

# Distribuição da pressão de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibras de carbono

A. L. Sudano<sup>1</sup>, J. B. Hanai<sup>2</sup>

Trabalho recebido em 09/10/2006 e aprovado para publicação em 24/05/2007.

---

## Resumo

O efeito de confinamento é o princípio fundamental do reforço de pilares de concreto encamisados, seja com polímeros reforçados com fibras (PRF), seja com concreto de alto desempenho. Tal efeito é fortemente influenciado pela forma da seção transversal do pilar após o reforço. Essa influência ocorre em função do efeito de arqueamento das tensões. Em pilares de seção transversal circular, com armadura transversal helicoidal, o efeito de arqueamento ocorre apenas na seção longitudinal. Em qualquer outra situação com geometria diferente, o efeito manifesta-se nas duas seções. O efeito de arqueamento fica mais explícito em pilares de seção transversal quadrada e, principalmente, retangular, causando grande concentração de tensões nos cantos da seção transversal. No caso do reforço, com PRF, de pilares de concreto com este tipo de seção transversal, a eficiência é limitada pela ruptura prematura da camisa de PRF nos pontos onde existe a concentração de tensões, ou seja, nos cantos da seção transversal. Assim, a distribuição da pressão de confinamento na seção de um pilar reforçado é um dos fatores determinantes da eficiência do reforço. Com o intuito de caracterizar experimentalmente a distribuição da pressão de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibra de carbono, foram realizados vinte ensaios em modelos reduzidos, com cinco diferentes formas de seção transversal: circular, quadrada e retangular com os cantos arredondados, elíptica e composta por semicírculos. Os resultados demonstram que, mesmo na ausência de armadura, existe uma grande variação na distribuição da pressão de confinamento.

*Palavras-chave:* Reforço de pilares. Efeito de confinamento. Polímeros reforçados com fibras de carbono.

---

<sup>1</sup> EESC / USP – Escola de Engenharia de São Carlos, Depto de Estruturas, Avenida do Trabalhador Sancarlenense, 400, CEP 13560-000 – São Carlos-SP – Brasil – E-mail: alsudano@sc.usp.br

<sup>2</sup> EESC / USP – Escola de Engenharia de São Carlos, Depto de Estruturas, Avenida do Trabalhador Sancarlenense, 400, CEP 13560-000 – São Carlos-SP – Brasil – E-mail: jbhantai@sc.usp.br

## 1. Introdução

A eficiência<sup>1</sup> do reforço de pilares de concreto depende fortemente da forma da seção transversal do pilar após o reforço. Essa dependência surge em função da distribuição das pressões de confinamento. Ilustram-se na Figura 1 algumas situações de confinamento no caso de pilares de seção transversal circular ou quadrada, sujeitos à compressão axial. Em cada um dos esquemas de seção transversal, as áreas hachuradas correspondem às partes da seção que estão sujeitas a pressões de confinamento dadas pela armadura ou membrana de compósito em seu contorno.

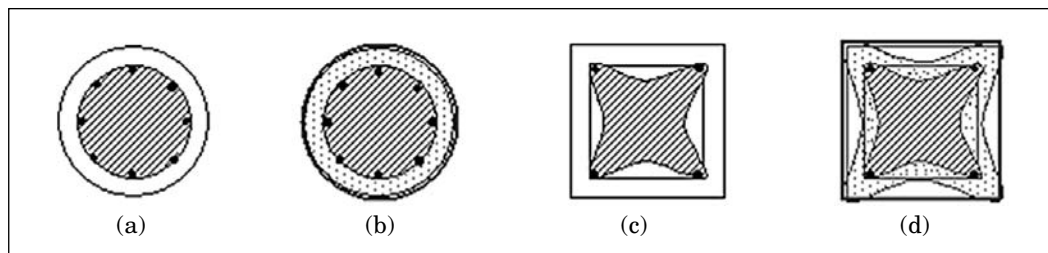


Figura 1: Ilustração de algumas situações de confinamento

- (a) seção circular, núcleo confinado pela armadura transversal em espiral;
- (b) seção circular, núcleo confinado por compósito polimérico aplicado na superfície externa, contando-se ainda com o efeito adicional de confinamento dado pela armadura interna em espiral no núcleo mais interno;
- (c) seção quadrada, núcleo confinado por estribos e armadura longitudinal;
- (d) seção quadrada, núcleo confinado por compósito polimérico aplicado na superfície externa, contando-se ainda com o efeito adicional de confinamento dado pela armadura mais interna de estribos.

No caso de reforço de pilares de seção transversal quadrada ou retangular existe o efeito de arqueamento de tensões, que provoca uma distribuição de pressões de confinamento não uniforme, com concentração nos cantos da seção transversal. Têm-se estudado maneiras de contornar esse problema para proporcionar condições que favoreçam a distribuição da pressão de confinamento. A maior uniformidade nesta distribuição é especialmente interessante no caso do reforço de pilares com polímeros reforçados com fibras (PRF), uma vez que a concentração de tensões em pontos localizados causa a ruptura prematura do compósito, prejudicando, assim, o desempenho do pilar reforçado.

Em pilares de seção transversal circular, a distribuição da pressão de confinamento é uniforme. Assim, quanto mais próxima desta for a seção do pilar a ser reforçado, mais uniforme será a distribuição das pressões de confinamento e, conseqüentemente, maior será a eficiência do reforço. Para quantificar essa proximidade entre a seção do pilar a ser reforçado e a circular, pode-se definir um coeficiente de forma, usado para minorar a pressão de confinamento a ser considerada em pilares de seção diferente da circular, tendo como resultado a pressão efetiva de confinamento para esses pilares. Quanto mais próximo da unidade for o coeficiente de forma, maior será a uniformidade da pressão de confinamento.

A principal alternativa para aproximar o coeficiente de forma da unidade, e conseqüentemente potencializar o efeito de confinamento no reforço de pilares de seção transversal quadrada ou retangular, é a mudança de forma da sua seção transversal. Esta mudança é geralmente feita com o arredondamento dos cantos da seção, diminuindo, assim, a concentração de tensão nestes pontos (Figura 2).

No caso de pilares de seção transversal retangular, o desenvolvimento de pressões de confinamento é particularmente dificultado — nas situações usuais de arranjo da armadura transversal — pela forma mais alongada da seção e pela impossibilidade de os ramos retilíneos dos estribos comuns oferecerem resistência às pressões perpendiculares ao seu eixo. Com isso, o coeficiente de forma fica muito próximo de zero, ou seja, a eficiência do reforço é praticamente nula. Na tentativa de aumentar o coeficiente de forma, e conseqüentemente a eficiência do reforço, pode-se melhorar ainda mais a distribuição da pressão de confinamento. Para isso, podem-se estudar mudanças mais apreciáveis na forma da seção transversal, as quais podem ser, por exemplo, transformar a seção transversal retangular numa elíptica ou em qualquer outra forma geométrica que seja capaz de conduzir a pressões de confinamento mais próximas da uniforme.

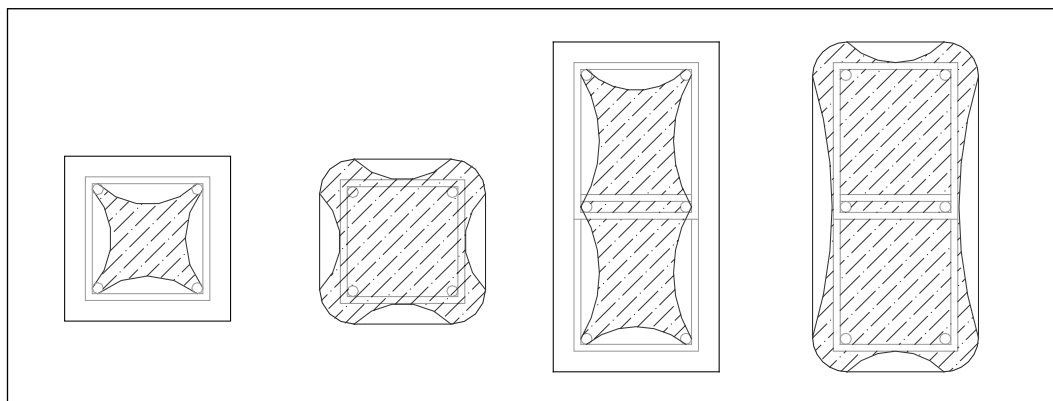


Figura 2: Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com PRF e arredondamento dos cantos

Considerando, em particular, que as formas geométricas circulares e calotas esféricas são as mais adequadas para resistir por tração à pressão interna radial (efeito de membrana), procura-se nesta pesquisa estudar tais formas, além da elíptica, para verificar a sua eficiência na distribuição das pressões de confinamento, avaliada com base no coeficiente de forma. Ilustra-se na Figura 3, na forma de esquemas em perspectiva tridimensional, como poderiam ser as membranas de compósito da camisa de reforço.

Este trabalho é parte de uma pesquisa (Sudano 2005) na qual foram estudados pilares de diversas seções transversais (Figura 4), cujo objetivo maior é o de encontrar maneiras de potencializar ao máximo o efeito de confinamento no reforço de pilares. Apresenta-se aqui a influência da forma da seção transversal na distribuição da pressão de confinamento em pilares reforçados com polímeros reforçados com fibra de carbono.

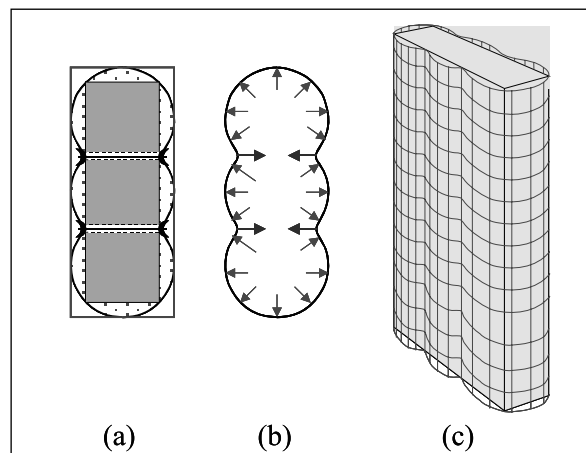


Figura 3: Possíveis esquemas de arranjo de reforço transversal; a) seção transversal esquemática; b) pressões no reforço transversal; c) reforço transversal com curvatura simples;

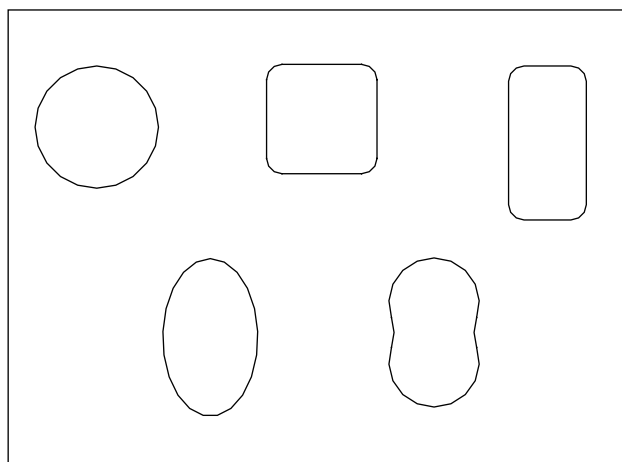


Figura 4: Seções transversais dos pilares estudados.

## 2. Fundamentação teórica

Para a obtenção do coeficiente de forma das várias seções estudadas utilizou-se o modelo apresentado por Teng e Lam (2002), formulado para pilares com seção transversal elíptica e sem armadura, encamisados com PRF. Como a distribuição das pressões de confinamento ao longo de seções transversais elípticas, ao contrário do que acontece com seções circulares, não é uniforme, a eficiência do confinamento é reduzida, se comparada com a que ocorre em pilares de seção transversal circular. Por esse

motivo, a pressão de confinamento utilizada na previsão da tensão axial máxima deve ser substituída por uma pressão de confinamento efetiva, obtendo-se, assim, a seguinte equação:

$$f'_{cc} = f_{c0} + K_1 \cdot f'_l \quad (1)$$

onde  $f'_{cc}$  é a tensão axial de pico,  $f_{c0}$  é a resistência do concreto e  $K_1$  é o coeficiente de efetividade do confinamento. Este coeficiente é estabelecido em função das propriedades da mistura de concreto e da pressão lateral, sendo freqüentemente tomado igual a 4,1, segundo indicações de Richart et al (1928). Ainda na equação 1,  $f'_l$  é a pressão efetiva de confinamento, calculada por

$$f'_l = K_s \cdot f_l \quad (2)$$

onde  $K_s$  é o fator de forma e  $f_l$  é a pressão de confinamento em um pilar de seção transversal circular equivalente. O autor deste modelo afirma que para um pilar elíptico encamisado com PRF (sem contar com estribos), o pilar de seção transversal circular equivalente é considerado como sendo um pilar com a mesma taxa volumétrica de PRF que a utilizada para a seção elíptica. Portanto, a pressão de confinamento equivalente é calculada por

$$f_l = \frac{\rho_{PRF} \cdot f_{PRF}}{2} \quad (3)$$

onde  $f_{PRF}$  é a resistência à tração do PRF e  $\rho_{PRF}$  é taxa volumétrica de PRF.

Para que se possa utilizar um mesmo modelo de cálculo para todos os tipos de seção transversal, pode-se extrapolar a equação (3) para qualquer tipo de seção transversal, além da elíptica; o que se altera é o valor da taxa volumétrica de PRF, que é diferente para cada um dos casos estudados.

Para o cálculo do fator de forma  $K_s$ , Teng e Lam (2002) propõem a seguinte equação, correspondente a pilares de seção transversal elíptica:

$$K_s = 1,06 \cdot \left( \frac{a}{b} \right)^{-2,30} \quad (4)$$

onde  $a$  e  $b$  são os semi-eixos maior e menor, respectivamente, da seção transversal elíptica.

Com isso, a previsão da máxima tensão axial alcançada por pilares de seção transversal elíptica encamisados com PRF pode ser determinada.

### 3. Metodologia e programa experimental

#### 3.1 Metodologia empregada

A metodologia empregada consiste na utilização de resultados experimentais e da formulação apresentada por Teng e Lam (2002) para a obtenção do coeficiente de forma  $K_s$ .

O primeiro passo consiste na obtenção do coeficiente  $K_l$  da equação (1). Para isso são utilizados os valores de  $f'_{cc}$  e  $f'_{co}$ , que são as resistências do pilar reforçado e sem o reforço, respectivamente, relativos ao pilar de seção transversal circular, uma vez que, neste caso,  $K_s=1$ . Portanto:

$$f'_l = f_l = \frac{2.t.f_{PRF}}{D} \quad (2)$$

sendo  $t$  a espessura da camisa de PRF e  $D$  o diâmetro do pilar.

Com a equação (3) calcula-se a pressão lateral para todos os pilares ensaiados. Utilizando-se os resultados dos ensaios dos modelos com e sem o reforço, o valor de  $K_l$  calculado anteriormente, e deixando a pressão lateral efetiva em função de  $K_s$ , calcula-se o coeficiente de forma para cada tipo de seção transversal. com a equação (1).

### 3.2 Programa experimental

O programa experimental consistiu no ensaio por compressão axial com controle de deslocamento de vinte pilares de concreto. Os pilares possuíam as seções transversais apresentadas na Figura 4, tomando-se a seção circular como a ideal em termos de distribuição de pressões laterais. As seções quadradas e retangulares seriam representativas das situações práticas, e a elíptica, uma derivação da seção retangular, com arredondamentos mais radicais. A seção composta, ainda que de aplicação prática mais difícil, representaria uma derivação da seção retangular para outra de dois círculos entrelaçados.

Para minimizar a influência de outros fatores, que não a forma da seção transversal, optou-se pela não-utilização de armadura e pela manutenção aproximada da área de seção transversal e da resistência do concreto, sendo adotada uma dosagem com aproximadamente 40 MPa para todos os pilares. A Tabela 1 apresenta as características geométricas dos pilares ensaiados.

Tabela 1: Características geométricas dos pilares.

| <i>Seção Transversal</i> | <i>Dimensões (cm)</i> | <i>Área (cm<sup>2</sup>)</i> | <i>Altura (cm)</i> | <i>Índice de Esbeltez</i> | <i>A<sub>ef</sub>/A<sub>o</sub></i><br>- | <i>r/l</i><br>- |
|--------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------|---------------------------|------------------------------------------|-----------------|
| <i>Circular</i>          | D = 20                | 314,16                       | 60                 | 12                        | -                                        | -               |
| <i>Quadrada</i>          | 17,9 x 17,9           | 315,05                       | 60                 | 11,79                     | 1,00283                                  | 0,14            |
| <i>Retangular</i>        | 12,6 x 25,2           | 312,15                       | 60                 | em x = 8,37               | 0,9936                                   | 0,20            |
|                          |                       |                              |                    | em y = 16,71              |                                          |                 |
| <i>Elíptica</i>          | a=25,8                | 312,05                       | 60                 | em x = 9,30               | 0,99328                                  | -               |
|                          | b=15,4                |                              |                    | em y = 15,58              |                                          |                 |
| <i>Composta</i>          | a=24,4                | 303,05                       | 60                 | em x = 9,35               | 0,96464                                  | -               |
|                          | b=14,64               |                              |                    | em y = 15,73              |                                          |                 |

A instrumentação dos modelos foi feita utilizando um sistema computadorizado para aquisição dos dados provenientes de transdutores de deslocamento e extensômetros elétricos, além dos dados relativos ao deslocamento vertical do pistão do atuador hidráulico. Foram instalados quatro transdutores de deslocamento, sendo um em cada face dos modelos à meia altura. A distribuição dos extensômetros elétricos de resistência e dos transdutores de deslocamento é apresentada na Figura 5

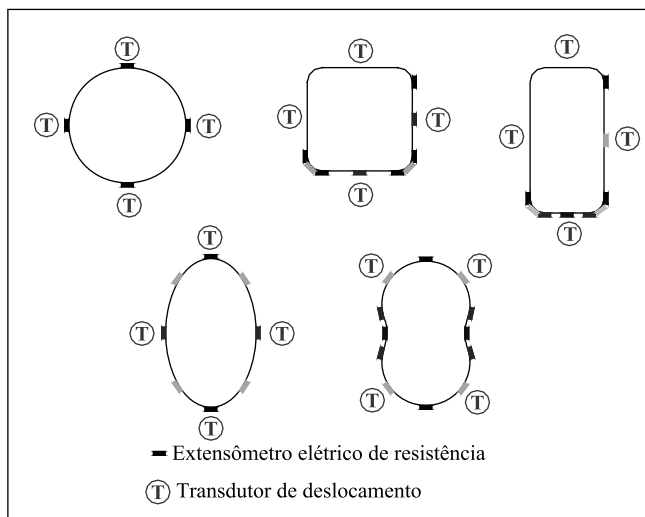


Figura 5: Localização dos extensômetros.

Para a realização dos ensaios para a determinação das propriedades mecânicas de interesse, foram moldadas amostras da camisa de reforço segundo as especificações da ASTM D 3039 (1995). As amostras possuem duas camadas de tecido unidirecional de fibra de carbono e têm comprimento nominal de 24,5 cm e largura nominal de 1,5 cm. A orientação das fibras é de 0° em relação à direção de aplicação da carga. A moldagem das amostras foi realizada com o auxílio de chapas de aço para garantir que os corpos-de-prova fossem perfeitamente planos e sem bolhas de ar entre as camadas. Para evitar a ruptura prematura das extremidades das amostras, por onde estas foram presas pela máquina de ensaio, foram adicionadas quatro camadas a mais, resultando em seis camadas de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) nestes locais. Os ensaios indicaram uma resistência à tração média de 751,9 MPa e módulo de elasticidade de cerca de 31,5 GPa.

O encamisamento dos pilares com PRFC foi feito manualmente, sem tensionamento inicial, com duas camadas de fibra de carbono e com sobreposição das camadas de 10 cm, segundo recomendações do próprio fabricante. Para garantir que o tecido de fibra ficasse perfeitamente em contato com o pilar, sem bolhas de ar, foi utilizado um rolo de aço, semelhante ao de pintura, com sulcos ao longo de seu comprimento para eliminar as possíveis bolhas de ar. A Figura 6 apresenta uma foto dos pilares prontos para serem ensaiados.

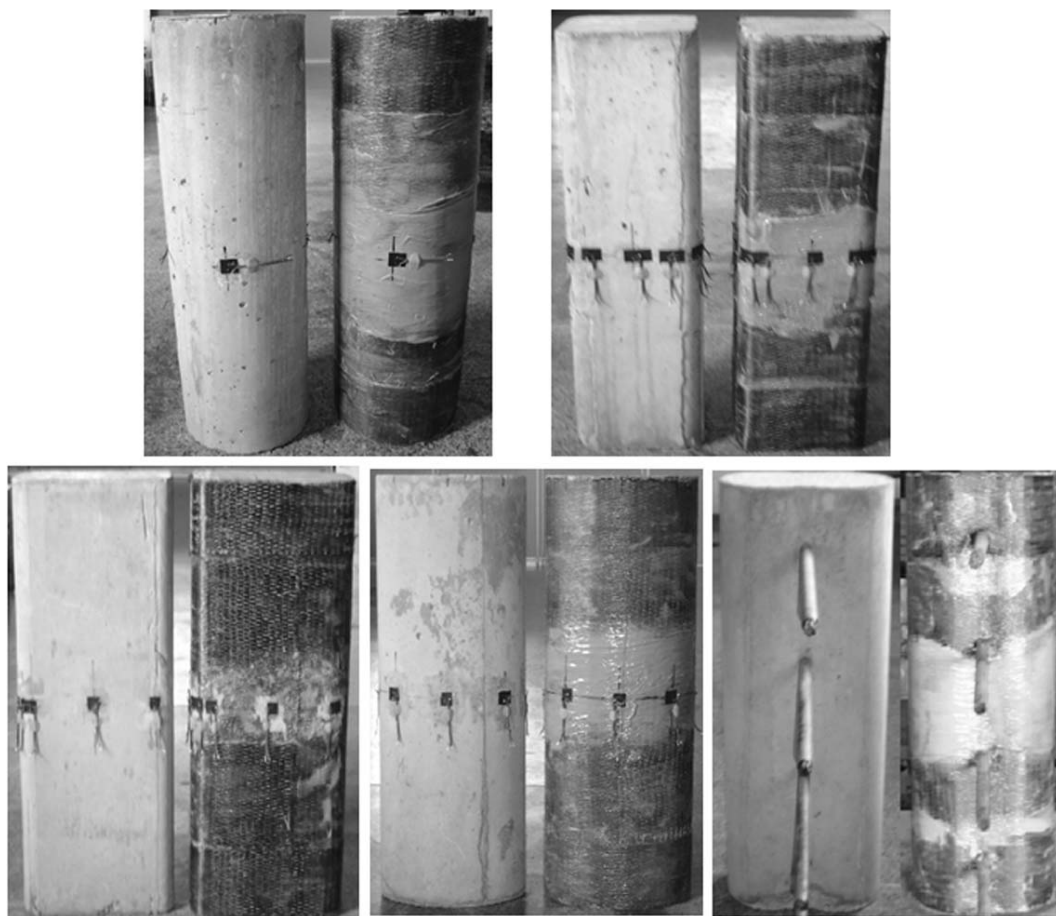


Figura 6: Foto dos modelos prontos para serem ensaiados.

#### 4. Resultados e análises

Seguindo a metodologia apresentada no item anterior, com base nos dados coletados obtém-se um coeficiente  $K_l$  igual a 3,53, ou seja, 16,15% menor que o proposto por Richart et al (1928). Tendo-se o valor do coeficiente  $K_l$ , passa-se à determinação do coeficiente de forma,  $K_s$  dos modelos de seção transversal diferente da circular. Vale ressaltar que  $K_s=1$  para o caso de pilares de seção transversal circular, porque a distribuição das pressões internas, neste caso, é constante. Assim, quanto mais próximo da unidade for este coeficiente, mais próxima da uniforme será a distribuição da pressão interna ao longo de toda a seção transversal do pilar. A Tabela 2 apresenta os valores médios da resistência dos vários tipos de pilares com e sem o reforço, a taxa volumétrica de PRFC, a pressão de confinamento em um pilar de seção transversal circular equivalente e o coeficiente de forma.

Tabela 2: Determinação do coeficiente  $K_s$ .

| Seção transversal | $f_{cc}$<br>(MPa) | $f_{co}$<br>(MPa) | $\rho_{PRF}$<br>(-) | $f_l$<br>(MPa) | $K_s$<br>(-) |
|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------|--------------|
| Circular          | 62,41             | 33,97             | 0,021               | 7,97           | 1,000        |
| Quadrada          | 41,75             | 37,15             | 0,022               | 8,51           | 0,153        |
| Retangular        | 36,11             | 33,70             | 0,024               | 9,10           | 0,075        |
| Elíptica          | 48,29             | 34,23             | 0,022               | 8,39           | 0,470        |
| Composta          | 42,79             | 31,46             | 0,023               | 8,66           | 0,370        |

Para caracterizar a distribuição da pressão de confinamento nos diferentes tipos de seção transversal, pode-se construir um gráfico que mostra a tensão em cada ponto instrumentado de todos os tipos de seção transversal. Como a distribuição da pressão de confinamento no modelo de seção circular é constante, o valor da tensão da camisa deste modelo serve como parâmetro de comparação.

Para a obtenção dos valores da tensão na camisa multiplicou-se o valor da deformação de cada ponto analisado pelo módulo de elasticidade da camisa de PRFC, determinado em ensaios de tração direta ( $E_{PRFC} = 31,5$  GPa, conforme discutido na seção anterior).

A Figura 7 apresenta a evolução da tensão na camisa de reforço nos pontos instrumentados, conforme se aumenta a tensão axial no pilar reforçado. Em todos os gráficos apresenta-se também a curva referente ao pilar de seção transversal circular, já que, neste caso, a distribuição da pressão de confinamento é constante e, portanto, a tensão na camisa de reforço é uniformemente distribuída ao longo do perímetro do pilar reforçado. Percebe-se nesses gráficos que os pilares de seção transversal diferentes da circular apresentam valores da tensão de ruptura na camisa de reforço próximos ao que ocorre no pilar de seção circular, porém o valor da tensão axial de ruptura é bem diferente. Isso ocorre em função da concentração de tensão em determinados pontos da camisa de reforço dos pilares com seção diferente da circular, o que é comprovado pelos próprios gráficos, onde se observam diferentes valores para a tensão na camisa para uma mesma tensão axial aplicada.

Na Figura 8 são apresentados os diagramas da distribuição da tensão na camisa de reforço para a máxima força aplicada no modelo (ou, no caso do modelo de seção quadrada, para 92 % da máxima força, já que a deformação para máxima força e a de ruptura são iguais) e no instante da ruptura, nos vários tipos de seção transversal estudadas, na seguinte seqüência: seção circular, quadrada, retangular, elíptica e composta.

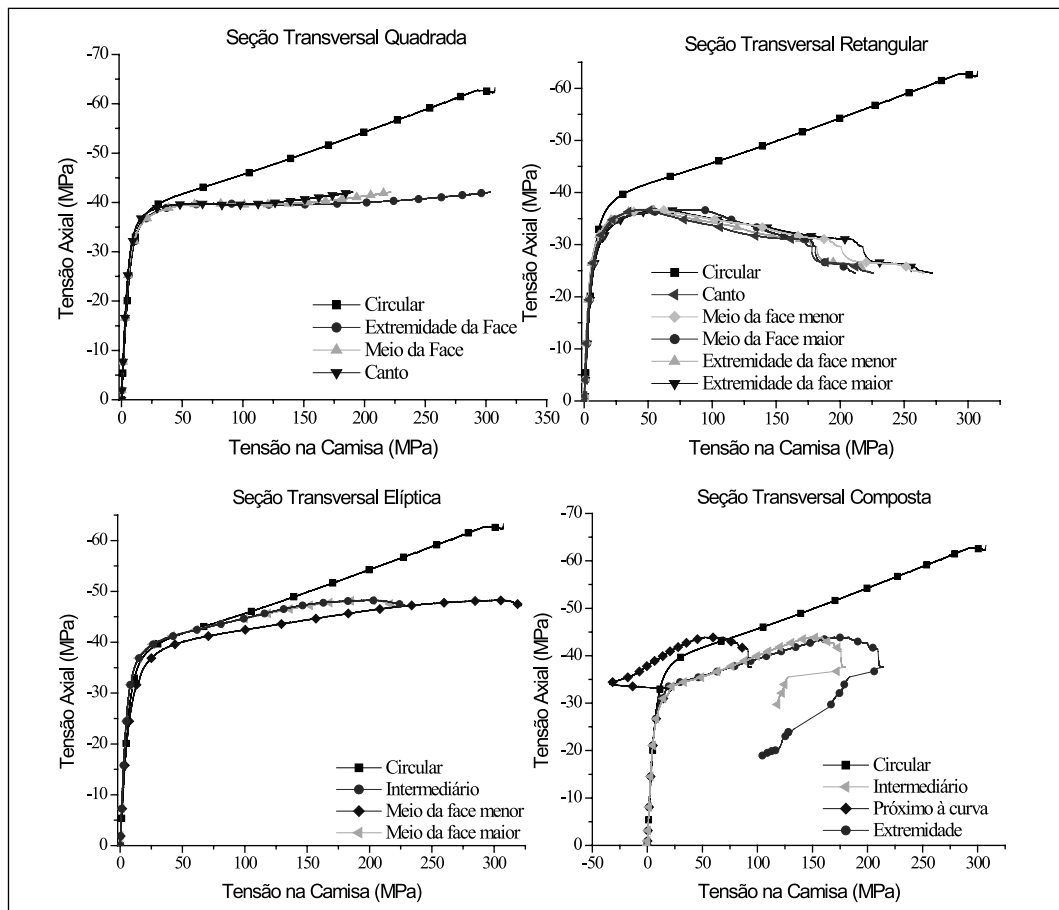


Figura 7: Evolução da tensão na camisa de reforço.

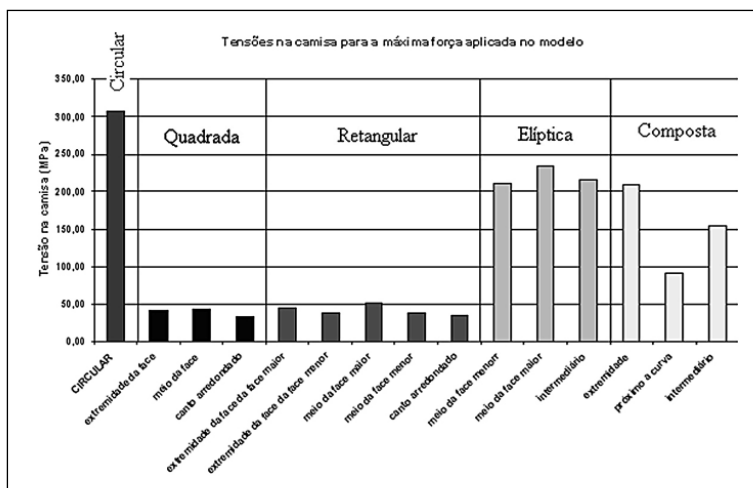


Figura 8: Tensões na camisa para a máxima força aplicada no modelo.

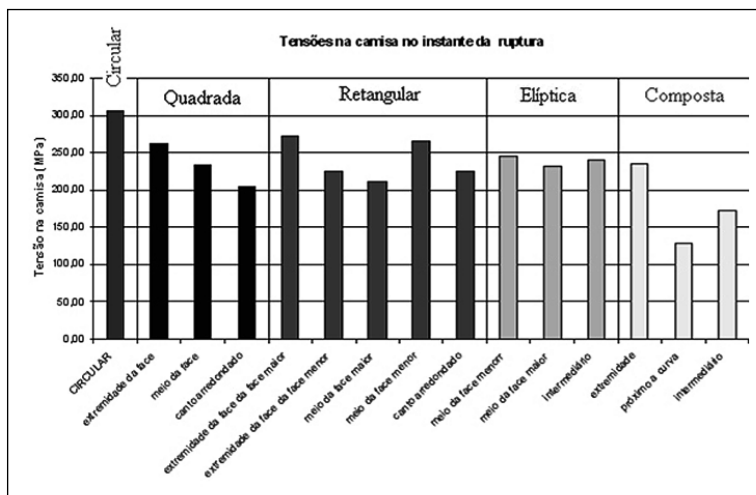


Figura 9: Tensões na camisa no instante da ruptura.

Fica claro que a distribuição da tensão na camisa para a máxima força aplicada no modelo é diferente da distribuição no instante da ruptura, sendo esta última mais próxima da distribuição uniforme (comparável com a que ocorre no modelo de seção circular). Observa-se também que os maiores valores de tensão na camisa de reforço ocorrem, de forma geral, nos pontos onde ocorre a mudança do plano das fibras na camisa de PRFC, nos cantos das seções, por exemplo, o que pode ser um indício da forte influência da flexão da camisa na sua resistência final. Por essa razão, acredita-se que os gráficos gerados não refletem exatamente a distribuição de pressão de confinamento, porque os valores das deformações foram obtidos por extensômetros colados na camisa. Como a camisa sofre o efeito da flexão, os extensômetros também sofrem e registram tal efeito como sendo uma deformação na direção das fibras, quando, na verdade, essa deformação acontece também na direção perpendicular às fibras.

Os resultados obtidos nestes ensaios não estão de acordo com os resultados de Carrazedo (2005), que realizou uma análise numérico-experimental com pilares de seção transversal quadrada e circular e obteve deformações de ruptura na camisa de reforço que variam entre 0,010 e 0,012, o que resulta numa tensão de ruptura entre 705 MPa e 846 MPa ( $E_{PRF}=70,5$  GPa). Sendo a deformação de ruptura da camisa de reforço dos pilares ensaiados neste trabalho muito próxima do intervalo apontado por Carrazedo (2005), credita-se essa diferença nos valores da tensão na camisa ao módulo de elasticidade dos compósitos utilizados, uma vez que o utilizado por Carrazedo (2005) apresenta módulo de elasticidade que é cerca do dobro do módulo do compósito utilizado nesta pesquisa.

Entretanto, pode-se considerar que os gráficos gerados dão indicativos importantes da distribuição da pressão de confinamento, indicando que os pontos de maior tensão na camisa de reforço dos pilares com seções transversais quadrada e retangular são os pontos de extremidade de suas faces, justamente onde foram observadas as rupturas da camisa nestes modelos.

## 5. Conclusões

Os resultados das análises realizadas permitem concluir que a forma da seção transversal tem grande influência na distribuição da pressão de confinamento, porém não foi possível, com as análises realizadas, quantificar com exatidão essa influência.

Tanto os valores do coeficiente de forma quanto os diagramas de distribuição da pressão de confinamento na seção transversal obtidos nesta pesquisa não devem ser assumidos como absolutamente verdadeiros. Para que isso fosse possível, seriam necessárias análises teóricas mais aprofundadas, inclusive com simulações numéricas. Porém, esses resultados se apresentam como bons indicativos da real influência da forma da seção transversal na distribuição da pressão de confinamento e, portanto, da eficiência do reforço de pilares de concreto com PRFC.

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo financiamento deste trabalho.

## Nota

- <sup>1</sup> Entenda-se eficiência como sendo o aumento na capacidade portante e na ductilidade do pilar após o reforço.

## Referências

- SUDANO, A. L. (2005). Influência da forma da seção transversal no confinamento de pilares de concreto armado encamisados com PRFC (polímero reforçado com fibra de carbono). Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- TENG, J.G.; LAM, L. (2002). Compressive behavior of carbon fiber reinforced polymer-confined concrete in elliptical columns. *Journal of Structural Engineering*, New York, v.128, n.12, p.1535-1543. Dec.
- RICHART, F.E.; BRANTZAE, A.; PROHN, R.L. (1928). A study of the failure of concrete under combined compressive stress. Urbana: Engineering Experimental Station, University of Illinois. (Bulletin n.190).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995). *D3039 / D3039M-95*: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. Philadelphia.
- CARRAZEDO, R. Mecanismos de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibras submetidos à flexo-compressão. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.

# Distribution of confinement pressure in concrete columns jacketed with carbon fiber reinforced polymers

## Abstract

The confinement effect is the basis for concrete column strengthening, either by fiber reinforced polymer (FRP) or high strength concrete jacketing. Such effect is strongly influenced by the resulting column's cross-section shape after the strengthening. This influence derives from that confinement pressure acts according to an arch effect. In circular cross section columns with helicoidal transversal reinforcement, the arch effect occurs only in the longitudinal direction. In any other situation, the arching effect occurs in two directions. The arch effect is more explicit in square and rectangular cross section columns and it causes significant stress concentration at the corners. When strengthening square and rectangular section columns with FRP, the efficiency is limited by an early rupture of the FRP jacket at the corners of the cross-section. Thus, the confinement pressure distribution on the cross section is one of the most important factors on the strengthening efficiency. To experimentally characterize the distribution of confinement pressure in concrete columns jacketed with FRP, 20 reduced models were tested with five different cross-section shapes: circular, square and rectangular with rounded corners, elliptical and one composed by semicircles. The results show that, even in the absence of steel reinforcement, there is a significant variation in the distribution of the confinement pressure.

*Keywords:* Strengthening. RC column. Confinement effect. Carbon fiber reinforced polymer (CFRP).

## Introduction

The efficiency of strengthening jackets in concrete columns strongly depends on the shape of the resulting cross-section after strengthening. This dependence appears due to variations on the confinement pressure distribution. Figure 1 illustrates some confinement situations in circular or square cross-section columns submitted to axial compression. In each cross section, the filled areas correspond to regions submitted to confinement pressures due to internal reinforcement or external FRP jackets.

It can be seen that stress distribution is distinct for different cross-sections. The strengthening efficiency depends upon this distribution, therefore depends on the cross-section

shape. This paper is part of a research (Sudano 2005) in which columns with different cross-sections (Figure 3) were studied. The paper discusses the influence of the cross-section shape in the confinement pressure distribution in columns strengthened with FRP.

## Experimental program

The analysis is based on experimental test results and on the method presented by Teng and Lam (2002), which can be applied to determine the shape coefficient  $K_s$ . The first step is the finding  $K_l$  coefficient of equation (1). Next step values of  $f_{cc}$  and  $f_{c0}$ , which are the axial resistance of concrete before and after strengthening, respectively, are found. These values are relative to a column with a circular cross-section. In this case,  $K_s=1$  and, therefore, equation (5) is valid.

With equation (3) it is possible to calculate the lateral pressure of all tested columns. Using the experimental test results, performed on columns with and without jackets, the value of  $K_l$  is previously calculated. Placing the effective lateral pressure in function of  $K_s$ , the shape coefficient for each cross-section can be found by equation (1).

The experimental program consisted of 20 tests of concrete columns. All of them were tested on axial compression in the displacement control mode. To reduce the number of variables, no steel reinforcement was used and the same cross-section area and concrete strength was maintained as constant as possible, with a concrete compressive strength close to 40 MPa, for all columns. Table 1 presents the geometric characteristics of the columns. Figura 5 presents the instrumentation used in the tests, while Figura 6 shows a view of the columns ready to be tested.

## Results and analyses

According to the analysis method presented in the previous section,  $K_l$  coefficient was calculated as equal to 3.53, a value 16.15% lesser than the one proposed by Richart *et al* (1928). With this value of  $K_l$  the shape coefficient  $K_s$  was found for each column with cross-sections different from circular. It must be remembered that  $K_s=1$  represents the case of circular cross-section columns, where the distribution of the confining pressure is constant. Thus, as closer to 1.0 is the coefficient, as nearer to uniform will be the distribution of the confining pressure throughout the cross-section of the column. Table 2 presents the average values of the strength of columns with and without jackets, the volumetric ratio of CFRP, the confinement pressure in an equivalent circular cross-section column, and the shape coefficient.

Figure 7 presents the evolution of the stress in the strengthening jacket, on the measured points, as axial load is increased. In all graphs, the curve of the circular cross-section column is also presented. It can be seen in this figure that columns with non-circular cross-sections present stress values on the jacket at the failure close to

those observed in circular sections. However, the values of axial stresses at failure are very different. This occurs due to stress concentration in some points of the jacket of these columns, what it is confirmed by the same graphs, where different values of stresses on the jacket for a same axial load can be observed.

To characterize the confining pressure distribution for different cross-sections, a graph was constructed to show stress values in each measurement point. Since the confining pressure distribution in the circular column is constant, this value is used as reference for comparison. To obtain the stress values in the jacket, the strain values on each analyzed point were multiplied by the CFRP modulus of elasticity, which was determined in the direct tension tests. Figures 8 and 9 show these graphs when the applied load was maximum and on failure, respectively.

## Conclusions

The analysis results lead to the conclusion that the shape of the cross-section has strong influence on the distribution of confinement pressure. However, it was not possible to quantify exactly this influence. The shape coefficient value and the diagrams of the confinement pressure distribution for each cross-section type should not be assumed as definitive, because possible bending effects of CFRP jacket may cause variations in the results. To improve the analysis, it would be interesting to carry out numerical simulations. Nonetheless, the results presented in this paper serve as good indications about the influence of the cross-section shape on distribution of confinement pressure and, therefore, about the efficiency of the CFRP strengthening method.

