforço proposto com PRFC foram compilados e comparados com o método convencional executado, cujas tratativas são feitas na seção seguinte.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a automatização dos cálculos, procedeu-se com a rotina iterativamente com auxílio de planilha eletrônica, até que o número de camadas de PRFC apresentasse resultados satisfatórios (critério geral de parada). Para a avaliação dos resultados de carga resistente do sistema de reforço (φP_n) frente às cargas de projeto (P_u), foi criado um fator de eficiência (FE) para expressar – em termos percentuais – a representação de φP_n em relação a Pu (obtido pela razão $\varphi P_n/Pu$).

Do mesmo modo, foi criado um fator de eficiência (FE) para expressar a eficiência da condição ($f_l / f'_c > 0,08$), obtido pela razão (f_l / f'_c) / 0,08. Em ambos os casos, é necessário que estes valores atinjam no mínimo 100%. Na Tabela 3, são demonstrados os resultados, critérios de atendimento e o fator de eficiência do sistema de reforço proposto.

Tabela 3 – Resultados dos cálculos de reforço com PRFC

Pilar	Pu (kN)	fl (MPa)	Relação fl / f'c	f'cc (MPa)	n (camadas)	ΦPn (kN)	Critério (ΦPn > Pu)	Critério (fl / f'c > 0,08)	FE (fl / f'c > 0,08)	FE (ΦPn > Pu)
P17	5.305,90	2,15	0,11	21,08	3	5.454,90	(ΦPn > Pu) ATENDE!	fl/f'c > 0,08 ATENDE!	134,23%	102,81%
P28	3.862,80	1,72	0,09	21,35	2	4.418,98	(ΦPn > Pu) ATENDE!	fl/f'c > 0,08 ATENDE!	107,76%	114,40%
P37	3.598,60	1,72	0,09	21,35	2	4.240,60	(ΦPn > Pu) ATENDE!	fl/f'c > 0,08 ATENDE!	107,76%	117,84%
P41	4.611,90	2,15	0,11	21,08	3	5.330,83	(ΦPn > Pu) ATENDE!	fl/f'c > 0,08 ATENDE!	134,23%	115,59%
P58	4.767,80	2,15	0,11	21,08	3	5.330,83	(ΦPn > Pu) ATENDE!	fl/f'c > 0,08 ATENDE!	134,23%	111,81%
P63	2.576,20	1,80	0,09	20,80	2	3.060,57	(ΦPn > Pu) ATENDE!	fl/f'c > 0,08 ATENDE!	112,81%	118,80%

Carrazedo (2005) comenta que a aplicação de numerosas camadas de PRFC, dentre outras variáveis, implica na redução da resistência à tração do material compósito, apontando para uma desproporcionalidade entre o aumento excessivo de camadas e o respectivo ganho de resistência. Isto se dá por que as deformações entre as camadas extremas não são uniformes, apresentando valores menores na película exterior e maiores na face interna, havendo nível de tensão em demasia nesta última (ponto mais fraco). Outro fator importante se dá no aspecto executivo: a quantidade de imperfeições e ondulações durante a aplicação das camadas aumentam com a sobreposição excessiva delas, pelo efeito

ISBN 978-65-86819-05-2

transmitido das camadas anteriores. Apesar da resistência ser maior com o aumento das camadas, a partir de determinada quantidade o aumento é insignificante. (Saraiva; Teixeira; Carneiro, 2013).

Por sua vez, Souza e Ripper (1998) citam que o sistema constituído com PRFC, segundo ensaios disponíveis, asseguram um bom funcionamento até 10 camadas sendo recomendável que, caso o reforço supere o encamisamento de 6 camadas, sejam realizados ensaios específicos de desempenho para atestar a seguridade do sistema de reforço. Neste prisma, a quantidade de camadas obtidas não excederam as recomendações dos autores pesquisados, demonstrando a viabilibilidade e funcionalidade de sua execução.

Machado (2010) cita que, para efeitos de confinamento, seções quadradas com uso de compósitos PRFC tem sua eficiência reduzida à metade se comparadas com seções circulares, sendo necessário analisar a geometria para avaliar sua eficiência. Em seções retangulares, caso a relação entre os lados exceda 2 ou um deles apresente valor maior do que 90 cm, a ACI 440.2R (2017) recomenda a realização de ensaios para investigação de sua real efetividade. Figueira (2016) comenta que a norma americana não impõe nenhuma limitação a seções circulares (em que a distribuição das tensões se dá de forma mais homogênea) e que este importante parâmetro deve ser considerado na elaboração dos projetos de reforço com fibras.

Depreende-se que a relação entre lados dos pilares supera o valor de 2 para todos os pilares; outrossim, as dimensões inferiores a 90 cm são observadas apenas nos pilares P28, P37 e P63, estando maiores que o referencial nos pilares P17, P41 e P58, conforme pode ser visualizado na Tabela 4. Assim, é recomendado a realização de testes para garantia da eficiência dos elementos, conforme prescrições da norma americana.

Tabela 4 – Resultados dos cálculos de reforço com PRFC

Pilar	Geometria	Seção (cm)		Verificação das dimensões		
		b	h	Relação h/b>2 (1)	Relação b ou h<90 (2)	Observação
P17	Retangular	40	100	Maior	Maior	Realizar testes para garantir a efetividade por (1) e (2)
P28	Retangular	40	80	Maior	Ok	Realizar testes para garantir a efetividade por (1)
P37	Retangular	40	80	Maior	Ok	Realizar testes para garantir a efetividade por (1)
P41	Retangular	40	100	Maior	Maior	Realizar testes para garantir a efetividade por (1) e (2)
P58	Retangular	40	100	Maior	Maior	Realizar testes para garantir a efetividade por (1) e (2)
P63	Retangular	30	80	Maior	Ok	Realizar testes para garantir a efetividade por (1)

6. CONCLUSÕES

Este artigo objetivou a apresentação de um estudo de caso para reabilitação de pilares curtos submetidos a cargas axiais, sendo apresentado duas técnicas de reforço, sendo a primeira denominada como convencional e proposta pelo engenheiro projetista da estrutura e a segunda uma técnica proposta com utilização de PRFC, sob os critérios da norma ACI 440.2R (2017) e ABNT NBR 6118 (2014), no que couber.

Por meio das análises e resultados descritos, foi verificado que o uso de materiais compósitos de PRFC apresentaram em geral um bom comportamento para o reforço ao confinamento dos pilares, em que pese a necessidade de campanha de ensaios para comprovação da efetividade do confinamento.

O uso de PRFC apresentou alguns importantes diferenciais em relação à técnica convencional, quais são: a) o prazo de execução poderá ser otimizado, dadas as peculiaridades do processo executivo; b) haverá redução global de custos com mão de obra – necessidade de apenas um encarregado, um pedreiro e um ajudante prescindindo-se de carpinteiro, armador e respectivos ajudantes imprescindíveis na técnica convencional; e c) haverá redução com materiais, pois

ISBN 978-65-86819-05-2

dispensa o uso de andaimes, formas, escoramentos, equipamentos de demolição e corte; d) as seções transversais originárias das peças não sofrerão alterações devido a ínfima espessura da manta.

A automatização dos cálculos do sistema de reforço com materiais compósitos de PRFC demonstrou resultados satisfatórios para terapia de todos os pilares pesquisados, podendo ser executado com tecidos de mesmas especificações (cujas características foram descritas no capítulo 4 deste artigo), comprovando a viabilidade da técnica frente ao método convencional.

As relações geométricas prescritas pela norma americana impõem a necessidade de realização de ensaios para comprovar a efetividade do reforço para todos os pilares pesquisados, seja pelo critério da relação entre lados ($b/h \leq 2$) seja pelo critério da menor dimensão (b ou $h \leq 900$ mm). Há de se salientar que, mediante consultas anteriores no mercado local, houve dificuldade em se contratar empresas que ofereçam tais ensaios, havendo a necessidade de contratação de outras regiões. O fato reflete em desvantagem na utilização da técnica nesta cidade.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Engenheiro Elmo Cruz, responsável pelo projeto estrutural e de reforço, pelas informações e dados técnicos utilizados como parâmetros na elaboração destes projetos, que foram aplicados neste artigo científico.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: **Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 440.2R: **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strenghthening concrete structures**. Michigan, EUA, 2017.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** Vol. 1. 5º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BOLINA, F. L; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. L. **Patologia de estruturas**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2019.

CARNEIRO, L. A. V. **Reforço de vigas e pilares de concreto com materiais compósitos de resina e fibras.** 2004. 405 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/148-2004/1003-luiz-antonio-vieiracarneiro>. Acesso em: 15 nov. 2019.

CARRAZEDO, R. **Mecanismos de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibras submetidos à flexo-compressão**. 2005. 267 f. Tese (Doutorado em engenharia de estruturas) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2005.

FIGUEIRA, S. P. S. **Reforço de pilares por confinamento com mantas de fibras de carbono. Avaliação de modelos de comportamento.** 2016. 93 f. Dissertação – Universidade da Madeira (UMa). Funchal, Portugal, 2016. Disponível em: <https://digituma.uma.pt/bitstream/10400.13/1251/1/MestradoS%C3%B3niaFigueira%20.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2019.

MACHADO, A. P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo: Better, 2010.

SARAIVA, R. M. D. C.; TEIXEIRA, A. M. A. J.; CARNEIRO, L. A. V. **Estudos sobre reforço de pilares de concreto armado com materiais compósitos de resina e fibras**. Fortaleza, Ceará, 2013. Disponível em: <http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_4_tri_2013/RMCT_072_E2A_11.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2019.

ISBN 978-65-86819-05-2

SIKA BRASIL. Sika Wrap-300 C, **Tecido de fibra de carbono unidirecional para reforço estrutural**. Ficha técnica de produto. Osasco, SP, 2017. Disponível em: < https://bra.sika.com/dms/getdocument.get/264e21c0-a828-3ad7-9c21-fe4db3bb12f1/wrap_300c_60.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2019.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** 1º ed. São Paulo: PINI, 1998.

VASCONCELOS NETO, I. R; MUNIZ, M. B. S.; SILVA, R. J. C. **Análise da eficiência da fibra de carbono como reforço estrutural em pilares de concreto armado**. Revista de cultura, ciência e tecnologia. Sobral, Ceará, 2018. Disponível em: < http://essentia.uvanet.br/index.php/revistaessentia/article/view/152>. Acesso em: 15 nov. 2019.