

REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JOURNAL

Analysis of the efficiency of strengthening design models for reinforced concrete columns

Análise da eficiência de modelos para dimensionamento do reforço em pilares de concreto armado

P. C. RODRIGUES a patriciarodgs@gmail.com

D. L. ARAÚJO ^a dlaraujo@ufg.br

Abstract

This paper develops a comparative analysis of the main design models used for predicting the strengthening of reinforced concrete columns subjected to uniaxial compression. The study evaluated four strengthening design models with concrete jackets and eleven strengthening design models with wrapping in Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP). All models consider the effect of confinement provided by the transverse steel reinforcement and the CFRP sheet wrapping on the gain in resistance of the column. For the validation, a database was formulated containing 135 experimental results of columns tested by several researches, which was used to analyze all design models and identify which was best for expressing the behavior of the strengthened column. At the end of the study, one confinement design model with transverse reinforcement and eleven design models with confinement provided by CFRP sheet wrapping and transverse steel reinforcement which showed the best resistance predictions were selected.

Keywords: strengthening, confinement, carbon fibers, concrete jacketing, design models.

Resumo

Este trabalho desenvolve uma avaliação comparativa dos principais modelos empíricos de dimensionamento utilizados no reforço de pilares de concreto armado submetidos a carregamento axial centrado. Foram avaliados quatro modelos de confinamento por armaduras transversais, utilizados no dimensionamento do reforço por aumento de seção transversal de concreto, e onze modelos para o dimensionamento do reforço por encamisamento por polímero reforçado com fibras de carbono. Todos eles consideram o efeito do confinamento, proporcionado pela armadura transversal e pelo reforço com fibras, no ganho de resistência do pilar. Para a validação, foi montado um banco de dados contendo 135 pilares ensaiados em diversas pesquisas, ao qual foram aplicados os modelos em análise de modo a identificar aqueles que melhor expressam o comportamento do pilar reforçado. Ao final do trabalho, foi selecionado um modelo de confinamento por armadura transversal e onze combinações entre modelos de confinamento por fibras de carbono e armadura transversal que conduziram às melhores previsões de resistência dos pilares do banco de dados.

Palavras-chave: encamisamento, confinamento, fibras de carbono, aumento da seção transversal de concreto, modelos de dimensionamento.

Received: 31 Mar 2017 • Accepted: 26 Jun 2018 • Available Online: 23 Nov 2018

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License

^a Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil

1. Introdução

As estruturas em concreto armado são projetadas e executadas para resistir às solicitações ao longo de seu tempo de vida útil. Ocasionalmente, no entanto, as construções exigem a recomposição de sua resistência estrutural, em casos de vícios construtivos ou acidentes, ou o incremento de sua capacidade de carga, permitindo a ampliação ou a mudança de uso da edificação. Surge, então, a importância do estudo e aperfeiçoamento das intervenções de reforço estrutural, de modo a garantir a sua viabilidade técnica e econômica.

Dentre as várias técnicas de reforço em estruturas de concreto armado, destaca-se o reforço por acréscimo de seção transversal de concreto e por encamisamento com Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC). Nos últimos anos, essas técnicas foram bastante utilizadas em pilares, conferindo aumentos significativos na capacidade portante desses elementos.

O reforço por acréscimo de seção transversal de concreto consiste no envolvimento do pilar por uma camada de concreto. Segundo Takeuti [1], pode-se adicionar armaduras transversais ou longitudinais à camada reforçada, contribuindo com o aumento da resistência do pilar aos esforços atuantes. No caso do reforço por encamisamento com PRFC, o pilar é envolvido por um material compósito formado pela união das fibras de carbono preenchidas por resina epoxídica. Ambas as técnicas são eficientes e, para se avaliar a solução mais adequada, é necessário realizar um estudo profundo das variáveis de custo, disponibilidade de mão-de-obra capacitada, impacto na edificação, etc.

A literatura contém uma série de métodos de cálculo para avaliar o ganho de resistência adquirido pelo pilar reforçado. No entanto, por se tratarem, em sua maioria, de modelos empíricos, carregam consigo grande variabilidade nos coeficientes encontrados por diferentes autores. Além disso, a variação dos resultados em cada formulação é proveniente das considerações de dimensionamento adotadas em cada um dos trabalhos. A principal consequência desse fenômeno é a obtenção de quantitativos de armadura e de fibra diferentes dependendo do modelo de cálculo escolhido para dimensionamento do reforço. Desse modo, o objetivo deste artigo é avaliar comparativamente os modelos de cálculo mais difundidos na literatura, aplicando-os em um banco de dados com 135 pilares ensaiados em laboratório e selecionando aqueles que alcançam os resultados mais satisfatórios por meio de análises de inferência estatística. Para a avaliação do reforço por aumento de seção transversal de concreto, foram escolhidos os modelos de cálculo propostos por Cusson e Paultre [2], Saatcioglu e Razvi [3], Frangou *et al* [4] e o Código Modelo da fib na versão de 2010 [5]. Já no caso do reforço por encamisamento com PRFC, foram avaliados onze modelos empíricos disponíveis na literatura.

2. Modelos para dimensionamento do reforço em pilares

A capacidade resistente de pilares sujeitos à compressão centrada é calculada a partir do somatório de forças no sentido do eixo longitudinal do elemento, e tem relação direta com as parcelas de resistência do concreto e do aço que o compõem. Entretanto, no que diz respeito aos pilares reforçados, diversas pesquisas realizadas nas últimas décadas constataram a importância do efeito do confinamento transversal gerado no pilar a partir da aplicação do reforço.

De acordo com Carrazedo [6], ao receber os carregamentos em seu eixo longitudinal, os pilares sofrem deformações laterais provocadas pelo efeito do coeficiente de Poisson. No entanto, quando são contidos lateralmente, um estado triaxial de tensões de compressão é induzido, gerando um ganho de resistência longitudinal no elemento. O confinamento pode ser garantido pelos compósitos de fibras de carbono e pelas armaduras transversais.

Este artigo considera que os pilares encamisados com PRFC recebem um confinamento proporcionado pelas armaduras transversais e pelas fibras e, no caso dos pilares reforçados por aumento de seção transversal, é considerado o confinamento gerado pela armadura transversal do núcleo de concreto e pela armadura transversal da camada reforçada.



Figura 1

Região do pilar que sofre confinamento pelas armaduras transversais. (a) Seção transversal de pilares circulares confinados; (b) Seção transversal de pilares retangulares confinados; (c) Seção longitudinal de pilares confinados (confinamento entre estribos) Fonte: Adaptado de Cusson e Paultre [2]

2.1 Modelos para avaliação do confinamento por armadura transversal

O princípio básico de dimensionamento do reforço por aumento de seção transversal de concreto estabelece que a capacidade resistente total do pilar é dada pelas parcelas de resistência do concreto e da armadura longitudinal presentes no núcleo e no reforço. Takeuti [1] complementa que as armaduras transversais do pilar original e da camada de concreto reforçado promovem o confinamento do pilar, que gera, por consequência, um acréscimo na sua resistência.

Os quatro modelos de cálculo aqui abordados consideram que existe uma área interna às armaduras transversais que é efetivamente confinada, definida pela área hachurada na Figura 1. No caso de pilares circulares, há uma distribuição uniforme de tensões ao longo dos estribos. Já em pilares de seção quadrada ou retangular, há o efeito do arqueamento das tensões na armadura transversal, gerando picos de tensão nos pontos de encontro com as armaduras longitudinais. A área restante não sofre ganho de resistência por confinamento e é considerada como cobrimento da peça [2, 3, 4].

Takeuti [1] e Carrazedo [6] salientam que, com a aplicação do carregamento axial no pilar, podem ocorrer fissurações e desprendimento do cobrimento. Portanto, os autores recomendam desconsiderar a resistência do concreto da região externa à armadura transversal.

2.1.1 Modelo proposto por Cusson e Paultre

A partir de ensaios experimentais, Cusson e Paultre [2] definiram uma relação entre o ganho de resistência do pilar e a pressão lateral gerada pelo confinamento da armadura transversal, dada pela Equação (1):

$$f_{cc} = f_c \left[1 + 2.1 \left(\frac{f_{le}}{f_c} \right)^{0.7} \right]$$
 (1)

onde:

f_{cc} é a resistência do concreto confinado;

f_c é a resistência do concreto original;

f_{le} é a pressão de confinamento efetivo.

Para determinar a pressão de confinamento efetivo, os autores adotam coeficiente de efetividade K_e para seção transversal retangular avaliado por Mander, Priestley e Park [7], da seguinte forma: $f_{le} = f_l K_e$

$$K_{e} = \frac{\left(1 - \sum \frac{(w_{i})^{2}}{6c_{x}c_{y}}\right) \left(1 - \frac{s'}{2c_{x}}\right) \left(1 - \frac{s'}{2c_{y}}\right)}{(1 - \rho_{l})}$$
(2)

sendo:

f, a pressão lateral;

w, a distância livre entre duas barras longitudinais;

 $c_x e c_y$ as dimensões do núcleo do pilar perpendiculares às direções x e y, respectivamente, medidas entre centros das armaduras transversais;

s' o espaçamento livre entre estribos;

 ρ_{l} a taxa de armadura longitudinal do pilar em relação ao núcleo de concreto.

Mander, Priestley e Park [7] também estabelecem o coeficiente K_e para pilares circulares reforçados com estribos convencionais e com espirais, conforme as Equações (3) e (4), respectivamente.

$$K_{e} = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_{i}}\right)^{2}}{\left(1 - \rho_{i}\right)}$$
(3)

$$K_e = \frac{\left(1 - \frac{S'}{2d_i}\right)}{\left(1 - \rho_l\right)} \tag{4}$$

onde:

d_i é o diâmetro da armadura transversal circular, medida a partir do eixo central da armadura.

A pressão lateral para pilares retangulares, por sua vez, é obtida a partir da Equação (5):

$$f_{l} = \frac{f_{y,t}}{s} \left(\frac{A_{s,tx} + A_{s,ty}}{c_{x} + c_{y}} \right)$$
(5)

sendo:

f_{vt} a resistência à tração da armadura transversal;

 $A_{s,tx} e A_{s,ty}$ as áreas totais da armadura transversal na direção perpendicular a x e a y, respectivamente, correspondendo ao dobro da área da seção transversal dos estribos;

s o espaçamento de centro a centro entre estribos.

Cusson e Paultre [2] não preveem o cálculo de pressão de confinamento lateral para pilares circulares.

2.1.2 Modelo proposto por Saatcioglu e Razvi

O segundo modelo analisado foi proposto por Saatcioglu e Razvi [3] e parte do mesmo princípio básico de confinamento utilizado por Cusson e Paultre [2], se diferindo apenas na correlação empírica entre as variáveis.

O ganho de resistência do concreto é avaliado em função da pressão lateral efetiva, por meio da Equação (6).

$$f_{cc} = f_c + 6.7 f_{le}^{0.83}$$
 (6)

A pressão lateral efetiva, por sua vez, é dada por:

$$f_{le} = k_2 f_l$$

sendo:

$$k_{2} = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{c}}{s}\right)\left(\frac{b_{c}}{w_{i}}\right)\left(\frac{1}{f_{l}}\right)} \le 1.0 \text{ para seções retangulares}$$

$$k_{2} = 1.0 \text{ para seções circulares}$$
(7)

com a pressão lateral dada pela Equação (8).

$$f_l = \frac{\sum 2A_{s,t}f_{y,t} \sin\theta}{sb_c}$$
(8)

onde:

b, é a distância de centro a centro entre barras longitudinais;

A_{st} é a área da seção da armadura transversal.

 θ é o ângulo entre o reforço transversal e $b_{_{\rm c}}$ e vale 90° para pilares retangulares.

2.1.3 Modelo proposto por Frangou et al

Frangou et al [4] propõem um modelo para avaliação da

resistência do concreto confinado com base nas recomendações do Eurocode 8 (CEN [8]). Este modelo se difere dos outros por levar em consideração o ganho de resistência do concreto em função da sua taxa mecânica de confinamento ω_{w} , conforme é apresentado nas Equações (9) e (10).

$$\begin{split} f_{cc} &= f_c(1,125+1,25\alpha'\omega_w) \text{ se } \alpha'\omega_w \geq 0,1 \\ f_{cc} &= f_c(1+2,5\alpha'\omega_w) \text{ se } \alpha'\omega_w \leq 0,1 \end{split} \tag{9}$$

$$\omega_{w} = \frac{A_{s,t}\pi d}{\frac{\pi d^{2}}{4}s} \frac{f_{y,t}}{f_{c}} = \frac{4A_{s,t}f_{y,t}}{dsf_{c}}$$
(10)

Onde:

 α ' é um fator de redução, calculado conforme a Equação (11); d é o diâmetro da seção de concreto confinada pelos estribos; Para avaliar o efeito do confinamento efetivo no pilar, o Eurocode 8 (CEN [8]) utiliza fator de redução α ' dado por: $\alpha' = \alpha_n \alpha_s$

sendo: $\begin{aligned} &\alpha_n = \frac{c_x c_y - 2\left(\frac{c_x^2 + c_y^2}{6}\right)}{c_x c_y - A_{s,l}} \text{ para seção transversal retangular;} \\ &\alpha_n = \frac{1}{3} \text{ para seção transversal quadrada;} \\ &\alpha_n = 1,0 \text{ para seção transversal circular;} \\ &\alpha_s = \frac{(c_x - \frac{s}{2})(c_y - \frac{s}{2})}{c_x c_y} \text{ para seção transversal retangular;} \\ &\alpha_s = \left(\frac{1 - s}{2d_l}\right)^2 \text{ para seção transversal circular com estribos convencionais;} \\ &\alpha_s = \left(\frac{1 - s}{2d_l}\right)^2 \text{ para seção transversal circular com espirais.} \end{aligned}$ onde:

A_{s1} é a área total de armadura longitudinal no pilar.

2.1.4 Modelo proposto pelo Código Modelo da fib

O Código Modelo da fib na versão de 2010 [5] determina o ganho de resistência do pilar confinado com armadura transversal a partir da Equação (12):

$$f_{cc} = f_c \left[1 + 3.5 \left(\frac{f_{le}}{f_c} \right)^{\frac{3}{4}} \right]$$
(12)

A pressão lateral efetiva de confinamento f_{le} , para seção transversal circular e retangular, é expressa conforme as Equações (13) e (14), respectivamente.

$$f_{le} = \omega_c f_c \left(1 - \frac{s}{d_i}\right) \text{ para seção confinada por espirais}$$

$$f_{le} = \omega_c f_c \left(1 - \frac{s}{d_i}\right)^2 \text{ para seção confinada por estribos convencionais}$$
onde:
$$\omega_c = \frac{2A_{s,t}f_{y,t}}{sd_i f_c}$$

$$f_{le} = \omega_c f_c \left(1 - \frac{s}{c_x}\right) \left(1 - \frac{s}{c_y}\right) \left(1 - \frac{\sum b_c^2}{6c_x c_y}\right)$$
onde:
$$\omega_c = \min\left(\frac{A_{s,tx}f_{y,t}}{sc_x f_c}; \frac{A_{s,ty}f_{y,t}}{sc_y f_c}\right)$$
(13)

Quadro 1

Expressões para avaliação da resistência do concreto confinado com PRF

Referência	Tipo de confinamento	f _{cc}
Samaan <i>et al</i> [10]	PRFV	$f_c + 6.0 f_{l,f}^{0.7}$
Miyauchi <i>et al</i> [11]	PRFC	$f_c \left[1 + 3.5 \frac{f_{l,f}}{f_c} \right]$
Kono <i>et al</i> [12]	PRFC	$f_c \left(1 + 0.0572 f_{l,f} \right)$
Toutanji [13]	PRFC PRFV	$f_c \left[1 + 3.5 \left(\frac{f_{l,f}}{f_c} \right)^{0.85} \right]$
Saafi et al [14]	PRFC PRFV	$f_c \left[1 + 2.2 \left(\frac{f_{l,f}}{f_c} \right)^{0.84} \right]$
Spoelstra e Monti [15]	PRFC PRFV	$f_c \left[0.2 + 3 \left(\frac{f_{l,f}}{f_c} \right)^{0.5} \right]$
Fardis e Khalili [16]	PRFV	$f_c\left(1+2.05\frac{f_{l,f}}{f_c}\right)$
Karbhari e Eckel [17]	PRFC PRFV PRFA	$f_c \left[1 + 2.1 \left(\frac{f_{l,f}}{f_c} \right)^{0.87} \right]$
Mirmiran e Shahawy [18]	PRFV	$f_c + 4.269 f_{l,f}^{0.587}$
Shehata, Carneiro e Shehata [19]	PRFC	$f_c\left(1+\beta \frac{f_{l,f}}{f_c}\right)*$

 * β igual a 2,0 para seção circular, 0,85 para seção quadrada e 0,7 para seção retangular

2.2 Modelos para avaliação do confinamento por encamisamento com PRFC

Nos modelos para dimensionamento do reforço por encamisamento com PRFC, o princípio básico atuante é o de confinamento exercido pelas fibras de carbono. A capacidade de carga do pilar é garantida pela resistência do concreto confinado e do aço longitudinal do núcleo.

Há vários trabalhos na literatura que abordam o confinamento do concreto por meio do encamisamento com PRFC. No Quadro 1 é listada uma série de modelos empíricos encontrados na literatura e que foram analisados neste artigo. As equações que fornecem a resistência do concreto confinado são dadas em função da resistência do concreto existente e da pressão lateral aplicada pela jaqueta de fibras, sendo esta calculada com base na Equação (15).

$$f_{l,f} = \frac{2nt_f f_f k_a}{D} \text{ para pilares circulares}$$

$$f_{l,f} = \frac{f_{l,f(b)} + f_{l,f(h)}}{2} = \frac{nt_f f_f k_a(b+h)}{b+h} \text{ para pilares retangulares}$$
(15)

sendo:

f_{i f} a pressão lateral aplicada pela jaqueta de fibras;

n o número de camadas de fibras de carbono;

t, a espessura da camada de fibra de carbono;

f, a resistência à tração da jaqueta de fibras de carbono;

k_a o coeficiente de redução da eficiência do confinamento. Para o caso de pilares circulares, admite-se total eficiência no confinamento da seção, isto é, considera-se k_a = 1,0;

D o diâmetro do pilar circular;

b e h dimensões de base e altura da seção transversal em pilares retangulares, respectivamente.

Nota-se que a Equação (15), que define a pressão lateral no pilar, depende da resistência à tração das fibras, a qual é diretamente influenciada por diversas propriedades do material, como módulo de elasticidade, deformação da fibra, espessura e número de camadas de reforço. As pesquisas experimentais que realizaram ensaios com PRF (Polímeros Reforçados com Fibras) procuram propor expressões que já englobem esses parâmetros básicos para os principais tipos de fibras comercializadas, isto é, PRFC, PRFV (Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro) e PRFA (Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida). Dessa forma, as expressões formuladas a partir de ensaios com outros tipos de fibras também podem ser eficientemente aplicadas no cálculo do reforço com fibras de carbono e foram incluídas na Tabela 1.

As expressões da Tabela 1 foram fundamentadas em ensaios de pilares reforçados apenas com fibras de carbono, sem a presença de armaduras transversais e longitudinais. Consequentemente, são dadas em função da pressão lateral exercida exclusivamente pela jaqueta de fibras. No caso de pilares reforçados que também possuem armadura transversal, as equações apresentadas na Tabela 1 podem ser associadas com as formulações de confinamento por meio de armadura transversal mostradas no subitem 2.1, conforme representado na Figura 2.

2.3 Modelos para avaliação do confinamento por armadura transversal e encamisamento com PRFC

Quando há armadura transversal no pilar reforçado, esta pode contribuir no confinamento do núcleo de concreto. Contudo, ainda há dúvidas sobre como se dá essa interação entre o reforço com PRF e a armadura transversal. Carrazedo [6] considera que a superposição dos efeitos de confinamento entre fibra e armadura transversal pode ser avaliada somando-se os ganhos de resistência obtidos por cada um desses materiais isoladamente. Isso significa que, inicialmente, a armadura transversal confina o pilar e oferece um ganho de resistência f_{cc,e}. Posteriormente, a fibra fornece um ganho de resistência f_{cc,e} ao núcleo de concreto não confinado. A resistência total é dada pela Equação (16):

$$f_{cc} = f_c + f_{cc,f} + f_{cc,e}$$
(16)

Uma outra proposta é apresentada por Machado [9] e foi baseada nas recomendações da ACI 440. Segundo esse autor, o ganho de



Figura 2

Área do pilar efetivamente confinada. (a) Confinamento pelos PRFC; (b) Confinamento pela armadura transversal

Fonte: Modificado de Machado [9]



Pressão lateral exercida sobre a jaqueta de fibras de carbono. (a) Pilares circulares; (b) Pilares retangulares Fonte: Modificado de Machado [9]

resistência do pilar reforçado é avaliado a partir de uma equação empírica que leva em consideração a pressão lateral gerada no pilar e a resistência do concreto original, conforme expresso na Equação (17).

$$f_{cc} = f_c \left[2.25 \sqrt{1 + \frac{7.9f_l}{f_c} - \frac{2f_l}{f_c}} - 1.25 \right]$$
(17)

Esse modelo de cálculo parte do preceito que as pressões laterais geradas no pilar pelo carregamento axial são combatidas pela resistência à tração de ambos os materiais confinantes, fibras de carbono e estribos, a partir de somatório de forças em uma seção transversal do elemento, conforme é apresentado na Figura 3. Assim, a pressão lateral total de confinamento f₁ é calculada a partir da Equação (18), em um procedimento diferente do apresentado na Equação (16) que avalia a resistência do concreto confinado para cada um dos materiais confinantes de forma independente.

$$f_{l} = f_{l,e} + f_{l,f}$$
(18)

onde:

 $\boldsymbol{f}_{_{l,e}}$ é a pressão lateral gerada pela armadura transversal;

f,, é a pressão lateral gerada pela fibra de carbono.

As parcelas de pressão lateral geradas pela jaqueta de fibra de carbono e pela armadura transversal são avaliadas por meio das Equações (15) e (19), respectivamente. Em seções circulares, a distribuição de pressões é dada uniformemente, enquanto em pilares retangulares, as pressões laterais são proporcionais às dimensões da seção transversal do pilar.

$$f_{l,e} = \frac{2A_{s,t}f_{y,t}k_b}{sd_l} \text{ para pilares circulares}$$

$$f_{l,e} = \frac{A_{s,t}f_{y,t}k_b(b+h)}{sbh} \text{ para pilares retangulares}$$
(19)

sendo:

k, coeficiente de redução da eficiência do confinamento;

b e h dimensões de base e altura da seção transversal em pilares retangulares, respectivamente.

Para o caso de pilares circulares, admite-se total eficiência no confinamento da seção, isto é, considera-se Para pilares retangulares, Machado [9] utiliza a Equação (20) para a avaliação dos coeficientes e utilizados nas Equações (15) e (19).

$$k_{a} = k_{b} = 1 - \frac{(b - 2r')^{2} + (h - 2r')^{2}}{3bh(1 - \rho_{t})}$$

$$r' = \frac{h}{b} \le 1.5$$

$$\rho_{t} = \frac{A_{s,t}}{A_{a}}$$
(20)

sendo:

 ρ_t a taxa de armadura transversal em relação à área da seção do pilar; A_ a área da seção transversal do pilar.

Análise dos modelos para dimensionamento do reforço em pilares

A análise dos modelos de cálculo descritos foi realizada tendo como base comparativa um banco de dados com 135 pilares ensaiados e disponíveis na literatura. Os modelos de cálculo apresentados no item 2 foram aplicados a esse banco de dados e os resultados comparados ao ganho de resistência observado nos ensaios experimentais. A análise foi subdividida em duas partes, isto é, reforço de pilares por aumento da seção transversal e reforço por meio de encamisamento com PRFC. Neste último caso, foi analisada, ainda, a combinação de confinamento por meio de armadura transversal e PRFC.

3.1 Reforço por aumento de seção transversal de concreto

Para a avaliação da eficiência dos modelos de cálculo na previsão da resistência de pilares reforçados por aumento da seção transversal, foi utilizado um conjunto de quatro pilares ensaiados por Takeuti [1]. Todos os pilares têm seção transversal original quadrada de 15x15 cm e receberam reforço de concreto de 3 e 4 cm de espessura. Foram adicionadas armaduras longitudinais e transversais no núcleo e na camada de reforço, conforme representado na Figura 4. A base de dados para esse tipo de reforço é pequena, contudo há poucos ensaios na literatura de pilares com carga centrada reforçados por encamisamento de concreto.

Os quatro modelos de cálculo para avalição do confinamento por meio de armadura transversal foram aplicados nesse banco de da-



Esquema da seção transversal do pilar reforçado por encamisamento com concreto

dos. A resistência do pilar reforçado foi determinada por meio da adição da resistência das armaduras longitudinais com a resistência

do concreto indicado nas Regiões 1, 2 e 3 da Figura 4. A Região 4, externa à armadura transversal do reforço, foi desconsiderada. No cálculo de confinamento, foi considerado que apenas o pilar original sofre ganho de resistência por confinamento da armadura transversal, sendo que a Região 1 é confinada pelas armaduras transversais do núcleo e do reforço e a Região 2 é confinada pela armadura transversal do reforço.A Tabela 1 apresenta o comparativo entre a capacidade última prevista por cada modelo e a resistência obtida experimentalmente para cada pilar. Observa-se que, em média, todos os modelos previram valores a favor da segurança, ou seja, valores para a relação entre a força última teórica e a força última experimental ($F_{u,teor}/F_{u,exp}$) menores que um. Além disso, todos os modelos apresentaram eficiência semelhante, apesar das diferentes expressões utilizadas, com uma diferença média de cerca de 10% com relação aos valores obtidos nos ensaios.

3.2 Reforço por encamisamento com PRFC

Ao contrário do reforço por aumento de seção transversal do pilar,



Figura 5

Etapas utilizadas para a análise do confinamento exercido pelo PRF e pela armadura transversal. Etapa 1: Confinamento com PRF; Etapa 2: Confinamento com armadura transversal; Etapa 3: Confinamento com PRF e armadura transversal

Tabela 1

Comparativo entre os modelos de cálculo para reforço por aumento de seção transversal com $\Delta = F_{u,teor}/F_{u,exo}$

Modelo	F _{u,exp}	Cusson e	Paultre [2]	Saatcioglu	e Razvi [3]	Frangou	et al [4]	Código modelo da fib na versão 2010 [5]		
Modelo	(kN)	F _{u,teor} (kN)	Δ	F _{u,teor} (kN)	Δ	F _{u,teor} (kN)	Δ	F _{u,teor} (kN)	Δ	
S1C1S	1540	1356	0,88	1394	0,91	1324	0,86	1340	0,87	
S1C2S	1749	1276	0,73	1295	0,74	1320	0,75	1259	0,72	
S2C1S	1850	1841	0,99	1876	1,01	1813	0,98	1823	0,99	
S1C2S	1840	1749	0,95	1765	0,96	1780	0,97	1727	0,94	
Média aritmética	-	-	0,89	-	0,90	-	0,89	-	0,88	
CV	-	-	0,13	-	0,13	-	0,12	-	0,13	

* CV = coefficient of variation

Pilares circulares reforçados com encamisamento por PRF

Doforância	Dimensões Referência Pilar - D						FRP							
Kelerencid	Pilar	D (mm)	H (mm)	λ	Tipo de fibra	t _f (mm)	^ج ر (‰)	E _f (MPa)	f _f (MPa)	n	f _c (MPa)	f _ı (MPa)	f _{cc,exp} (MPa)	
Carrazado [6]	C1	190	570	12	PRFC	0,130	11,92	218950	2610	1	26,16	3,57	38,81	
	C2	190	570	12	PRFC	0,130	10,89	218950	2384	2	26,16	6,53	53,08	
	C1-25a	150	300	8	PRFC	0,165	15,00	235000	3525	1	25,60	7,76	43,90	
Shehata,	C2-30a	150	300	8	PRFC	0,165	15,00	235000	3525	1	29,80	7,76	57,00	
Shehata [19]	C1-25b	150	300	8	PRFC	0,165	15,00	235000	3525	2	25,60	15,51	59,60	
	C2-30b	150	300	8	PRFC	0,165	15,00	235000	3525	2	29,80	15,51	72,10	
	DA11	153	305	8	PRFV	0,240	-	-	579,2	6	30,86	10,94	53,66	
	DA13	153	305	8	PRFV	0,240	-	-	579,2	6	30,86	10,94	56,50	
	DB11	153	305	8	PRFV	0,240	-	-	579,2	6	29,64	10,94	67,12	
	DB12	153	305	8	PRFV	0,240	-	-	579,2	6	29,64	10,94	55,29	
	DB13	153	305	8	PRFV	0,240	-	-	579,2	6	29,64	10,94	60,23	
	DC11	153	305	8	PRFV	0,240	-	-	579,2	6	31,97	10,94	59,06	
	DC12	153	305	8	PRFV	0,240	-	-	579,2	6	31,97	10,94	60,79	
	DA21	153	305	8	PRFV	0,220	-	-	579,2	10	30,86	16,71	72,92	
	DA22	153	305	8	PRFV	0,220	-	-	579,2	10	30,86	16,71	65,67	
	DA23	153	305	8	PRFV	0,220	-	-	579,2	10	30,86	16,71	77,99	
Samaan <i>et al.</i>	DB21	153	305	8	PRFV	0,220	-	-	579,2	10	29,64	16,71	74,56	
[10]	DB22	153	305	8	PRFV	0,220	-	-	579,2	10	29,64	16,71	93,02	
	DB23	153	305	8	PRFV	0,220	-	-	579,2	10	29,64	16,71	71,77	
	DC21	153	305	8	PRFV	0,220	-	-	579,2	10	31,97	16,71	77,35	
	DC22	153	305	8	PRFV	0,220	-	-	579,2	10	31,97	16,71	77,08	
	DA31	153	305	8	PRFV	0,212	-	-	579,2	14	30,86	22,56	85,72	
	DA33	153	305	8	PRFV	0,212	-	-	579,2	14	30,86	22,56	86,76	
	DB31	153	305	8	PRFV	0,212	-	-	579,2	14	29,64	22,56	86,22	
	DB32	153	305	8	PRFV	0,212	-	-	579,2	14	29,64	22,56	114,66	
	DB33	153	305	8	PRFV	0,212	-	-	579,2	14	29,64	22,56	87,44	
	DC31	153	305	8	PRFV	0,212	-	-	579,2	14	31,97	22,56	86,11	
	DC32	153	305	8	PRFV	0,212	-	-	579,2	14	31,97	22,56	83,99	
	N1	152	300	8	PRFC	0,381	13,40	78000	1045	1	32,10	5,24	39,71	
	N2	152	300	8	PRFC	0,381	13,40	78000	1045	2	32,10	10,48	57,58	
Eid, Roy e	N3	152	300	8	PRFC	0,381	13,40	78000	1045	3	33,60	15,72	74,24	
Paultre [20]	M1	152	300	8	PRFC	0,381	13,40	78000	1045	1	48,00	5,24	59,80	
	M2	152	300	8	PRFC	0,381	13,40	78000	1045	2	48,00	10,48	80,04	
	M3	152	300	8	PRFC	0,381	13,40	78000	1045	3	48,00	15,72	99,84	
	C1H0L1M	305	915	12	PRFC	0,167	17,79	244000	4340	1	24,50	4,75	35,00	
Wang <i>et al.</i>	C1H0L2M	305	915	12	PRFC	0,167	17,79	244000	4340	2	24,50	9,51	55,30	
[21]	C2H0L1M	204	612	12	PRFC	0,167	17,79	244000	4340	1	24,50	7,11	46,10	
	C2H0L2M	204	612	12	PRFC	0,167	17,79	244000	4340	2	24,50	14,21	65,20	
	SOF1	150	300	8	PRFC	0,110	18,04	250000	4510	1	36,20	6,61	41,70	
	SOF2	150	300	8	PRFC	0,110	18,04	250000	4510	2	36,20	13,23	57,80	
Lee <i>et al.</i> [22]	SOF3	150	300	8	PRFC	0,110	18,04	250000	4510	3	36,20	19,84	69,10	
	SOF4	150	300	8	PRFC	0,110	18,04	250000	4510	4	36,20	26,46	85,40	
	SOF5	150	300	8	PRFC	0,110	18,04	250000	4510	5	36,20	33,07	104,30	

Tabela 3

Comparativo entre os resultados teóricos e experimentais dos pilares confinados com PRF

	f _{cc,teor} /f _{cc,exp}												
Referência	Fardis e Khalili [16]	Karbhari e Eckel [17]	Mirmiran e Shahawy [18]	Miyauchi <i>et al.</i> [11]	Samaan <i>et al.</i> [10]	Saafi <i>et</i> <i>al.</i> [14]	Toutanji [13]	Spoelstra e Monti [15]	Kono <i>et</i> <i>al.</i> [12]	Shehata, Carneiro, e Shehata [19]			
Média aritmética	0,90	0,96	0,78	1,20	1,04	0,99	1,29	1,01	0,85	0,89			
CV	0,12	0,12	0,17	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,15	0,12			

Aplicação do teste t-Student nos pilares confinados com PRF – t crítico = 2,01808

Referência	t
Fardis & Khalili [16]	5,57413
Karbahari & Eckel [17]	2,83641
Mirmiran & Shahawy [18]	8,84600
Miyauchi <i>et al.</i> [11]	- 7,66059
Samaan <i>et al.</i> [10]	- 0,83592
Saafi <i>et al.</i> [14]	1,08314
Toutanji [13]	-11,17020
Spoelstra & Monti [15]	- 0,10101
Kono <i>et al.</i> [12]	6,71226
Shehata, Carneiro e Shehata [19]	6,08063

há na literatura vários ensaios de pilares reforçados por encamisamento com PRFC. Para esta análise, o reforço foi analisado em três situações, conforme esquematizado na Figura 5. Inicialmente, os modelos de confinamento com fibras de carbono (Quadro 1) foram aplicados em pilares encamisados apenas com PRF sem a presença de armadura transversal. Em seguida, os modelos de confinamento por meio de armadura transversal, apresentados no subitem 2.1, foram aplicados em pilares circulares reforçados com armadura transversal e sem a presença da fibra de carbono. Os resultados foram analisados a fim de verificar isoladamente a eficiência dos modelos de avaliação do confinamento. Por fim, foi investigada a interação entre o confinamento gerado pelas fibras de carbono e pela armadura transversal em pilares com armadura transversal e encamisados com PRF. Para tal, foi feita a associação entre os modelos de cálculo apresentados nos itens 2.1 e 2.2.

3.2.1 Pilares confinados apenas com PRF

A primeira análise considerou um banco de dados com 43 pilares reforçados unicamente com PRF (Tabela 2). O banco de dados contém 22 pilares ensaiados por Samaan *et al* [10], 2 pilares en-



Figura 6



saiados por Carrazedo [6], 4 pilares ensaiados por Shehata, Carneiro e Shehata [19], 6 pilares ensaiados por Eid, Roy e Paultre [20], 4 pilares ensaiados por Wang *et al* [21] e 5 pilares ensaiados por Lee *et* al [22]. Todos são pilares curtos, de seção transversal circular, diâmetro variável entre 150 mm e 305 mm e resistência a compressão do concreto variando de 24,5 MPa a 48 MPa. Do total de pilares, 21 foram reforçados com fibras de vidro e 22 com fibras de carbono. A Tabela 3 apresenta o resultado da comparação da resistência do concreto confinado obtido da aplicaçao dos modelos de confinamento com PRF ($f_{cc,teor}$) com a resistência obtida do ensaio dos pilares ($f_{cc,exp}$). Como esses pilares não possuíam armadura longitudinal, a resistência dos mesmos era devida apenas à resistência do concreto confinado.

Uma avaliação geral permite afirmar que os modelos de



Figura 7

Comparação teórico-experimental da resistência à compressão do concreto confinado (f_{cc}) para os modelos de confinamento com PRF. (a) Método de Samaan; (b) Método de Saafi; (c) Método de Spoelstra. CC: Coeficiente de correlação; DP: Desvio Padrão

Pilares confinados com armadura transversal

Poforônoia	Madala	D	imensõe	s	A lor	rmadu ngitudi	ra nal		Armad	ura trans	sversal		Condições experimentais		
Relefencia	Wodelo	D (mm)	H (mm)	λ	∮ا (cm)	n°	f _{y,i} (MPa)	Tipo	₀t (cm)	s (mm)	f _{y.t} (MPa)	c (cm)	f _。 (MPa)	f _{cc,exp} (MPa)	
Carrazedo	C0\$50	190	570	12	0,8	6	554,8	Espirais	0,50	50	756	1,5	26,16	39,44	
[6]	C0S25	190	570	12	0,8	6	554,8	Espirais	0,50	25	756	1,5	28,86	60,52	
	C4NP0C	303	1200	16	1,6	6	423	Espirais	1,13	100	456	2,5	31,70	2930	
Eid, Roy,	C4N1P0C	303	1200	16	1,6	6	423	Espirais	1,13	100	456	2,5	36,00	3235	
[20]	C2NP0C	303	1200	16	1,6	6	423	Espirais	1,13	65	456	2,5	31,70	3000	
	C2N1P0C	303	1200	16	1,6	6	423	Espirais	1,13	65	456	2,5	36,00	3490	
	C1H1LOM	305	915	12	1,2	8	340	Estribos	0,60	80	397	2,1	24,50	28,7	
Wang <i>et</i>	C1H2L0M	305	915	12	1,2	8	340	Estribos	0,60	40	397	2,1	24,50	29,1	
al. [21]	C2H1L0M	204	612	12	1,0	6	312	Estribos	0,60	120	397	1,5	24,50	25,8	
	C2H2L0M	204	612	12	1,0	6	312	Estribos	0,60	60	397	1,5	24,50	30,1	
	а	500	1500	12	1,6	12	295	Espirais	1,20	52	310	2,5	28,00	38,0	
	b	500	1500	12	1,6	12	295	Espirais	1,20	52	340	2,5	31,00	48,0	
	С	500	1500	12	1,6	12	295	Espirais	1,20	52	340	2,5	33,00	47,0	
	1	500	1500	12	1,6	12	295	Espirais	1,20	41	340	2,5	28,00	51,0	
	2	500	1500	12	1,6	12	295	Espirais	1,20	69	340	2,5	28,00	46,0	
	3	500	1500	12	1,6	12	295	Espirais	1,20	103	340	2,5	28,00	40,0	
Mander,	4	500	1500	12	1,6	12	295	Espirais	1,00	119	320	2,5	28,00	36,0	
Priestley, e	5	500	1500	12	1,6	12	295	Espirais	1,00	36	320	2,5	28,00	47,0	
Park [7]	6	500	1500	12	1,6	12	295	Espirais	1,60	93	307	2,5	28,00	46,0	
	7	500	1500	12	2,8	8	296	Espirais	1,20	52	340	2,5	31,00	52,0	
	8	500	1500	12	2,4	11	260	Espirais	1,20	52	340	2,5	27,00	49,0	
	9	500	1500	12	2,0	16	286	Espirais	1,20	52	340	2,5	31,00	52,0	
	10	500	1500	12	1,6	24	295	Espirais	1,20	52	340	2,5	27,00	50,0	
	11	500	1500	12	1,6	36	295	Espirais	1,20	52	340	2,5	27,00	54,0	
	12	500	1500	12	1,6	24	360	Espirais	1,20	52	340	2,5	31,00	52,0	

Fardis e Khalili [16], Karbhari e Eckel [17], Samaan *et al* [10], Saafi *et al* [14] e Spoelstra e Monti [15] alcançaram as melhores previsões, com erro inferior a 10% do valor experimental, para mais ou para menos. O coeficiente de variação para todos esses modelos também se mantiveram aceitáveis, da ordem de 12%.

Tendo em vista o tamanho maior da amostra nessa análise, foi realizado o teste t-Student bilateral em amostras pareadas. Esse método foi adotado por ser um teste de igualdade de médias em amostras dependentes (MONTGOMERY; RUNGER [25]). A variância da população é desconhecida e foi utilizado um nível de significância (α) de 10% para os dez modelos de cálculo. A Tabela 4 contém os resultados da variável de teste (t) e do valor crítico da variável (t crítico). Dessa análise, conclui--se que apenas nos modelos de Samaan *et al* [10], Saafi *et al*

Tabela 6

Comparativo entre os resultados teóricos e experimentais dos pilares confinados com armadura transversal

	F _{u,teor} /F _{u,exp}									
Referência	Cusson e Paultre [2]	Saatcioglu e Razvi [3]	Frangou et al [4]	Código modelo da <i>fib</i> na versão 2010 [5]						
Média aritmética	0,90	1,02	0,88	0,97						
CV	0,06	0,08	0,06	0,08						



Figura 8

Variabilidade do modelo de Saatcioglu e Razvi [3] em relação aos valores experimentais

Tabela 7

Aplicação do teste t-Student nos pilares confinados com armadura transversal – t crítico = 1,71088

Referência	t
Cusson e Paultre [2]	5,40745
Saatcioglu e Razvi [3]	-0,02044
Frangou <i>et al.</i> [4]	5,91667
Código modelo da fib [5]	1,99189



Comparação teórico-experimental da capacidade resistente (F_u) para o modelo de Saatcioglu e Razvi [3]. CC: Coeficiente de correlação; DP: Desvio Padrão

[14] e Spoelstra e Monti [15] as resistências previstas e obtidas experimentalmente não foram significativamente diferentes, podendo-se aceitar a hipótese de que apenas esses modelos são capazes de prever uma resistência igual à resistência observada em ensaios de pilares reforçados com PRF a um nível de significância de 10% (Figura 6). Ao se comparar os resultados previstos por esses modelos com os resultados experimentais para essa amostra de pilares ensaiados, obtém-se um coeficiente de correlação que varia de 0,63 a 0,75, conforme apresentado na Figura 7, sendo a melhor correlação apresentada pelo modelo de Spoelstra e Monti [15] (Figura 7(c)).

3.2.2 Pilares confinados apenas com armadura transversal

O banco de dados utilizado para a segunda análise contém 25 pilares circulares reforçados com armadura transversal e longitudinal (Tabela 5). Dentre eles, 2 foram ensaiados por Carrazedo [6], 4 por Eid, Roy e Paultre [20], 4 por Wang *et al* [21] e 15 por Mander, Pristley e Park [7]. Todos os pilares são curtos, com diâmetro entre 190 mm e 500 mm, e resistência à compressão do concreto variando de 24,5 MPa a 36 MPa. Os resultados dessa análise estão apresentados na Tabela 6. A resistência dos pilares nessa análise foi avaliada por meio da resistência do concreto confinado, à qual foi adicionada a resistência devida às armaduras longitudinais. A contribuição do cobrimento do pilar foi desconsiderada.

O comparativo revela que todos os quatro modelos de cálculo previram a resistência dos pilares com uma diferença inferior a 12% e coeficiente de variação da ordem de 8%. O modelo de Saatcioglu e Razvi [3] superestimou a resistência, já que os autores consideram o coeficiente de efetividade igual a 1,0 para pilares circulares. No entanto, este método apresentou uma diferença, em média, de apenas 2% com relação aos resultados experimentais.

Realizando o teste de igualdade de médias em amostras dependentes com um nível de significância (α) de 10% (Tabela 7), conclui-se que apenas o modelo de Saatcioglu e Razvi [3] não obteve resistência significamente diferente da resistência experimental, podendo-se aceitar a hipótese de que apenas esse modelo é capaz de prever uma resistência igual à resistência observada em ensaios de pilares confinados com armadura transversal a um nível de significância de 10% (Figura 8). Ao se comparar os resultados previstos pelo modelo de Saatcioglu e Razvi [3] com os resultados experimentais para essa amostra de pilares ensaiados, obtém-se um coeficiente de correlação de 0,98 (Figura 9).

3.2.3 Pilares confinados com PRF e armadura transversal

O banco de dados para essa análise contém 63 pilares, provenientes de ensaios realizados por Huang *et al* [23] (6 pilares),



Figura 10

Variabilidade dos modelos de confinamento com PRF e armadura transversal em relação aos valores experimentais

Carrazedo [6] (4 pilares), Eid, Roy e Paultre [20] (13 pilares), Lee *et al* [22] (14 pilares), Yin *et al* [24] (19 pilares) e Wang *et* al [21] (8 pilares). Os pilares analisados são curtos, têm diâmetro variando entre 150 mm e 305 mm e resistência à compressão do concreto variando de 24,5 MPa a 50,8 MPa. Destes pilares, seis receberam reforço com fibras de vidro e 57 com fibras de carbono. Além disso, doze destes pilares foram concretados com armaduras na forma de estribos convencionais e 51 com armaduras em espirais circulares (Tabela 8).

Para a terceira análise, o ganho de resistência teórico nos pilares foi mensurado a partir da Equação (16) combinando os quatro modelos de cálculo de confinamento por armadura transversal, mostrados no subitem 2.1, com os dez modelos de confinamento por PRF, apresentadas no subitem 2.2, gerando um total de 40 combinações. Além disso, foi analisado o modelo de cálculo proposto por Machado [9], que engloba o confinamento simultâneo entre fibra e estribo. Os resultados estão mostrados na Tabela 9. A resistância dos pilares nessa análise foi avaliada por meio da resistência do concreto confinado, à qual foi adicionada a resistência devida às armaduras longitudinais.

Uma avaliação geral dos resultados mostra que a média de todas as 41 análises foi próxima dos valores obtidos dos ensaios. Entretanto, todas as combinações apresentaram coeficiente de variação superior a 20%.

Realizando o teste de igualdade de médias em amostras dependentes com um nível de significância (α) de 10%, cujos resultados estão contidos na Tabela 10, conclui-se que as resistências previstas e obtidas experimentalmente não foram significativamente diferentes em apenas onze combinações (Tabela 11). Assim, podese aceitar a hipótese de que apenas essas onze combinações de modelos de cálculo são capazes de prever uma resistência igual à resistência observada em ensaios de pilares confinados com armadura transversal e encamisados com PRF a um nível de significância de 10% (Figura 10). Ao se comparar os resultados previstos por esses onze modelos com os resultados experimentais para essa amostra de pilares ensaiados, obtém-se um coeficiente de correlação que varia de 0,88 a 0,92 (Figura 11), sendo a melhor correlação apresentada pelo modelo proposto pelo Código Modelo da fib na versão de 2010 [5] e pelo modelo de Spoelstra e Monti [15], isto é, Combinação de número 36 (Figura 11(j)). Além disso, a relação entre a resistância axial prevista pelos onze modelos e a resistência experimental dos pilares do banco de dados variou entre 0,93 e 1,00.

O método proposto por Machado [9] superestimou a resistência dos pilares do banco de dados, em média, em 6% e, quando analisado estatisticamente, não foi capaz de representar a resistência dos pilares com um nível de significância (α) de 10%. Por isso, as combinações entre os métodos de cálculo com estribos e com fibras indicadas na Tabela 11 foram considerados mais eficientes que o método apresentado em Machado [9] na previsão da capacidade resistente do pilar reforçado com PRFC e considerando o efeito do confinamento da armadura transversal.

Table 8

Pilares confinados com PRF e armadura transversal (part 1)

Doforônoia	Madala		Pil	ar		FRP					A lor	rmadu ngitudi	ıra nal	Armadura transversal			
Relefencia	Modelo	D (mm)	H (mm)	c (cm)	f _。 (MPa)	Tipo de fibra	t _r (mm)	ζ _f (‰)	E _r (MPa)	n	^փ լ (cm)	n°	f _{y,i} (MPa)	Tipo	, (cm)	s (mm)	f _{y,t} (MPa)
	C1S50	190	570	1,5	26,16	PRFC	0,130	11,00	218950	1	0,8	6	554,8	Espirais	0,50	50	756
Carrazedo	C2S50	190	570	1,5	26,16	PRFC	0,130	8,78	218950	2	0,8	6	554,8	Espirais	0,50	50	756
[6]	C1\$25	190	570	1,5	28,86	PRFC	0,130	10,63	218950	1	0,8	6	554,8	Espirais	0,50	25	756
	C2S25	190	570	1,5	28,86	PRFC	0,130	10,65	218950	2	0,8	6	554,8	Espirais	0,50	25	756
	A5NP2C	303	1200	2,5	29,40	PRFC	0,381	13,40	78000	2	1,6	6	423	Espirais	0,95	150	602
	A3NP2C	303	1200	2,5	31,70	PRFC	0,381	13,40	78000	2	1,6	6	550	Espirais	0,95	70	602
	A1NP2C	303	1200	2,5	31,70	PRFC	0,381	13,40	78000	2	1,6	6	486,5	Espirais	0,95	45	602
	C4NP2C	303	1200	2,5	31,70	PRFC	0,381	13,40	78000	2	1,6	6	423	Espirais	1,13	100	456
	C4N1P2C	303	1200	2,5	36,00	PRFC	0,381	13,40	78000	2	1,6	6	423	Espirais	1,13	100	456
Fiel Davis	C4NP4C	303	1200	2,5	31,70	PRFC	0,381	13,40	78000	4	1,6	6	423	Espirais	1,13	100	456
Paultre [20]	B4NP2C	303	1200	2,5	31,70	PRFC	0,381	13,40	78000	2	1,6	6	550	Espirais	1,13	100	456
	C4MP2C	303	1200	2,5	50,80	PRFC	0,381	13,40	78000	2	1,6	6	423	Espirais	1,13	100	456
	C2NP2C	303	1200	2,5	31,70	PRFC	0,381	13,40	78000	2	1,6	6	423	Espirais	1,13	65	456
	C2N1P2C	303	1200	2,5	36,00	PRFC	0,381	13,40	78000	2	1,6	6	423	Espirais	1,13	65	456
	C2N1P4C	303	1200	2,5	36,00	PRFC	0,381	13,40	78000	4	1,6	6	423	Espirais	1,13	65	456
	C2MP2C	303	1200	2,5	50,80	PRFC	0,381	13,40	78000	2	1,6	6	423	Espirais	1,13	65	456
	C2MP4C	303	1200	2,5	50,80	PRFC	0,381	13,40	78000	4	1,6	6	423	Espirais	1,13	65	456
	P1S1	150	300	0	30,04	PRFV	0,436	16,00	60800	1	-	-	-	Espirais	0,80	25	356
	P2S1	150	300	0	30,04	PRFV	0,436	16,00	60800	2	-	-	-	Espirais	0,80	25	356
Huang <i>et al.</i>	P3S1	150	300	0	30,04	PRFV	0,436	16,00	60800	3	-	-	-	Espirais	0,80	25	356
[23]	P1S2	150	300	0	30,04	PRFV	0,436	16,00	60800	1	-	-	-	Espirais	0,80	50	356
	P2S2	150	300	0	30,04	PRFV	0,436	16,00	60800	2	-	-	-	Espirais	0,80	50	356
	P3S2	150	300	0	30,04	PRFV	0,436	16,00	60800	3	-	-	-	Espirais	0,80	50	356

4. Conclusões

Neste artigo, foram analisados alguns dos principais modelos de cálculo utilizados no dimensionamento do reforço em pilares por meio do acréscimo de seção transversal de concreto e pelo confinamento com Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono. Para avaliar a eficiência desses modelos de cálculo, os mesmos foram aplicados a um banco de dados formados por 135 pilares ensaidos em laboratório e os resultados foram analisados estatisticamente. As principais conclusões são:

No caso do reforço por aumento de seção transversal de concreto, os modelos de cálculo estudados por Cusson e Paultre [2], Saatcioglu e Razvi [3], Frangou *et al* [4] e pelo Código Modelo da fib na versão 2010 [5], apresentaram boas aproximações quando comparados com os resultados experimentais. Quando aplicados nos pilares confinados por armadura

Table 8

Pilares confinados com PRF e armadura transversal (part 2)

Doforância	Madala		Pi	ar				FRP			Armadura longitudinal			Armadura transversal			
Referencia	wodelo	D (mm)	H (mm)	c (cm)	f _c (MPa)	Tipo de fibra	t _r (mm)	ξ _f (‰)	E _f (MPa)	n	¢، (cm)	n°	f _{yi} (MPa)	Tipo	¢ _t (cm)	s (mm)	f _{y,t} (MPa)
	S6F1	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	1	-	-	-	Espirais	0,55	60	569,6
	S6F2	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	2	-	-	-	Espirais	0,55	60	569,6
	S6F4	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	4	-	-	-	Espirais	0,55	60	569,6
	S6F5	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	5	-	-	-	Espirais	0,55	60	569,6
	S4F1	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	1	-	-	-	Espirais	0,55	40	569,6
	S4F2	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	2	-	-	-	Espirais	0,55	40	569,6
Lee et al.	S4F3	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	3	-	-	-	Espirais	0,55	40	569,6
[22]	S4F4	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	4	-	-	-	Espirais	0,55	40	569,6
	S4F5	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	5	-	-	-	Espirais	0,55	40	569,6
	S2F1	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	1	-	-	-	Espirais	0,55	20	569,6
	S2F2	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	2	-	-	-	Espirais	0,55	20	569,6
	S2F3	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	3	-	-	-	Espirais	0,55	20	569,6
	S2F4	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	4	-	-	-	Espirais	0,55	20	569,6
	S2F5	150	300	0,725	36,20	PRFC	0,110	18,04	250000	5	-	-	-	Espirais	0,55	20	569,6
	1L-50-N1	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	1	-	-	-	Espirais	0,60	50	335
	1L-50-N2	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	1	-	-	-	Espirais	0,60	50	335
	1L-50-N3	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	1	-	-	-	Espirais	0,60	50	335
	1L-25-N1	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	1	-	-	-	Espirais	0,60	25	335
	1L-25-N2	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	1	-	-	-	Espirais	0,60	25	335
	1L-25-N3	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	1	-	-	-	Espirais	0,60	25	335
	2L-50-N1	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	2	-	-	-	Espirais	0,60	50	335
	2L-50-N2	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	2	-	-	-	Espirais	0,60	50	335
Yin <i>et al.</i>	2L-50-N3	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	2	-	-	-	Espirais	0,60	50	335
[24]	2L-25-N1	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	2	-	-	-	Espirais	0,60	25	335
	2L-25-N2	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	2	-	-	-	Espirais	0,60	25	335
	2L-25-N3	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	2	-	-	-	Espirais	0,60	25	335
	3L-50-N1	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	3	-	-	-	Espirais	0,60	50	335
	3L-50-N2	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	3	-	-	-	Espirais	0,60	50	335
	3L-50-N3	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	3	-	-	-	Espirais	0,60	50	335
	3L-25-N1	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	3	-	-	-	Espirais	0,60	25	335
	3L-25-N2	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	3	-	-	-	Espirais	0,60	25	335
	3L-25-N3	150	300	0,5	30,60	PRFC	0,167	15,00	213000	3	-	-	-	Espirais	0,60	25	335
	C1H1L1M	305	915	2,1	24,50	PRFC	0,167	17,79	244000	1	1,2	8	340,0	Estribos	0,60	80	397
	C1H1L2M	305	915	2,1	24,50	PRFC	0,167	17,79	244000	2	1,2	8	340,0	Estribos	0,60	80	397
	C1H2L1M	305	915	2,1	24,50	PRFC	0,167	17,79	244000	1	1,2	8	340,0	Estribos	0,60	40	397
Wang <i>et al.</i>	C1H2L2M	305	915	2,1	24,50	PRFC	0,167	17,79	244000	2	1,2	8	340,0	Estribos	0,60	40	397
[Ž1]	C2H1L1M	204	612	1,5	24,50	PRFC	0,167	17,79	244000	1	1	6	312,0	Estribos	0,60	120	397
	C2H1L2M	204	612	1,5	24,50	PRFC	0,167	17,79	244000	2	1	6	312,0	Estribos	0,60	120	397
	C2H2L1M	204	612	1,5	24,50	PRFC	0,167	17,79	244000	1	1	6	312,0	Estribos	0,60	60	397
	C2H2L2M	204	612	1,5	24,50	PRFC	0,167	17,79	244000	2	1	6	312,0	Estribos	0,60	60	397

transversal (subitem 3.2.2), apenas o modelo de Saatcioglu e Razvi [3] se mostrou eficiente, apresentando coeficiente de correlação de 0,98 com os pilares do banco de dados;

- Ao investigar os modelos de dimensionamento do reforço apenas com o uso de PRF, constatou-se que os modelos de Samaan *et al* [10], Saafi *et al* [14] e Spoelstra e Monti [15] levaram às melhores previsões dos resultados experimentais. O modelo de Spoelstra e Monti [15] foi o que apresentou melhor correlação com os pilares do banco de dados;
- Dentre as 41 combinações analisadas para avaliação da resistência do pilar reforçado por confinamento com PRF e armadura transversal, apenas onze combinações forneceram uma resistência que não diferiu estatisticamente da resistência dos pilares do bando de dados (Tabela 11), sendo a melhor correlação obtida pela combinação entre os modelos propostos pelo Código Modelo da fib na versão de 2010 [5] e por Spoelstra e Monti [15];
- Foi possível comprovar, para os pilares reforçados com PRF e armadura transversal, que há, de fato, um confinamento

Tabela 9

Comparativo entre os resultados teóricos e experimentais dos pilares confinados com PRF e armadura transversal

Comb.	Referências	Média aritmética	CV
1	Cusson e Paultre [2] e Samaan <i>et al,</i> [10]	0,97	0,22
2	Cusson e Paultre [2] e Miyauchi et al, [11]	1,05	0,20
3	Cusson e Paultre [2] e Kono <i>et al,</i> [12]	0,84	0,24
4	Cusson e Paultre [2] e Toutanji [13]	1,13	0,20
5	Cusson e Paultre [2] e Saafi et al, [14]	0,93	0,21
6	Cusson e Paultre [2] e Spoelstra e Monti [15]	0,93	0,20
7	Cusson e Paultre [2] e Fardis e Khalili [16]	0,86	0,21
8	Cusson e Paultre [2] e Karbhari e Eckel [17]	0,91	0,21
9	Cusson e Paultre [2] e Mirmiran e Shahawy [18]	0,80	0,26
10	Cusson e Paultre [2] e Shehata, Carneiro, e Shehata [19]	0,86	0,21
11	Saatcioglu e Razvi [3] e Samaan <i>et al,</i> [10]	1,06	0,21
12	Saatcioglu e Razvi [3] e Miyauchi <i>et al,</i> [11]	1,15	0,20
13	Saatcioglu e Razvi [3] e Kono <i>et al</i> , [12]	0,93	0,24
14	Saatcioglu e Razvi [3] e Toutanji [13]	1,22	0,20
15	Saatcioglu e Razvi [3] e Saafi <i>et al,</i> [14]	1,02	0,21
16	Saatcioglu e Razvi [3] e Spoelstra e Monti [15]	1,02	0,20
17	Saatcioglu e Razvi [3] e Fardis e Khalili [16]	0,95	0,21
18	Saatcioglu e Razvi [3] e Karbhari e Eckel [17]	1,00	0,21
19	Saatcioglu e Razvi [3] e Mirmiran e Shahawy [18]	0,89	0,26
20	Saatcioglu e Razvi [3] e Shehata, Carneiro, e Shehata [19]	0,95	0,21
21	Frangou <i>et al,</i> [4] e Samaan <i>et al,</i> [10]	0,96	0,22
22	Frangou <i>et al,</i> [4] e Miyauchi <i>et al,</i> [11]	1,04	0,21
23	Frangou <i>et al,</i> [4] e Kono <i>et al,</i> [12]	0,83	0,24
24	Frangou <i>et al,</i> [4] e Toutanji [13]	1,12	0,20
25	Frangou <i>et al,</i> [4] e Saafi <i>et al,</i> [14]	0,92	0,22
26	Frangou <i>et al,</i> [4] e Spoelstra e Monti [15]	0,92	0,20
27	Frangou <i>et al,</i> [4] e Fardis e Khalili [16]	0,85	0,22
28	Frangou <i>et al,</i> [4] e Karbhari e Eckel [17]	0,90	0,22
29	Frangou <i>et al,</i> [4] e Mirmiran e Shahawy [18]	0,79	0,26
30	Frangou <i>et al,</i> [4] e Shehata, Carneiro, e Shehata [19]	0,85	0,22
31	Código Modelo da fib [5] e Samaan <i>et al</i> [10]	1,00	0,21
32	Código Modelo da <i>fib</i> [5] e Miyauchi <i>et al</i> [11]	1,09	0,19
33	Código Modelo da fib [5] e Kono et al [12]	0,87	0,23
34	Código Modelo da fib [5] e Toutanji [13]	1,16	0,19
35	Código Modelo da fib [5] e Saafi et al [14]	0,97	0,21
36	Código Modelo da fib [5] e Spoelstra e Monti [15]	0,97	0,19
37	Código Modelo da fib [5] e Fardis e Khalili [16]	0,90	0,21
38	Código Modelo da fib [5] e Karbhari e Eckel [17]	0,94	0,21
39	Código Modelo da fib [5] e Mirmiran e Shahawy [18]	0,83	0,25
40	Código Modelo da fib [5] e Shehata, Carneiro e Shehata [19]	0,89	0,21
41	Machado [9]	1,06	0,23

simultâneo devido a ambos os materiais. Além disso, a hipótese de que a resistência do concreto confinado pode ser obtida isoladamente para o PRFC e para a armadura transversal e depois somados se mostrou mais eficiente que a hipótese de que a resistência do concreto confinado seria obtida a partir da soma da pressão de confinamento devida ao PRFC e a armadura transversal.

5. Lista de símbolos

A _{c,n}	área de concreto confinada pela armadura transversal;	С
Ag	área da seção transversal do pilar;	t
A _{s,tx}	área total da armadura transversal na direção perpendicular a x;	
A _{s,ty}	área total da armadura transversal na direção perpendicular	
Δ	a y, área de armadura longitudinal do pilar:	
Δ Δ	área da seção da armadura transversal:	
h h	largura do pilar retangular:	
b	distância de centro a cent ro entre armaduras longitudinais:	
с С	cobrimento do pilar:	
c	dimensão do núcleo do pilar perpendicular à direção x	
U _x	medida entre centros das armaduras transversais:	
C	dimensão do núcleo do nilar perpendicular à direção v	
U _y	medida entre centros das armaduras transversais.	
PRFA	Polímeros Reforcados com Fibras de Aramida:	
PREC	Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono:	
PREV	Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro.	
PRE	Polímeros Reforçados com Fibras	
d	diâmetro da armadura transversal circular medida a	
u _i	nartir do eixo central da armadura:	
d	diâmetro da secão de concreto confinada pelos estribos:	
	diâmetro do pilar circular:	
F	módulo de elasticidade da fibra de carbono:	
⊑ _f f	resistência do concreto no pilar original:	
' _c f	acráscimo de resistância à compressão do núcleo:	
' _{cc} f	acréscimo de resistência devido à armadura transversal:	
f cc,e	acréscimo de resistência total experimental:	
^I cc,exp f	acréscimo de resistência devido à fibra:	
cc,f f	resistência à tração na jaqueta de fibras de carbono:	
۱ _f f	nessão lateral.	
ו ו	pressão confinante total efetiva:	
l _{le} f	pressão lateral exercida pela armadura transversal:	
l,e f	pressão lateral gerada pelo PRE:	
l,f f	pressão lateral aplicada sobre o lado h da seção transversal:	
l,f(b) f	pressão lateral aplicada sobre o lado b da seção transversal;	
l,f(h) f	resistância à tração da armadura transversal:	
y,t f	resistência das armaduras longitudinais:	
y,I	canacidade resistente última experimental:	
u,exp	capacidade resistente última teórica:	
u,teor	altura da seção transversal do pilar retangular:	
н Ц	altura da seção transversar do pilar retarigular,	(
r i k	anura uo pilar, coeficiente de reducão da eficiência do confinamento	
n _a	devido à forma da secão transversal do pilor:	(
k	ucinuo a norma da seção mansiversar do plian,	Ċ
к _b	ostribos rotopouloros:	
k	esuivus relangulares,	
к ₂	Razvi (1992);	

- K_e coeficiente de efetividade proposto por Cusson e Paultre (1995);
- n número de camadas de fibras de carbono;
- nº número de armaduras longitudinais;
- r' razão entre as dimensões do pilar;
- s espaçamento de centro a centro entre estribos;
- s' espaçamento livre entre estribos;

Tabela 10

Aplicação do teste t-Student nos pilares confinados com PRF e armadura transversal – t crítico = 1,99897

Referências	t
Cusson e Paultre [2] e Samaan <i>et al.</i> [10]	-0,12386
Cusson e Paultre [2] e Miyauchi et al. [11]	-3,05512
Cusson e Paultre [2] e Kono <i>et al.</i> [12]	5,66179
Cusson e Paultre [2] e Toutanji [13]	-4,95605
Cusson e Paultre [2] e Saafi et al. [14]	1,58771
Cusson e Paultre [2] e Spoelstra e Monti [15]	2,15434
Cusson e Paultre [2] e Fardis e Khalili [16]	5,33989
Cusson e Paultre [2] e Karbahari e Eckel [17]	2,77478
Cusson e Paultre [2] e Mirmiran e Shahawy [18]	6,74943
Cusson e Paultre [2] e Shehata, Carneiro e Shehata [19]	5,66797
Saatcioglu e Razvi [3] e Samaan <i>et al.</i> [10]	-2,85229
Saatcioglu e Razvi [3] e Miyauchi <i>et al.</i> [11]	-5,52444
Saatcioglu e Razvi [3] e Kono <i>et al.</i> [12]	1,99897
Saatcioglu e Razvi [3] e Toutanji [13]	-6,67271
Saatcioglu e Razvi [3] e Saafi <i>et al.</i> [14]	-1,78451
Saatcioglu e Razvi [3] e Spoelstra e Monti [15]	-1,72622
Saatcioglu e Razvi [3] e Fardis e Khalili [16]	0,73222
Saatcioglu e Razvi [3] e Karbahari e Eckel [17]	-0,96384
Saatcioglu e Razvi [3] e Mirmiran e Shahawy [18]	2,56853
Saatcioglu e Razvi [3] e Shehata, Carneiro e Shehata [19]	0,98920
Frangou <i>et al.</i> [4] e Samaan <i>et al.</i> [10]	0,23657
Frangou <i>et al.</i> [4] e Miyauchi <i>et al.</i> [11]	-2,70569
Frangou <i>et al.</i> [4] e Kono <i>et al.</i> [12]	6,19093
Frangou <i>et al.</i> [4] e Toutanji [13]	-4,71205
Frangou <i>et al.</i> [4] e Saafi <i>et al.</i> [14]	2,02394
Frangou <i>et al.</i> [4] e Spoelstra e Monti [15]	2,64534
Frangou <i>et al.</i> [4] e Fardis e Khalili [16]	5,87421
Frangou <i>et al.</i> [4] e Karbahari e Eckel [17]	3,24570
Frangou <i>et al.</i> [4] e Mirmiran e Shahawy [18]	7,20314
Frangou <i>et al.</i> [4] e Shehata, Carneiro, e Shehata [19]	6,20487
Código Modelo da <i>fib</i> 2010 [5] e Samaan <i>et al.</i> [10]	-1,35751
Código Modelo da fib 2010 [5] e Miyauchi <i>et al.</i> [11]	-4,28415
Código Modelo da <i>fib</i> 2010 [5] e Kono <i>et al.</i> [12]	3,95378
Código Modelo da <i>fib</i> 2010 [5] e Toutanji [13]	-5,88707
Código Modelo da <i>fib</i> 2010 [5] e Saafi <i>et al.</i> [14]	0,13277
Código Modelo da fib 2010 [5] e Spoelstra e Monti [15]	0,48751
Código Modelo da fib 2010 [5] e Fardis e Khalili [16]	3,50500
Código Modelo da fib 2010 [5] e Karbahari e Eckel [17]	1,20664
Código Modelo da fib 2010 [5] e Mirmiran e Shahawy [18]	5,19730
Código Modelo da <i>fib</i> 2010 [5] e Shehata, Carneiro e Shehata [19]	3,81781
Machado [9]	-2,85789

Combinações de modelos de cálculo que obtiveram as melhores previsões de resistência

Comb.	Referências	Média aritmética	CV
1	Cusson e Paultre [2] e Samaan <i>et al</i> [10]	0,97	0,22
5	Cusson e Paultre [2] e Saafi et al [14]	0,93	0,22
13	Saatcioglu e Razvi [3] e Kono <i>et al</i> [12]	0,93	0,24
17	Saatcioglu e Razvi [3] e Fardis e Khalili [16]	0,95	0,22
18	Saatcioglu e Razvi [3] e Karbhari e Eckel [17]	1,00	0,22
20	Saatcioglu e Razvi [3] e Shehata, Carneiro e Shehata [19]	0,95	0,22
21	Frangou <i>et al</i> [4] e Samaan <i>et al</i> [10]	0,96	0,22
31	Código Modelo da <i>fib</i> na versão 2010 [5] e Samaan <i>et al</i> [10]	1,00	0,21
35	Código Modelo da <i>fib</i> na versão 2010 [5] e Saafi <i>et al</i> [14]	0,97	0,21
36	Código Modelo da fib na versão 2010 [5] e Spoelstra e Monti [15]	0,97	0,20
38	Código Modelo da fib na versão 2010 [5] e Karbhari e Eckel [17]	0,94	0,21

- t, espessura da camada de fibra;
- w distância livre entre duas barras longitudinais;
- α nível de significância para o teste t-Student;
- α_n fator de redução devido ao confinamento no plano da seção transversal;
- $\alpha_{\rm s}$ fator de redução devido ao confinamento no eixo longitudinal do pilar;
- α' fator de redução que leva em conta a área efetivamente confinada;
- θ ângulo entre o reforço transversal e b_c;
- $\xi_{\rm f} \qquad \qquad {\rm deformação} \ {\rm da \ fibra \ de \ carbono;}$
- λ índice de esbeltez;
- ρ_t taxa de armadura transversal em relação à área da seção do pilar;
- ρ_{I} taxa de armadura longitudinal do pilar em relação ao núcleo de concreto;
- $\varphi_{I} \qquad \qquad \text{diâmetro da armadura longitudinal;}$
- ϕ_t diâmetro da armadura transversal;
- ω_c taxa de confinamento proposta pelo Código Model da fib [5];
- ω_w taxa mecânica de confinamento proposta por Frangou et al [4];

6. Referências bibliográficas

- TAKEUTI, A. R. Strengthening of reinforced concrete columns by means of high-performance concrete jacketing, 1999 – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, 184 p. [in Portuguese]
- [2] CUSSON, D., PAULTRE, P. Stress-strain model for confined high-strength concrete. Journal of Structural Engineering, ASCE, v. 121, n. 3, 1995, pp. 468–477.
- [3] SAATCIOGLU, M., RAZVI, S. R. Strength and ductility of confined concrete. Journal of Structural Engineering. ASCE. v. 118, n. 6, 1992, pp. 1590–1607.
- [4] FRANGOU, M., PILAKOUTAS, K. DRITSOS, S. Structural repair/strengthening of RC columns. Construction and Building Materials, v. 9, n. 5, 1995, pp. 259–266.
- [5] FIB: FÉDERATION INTERNATIONALE DU BETÓN. Model Code 2010 – Final draft, v. 2. Bulletin 66. 2012, pp. 16–26.
- [6] CARRAZEDO, R. Confinement effects and their implication on the strengthening of concrete columns by wrapping with

carbon fiber composites. São Paulo, 2002 – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, 173 p. [in Portuguese]

- [7] MANDER, J., PRIESTLEY, M., PARK, R. Theoretical stressstrain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering, v. 114, n. 8, 1988, pp. 1804–1826.
- [8] CEN: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZA-TION. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic action and rules for buildings, Brussels, 2003, 215 p.
- [9] MACHADO, A. P. Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono: Características, dimensionamento e aplicação. São Paulo: PINI, 1ed, 2002, 271 p. [in Portuguese]
- [10] SAMAAN, M., MIRMIRAN, A., SHAHAWY, M. Model of concrete confined by fiber composites. Journal of Structural Engineering, v. 124, 1998, pp. 1025–1031.
- [11] MIYAUCHI, K., NISHIBAYASHI, S., INOUE, S. Estimation of strengthening effects with carbon fiber sheet for concrete column. International Symposium. Tokyo, v. 1, 1997, pp. 217–225.
- [12] KONO, S., INAZUMI, M., KAKU, T. Evaluation of confining effects of CFRP sheets on reinforced concrete members. Proceedings of the Second International on Composites in Infrastructure, ICCI '98, H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, Editors, Tucson, Arizona, 1998, pp. 343–355.
- [13] TOUTANJI, H. A. Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets. ACI Materials Journal, v. 96, n. 3, 1999, pp. 397–404.
- [14] SAAFI, M., TOUTANJI, H.A., LI, Z. Behaviour of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes. ACI Materials Journal, v. 96, n. 4, 1999, pp. 500–509.
- [15] SPOELSTRA, M.R., MONTI, G. FRP-confined concrete model. Journal of Composites for Construction, v. 3, n. 3, 1999, pp. 143–150.
- [16] FARDIS, M. N., KHALILI, H. H. Concrete encased in fiberglass-reinforced plastic. ACI Materials Journal, v. 78, n. 6, 1981, pp. 440–446.
- [17] KARBHARI, V.M., ECKEL, D.A. Strengthening of concrete column stubs through resin infused composite wraps. Journal of Thermoplastic Composite Materials, v. 6, 1993, pp. 92–107.



Comparação teórico-experimental da capacidade resistente (F₁) dos pilares confinados com PRF e armadura transversal. (a) Combinação 1; (b) Combinação 5; (c) Combinação 13; (d) Combinação 17; (e) Combinação 18; (f) Combinação 20; (g) Combinação 21; (h) Combinação 31; (i) Combinação 35; (j) Combinação 36; (k) Combinação 38. CC: Coeficiente de correlação; DP: Desvio Padrão

- [18] MIRMIRAN, A., SHAHAWY, M. Behavior of concrete columns confined with fiber composites. Journal of Structural Engineering, ASCE, v. 123, 1997, pp. 583–590.
- [19] SHEHATA, I., CARNEIRO, L., SHEHATA, L. Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets. Materials and Structures. v. 35, 2002, pp. 50–58.
- [20] EID, R., ROY, N. PAULTRE, P. Normal- and high-strength concrete circular elements wrapped with FRP composites. Journal of Composites for Construction. v. 13, 2009, pp. 113–124.
- [21] WANG, Z., WANG, D., SMITH, S. T., LU, D. Experimental testing and analytical modeling of CFRP-confined large circular RC columns subjected to cyclic axial compression. Engineering Structures. v. 40, 2012, pp. 64–74.
- [22] LEE, J. Y., OH, Y. J., PARK, J. S., MANSOUR, M. Y. Behaviors of concrete columns confined with both spiral and fiber composites. *In*: 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004, Vancouver, Canada.
- [23] HUANG, L., SUN, X., YAN, L., ZHU, D. Compressive behavior of concrete confined with GFRP tubes and steel spirals. Polymers, 7, 2015, pp. 851–875.
- [24] YIN, P., HUANG, L., YAN, L., ZHU, D. Compressive behavior of concrete confined by CFRP and transverse spiral reinforcement. Part A: Experimental study. Materials and Structures, v. 49, n. 3, 2016, pp. 1001–1011.
- [25] MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. Rio de Janeiro: LTC, 4 ed, 2003, 464 p. [in Portuguese]