

Design parameters for reinforced concrete columns strengthening with CFRP

Parâmetros de projeto para reforço de pilares de concreto armado com PRFC



A. O. RIGAZZO^a
rigazzo@fec.unicamp.br

A. L. MORENO JR.^b
almoreno@fec.unicamp.br

Abstract

This work deals with the behavior of reinforced concrete columns externally wrapped with carbon fiber composites. The technique of strengthening was experimentally evaluated analyzing eight reinforced concrete columns with distinct strengthening arrangements. The design parameters studied were the strengthening rate, the spacing between straps and the column cross section. Confinement models were considered based on experimental results. The increases of strength were analyzed based on the columns longitudinal strain.

Keywords: Strengthening; Confinement; Wrapping; Columns; Reinforced Concrete; Carbon Fibers.

Resumo

Este trabalho aborda o comportamento de pilares de concreto armado reforçados, por cintamento externo, com compósitos de fibras de carbono (PRFC). A técnica de reforço em questão foi avaliada pela análise experimental de oito pilares de concreto armado com distintos arranjos de reforço. Os parâmetros de projeto estudados foram a taxa de reforço, o espaçamento entre laços de cintamento e a seção transversal do pilar. Modelos para o confinamento do concreto foram avaliados com base nos resultados experimentais. Os incrementos de resistência foram analisados em função da deformação longitudinal dos pilares.

Palavras-chave: Reforço, confinamento, cintamento, pilares, concreto armado, fibras de carbono.

^a College of Civil Engineering, Department Structural Engineering, Universidade Estadual de Campinas, rigazzo@fec.unicamp.br, Cidade Universitária Zeferino Vaz – CEP 13083-852, Campinas, Brasil;

^b College of Civil Engineering, Department Structural Engineering, Universidade Estadual de Campinas, almoreno@fec.unicamp.br, Cidade Universitária Zeferino Vaz – CEP 13083-852, Campinas, Brasil.

1 Introdução

Existem várias técnicas de reparo ou reforço em elementos estruturais de concreto armado. Dentre essas técnicas destacam-se a utilização de argamassa, concreto ou "grout" para a recomposição ou aumento da peça estrutural, a utilização de armaduras de complementação ou reforço e a adição de chapas e perfis metálicos ao elemento estrutural.

Neste trabalho foi estudada uma técnica de reforço em peças estruturais que se baseia na adição de polímeros reforçados com fibras (PRF) à estrutura. Essa técnica teve seu início em meados do século XX com RUBINSKY e RUBINSKY [2] e experimentou um grande desenvolvimento após a ocorrência do sismo de Kobe (Japão) em 1995.

Muitos pesquisadores têm se dedicado ao estudo do reforço de estruturas de concreto com PRF. No caso particular do uso de compósitos de fibras de carbono no reforço de pilares pode-se citar os trabalhos de SAADATMANESH et al [7], que estudaram pilares circulares e retangulares reforçados com laços PRF, MIRMIRAN e SHAHAWY [5] e SAMAAAN et al [8], que discutiram modelos para concreto confinado com compósitos de fibras e TOUTANJI [10], que desenvolveu um trabalho experimental com cilindros de concreto encamisados com PRFC e estudou o confinamento do concreto com esse tipo de compósito.

No Brasil alguns trabalhos sobre o reforço de pilares de concreto com PRFC foram realizados. CARRAZEDO [3] analisou os mecanismos de confinamento do concreto e suas implicações no reforço de pilares encamisados com PRFC e SILVA [9] estudou o comportamento de pilares curtos confinados com compósitos de fibras de vidro e carbono.

Neste trabalho, serão discutidos e analisados alguns parâmetros que influenciam o projeto desse tipo de reforço, bem como dois modelos para concreto confinado com PRF. Para isso serão tomados por base os resultados experi-

mentais obtidos por um dos autores do artigo em sua dissertação de mestrado (RIGAZZO [6]), na qual estudou-se o comportamento de pilares de concreto armado, circulares e quadrados, reforçados com PRFC.

2 Modelos para o confinamento o concreto com PRF

Neste item são apresentados dois modelos para concreto confinado com compósitos PRF. Esses modelos foram utilizados neste trabalho na análise dos resultados experimentais.

2.1 Modelo de SAMAAAN et al (8)

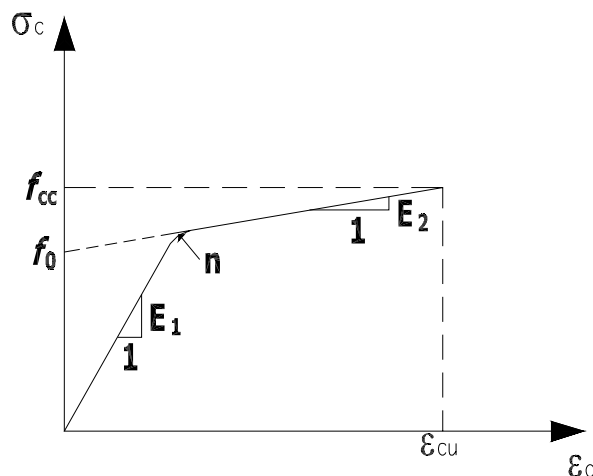
SAMAAAN et al [8] apresentaram um modelo para concreto confinado com compósitos de fibras. Trata-se de um modelo baseado em um comportamento tensão-deformação bi-linear. Esse modelo foi desenvolvido para tubos de PRF com núcleo de concreto, no entanto foi utilizado para avaliar o comportamento dos pilares reforçados com laços de fibra de carbono, tema deste trabalho.

O comportamento bi-linear para o concreto confinado é definido pela equação a seguir:

$$\sigma_c = \frac{(E_1 - E_2)\epsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2)\epsilon_c}{f_0}\right)^n\right]^{1/n}} + E_2\epsilon_c \quad (1)$$

Onde ϵ_c e σ_c são a deformação e a tensão no concreto, respectivamente; E_1 e E_2 são a primeira e o segunda inclinações, respectivamente; f_0 é a tensão plástica de referência no ponto de intersecção da segunda inclinação com

Figura 1 - Diagrama tensão-deformação bi-linear



o eixo das tensões e n é um parâmetro de forma curva que controla principalmente a curvatura na zona de transição. A resistência do concreto confinado (f_c) é dada, em função da resistência do concreto não confinado (f_c), pela equação que se segue.

$$f_{cc} = f_c + 6,0 f_l^{0,7} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

Onde f_l é a pressão lateral proveniente do compósito PRF, definida como:

$$f_l = \frac{2 f_f t_f}{D} \quad (3)$$

f_f é a resistência à tração do compósito e t_f é a espessura do mesmo. D é o diâmetro do pilar.

2.2 Modelo de MIYAUCHI et al (4)

Os autores definiram duas expressões para avaliar o comportamento tensão-deformação do concreto confinado com PRF. Essas expressões dependem do parâmetro ϵ_{tan} , definido como se segue:

$$\epsilon_{tan} = \epsilon_{co} - \frac{\lambda \epsilon_{co}^2}{2 f_c} \quad (4)$$

Assim, o comportamento tensão-deformação foi dividido em dois intervalos, que dependem de ϵ_{tan} .

$$\sigma_c = f_c \left[2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right] p / 0 [\epsilon_c] [\epsilon_{tan}] \quad (5)$$

$$\sigma_c = f_{cc} - \lambda (\epsilon_{cc} - \epsilon_c) p / \epsilon_{tan} [\epsilon_c] [\epsilon_{cc}] \quad (6)$$

Onde:

$$\lambda = \frac{1}{\epsilon_{co}} \left[2 f_c (\epsilon_{cc} - \epsilon_{co}) + \sqrt{4 f_c^2 (\epsilon_{cc}^2 - 2 f_c \epsilon_{co} \epsilon_{cc} + f_{cc}^2)} \right] \quad (7)$$

Para resistência do concreto confinado os autores propuseram a seguinte expressão, na qual o coeficiente de eficiência k_e é definido como 0,85.

$$\frac{f_{cc}}{f_c} = 1 + 4,1 k_e \left(\frac{2 f_f t_f}{f_c D} \right) \quad (8)$$

3 Programa Experimental

Visando investigar o comportamento de pilares de concreto armado cintados com PRFC, RIGAZZO [6] ensaiou cinco pilares de seção transversal circular (PCT, PC01S'0, PC02S'5, PC03S'10 e PC04S'0) e três pilares com seção transversal quadrada (PQT, PQ01S'0 e PQ02S'5). A tabela 1 resume as características dos pilares analisados.

O diâmetro adotado para os pilares circulares foi de 20cm e, com o intuito de se manter a mesma área da seção transversal, o lado adotado para os pilares quadrados foi de 17,5cm. Além disso, todos os pilares foram confeccionados com 160cm de comprimento, resultando em um índice de esbeltez de aproximadamente 32.

Para todos esses pilares a resistência a compressão do concreto não confinado foi de aproximadamente 15,5MPa. Além disso, todos receberam idênticas armaduras longitudinais e transversais de aço, 8 ϕ 10mm e ϕ 5mm a cada 10cm, respectivamente. A tensão de escoamento apurada para o aço da armadura longitudinal foi de 539MPa, enquanto que para o aço da armadura transversal foi obtida uma tensão de escoamento de 616MPa.

Com relação ao compósito PRFC utilizado nos ensaios, a resistência à tração média do mesmo foi de 3731MPa e o módulo de elasticidade de 293GPa.

Cada pilar foi instrumentado com seis extensômetros mecânicos, quatro para estimar as deformações longitudinais e dois para medir os deslocamentos horizontais da região central.

Para se estimar a deformação longitudinal, os extensômetros mecânicos foram posicionados de modo que suas agulhas encostassem em cantoneiras fixadas próximas as extremidades dos pilares, permitindo, assim, medir o deslocamento entre esses dois pontos. De posse do deslocamento e conhecendo-se a distancia inicial entre as cantoneiras foi possível determinar a deformação longitudinal do pilar.

Figura 2 – Extensômetros mecânicos comparadores

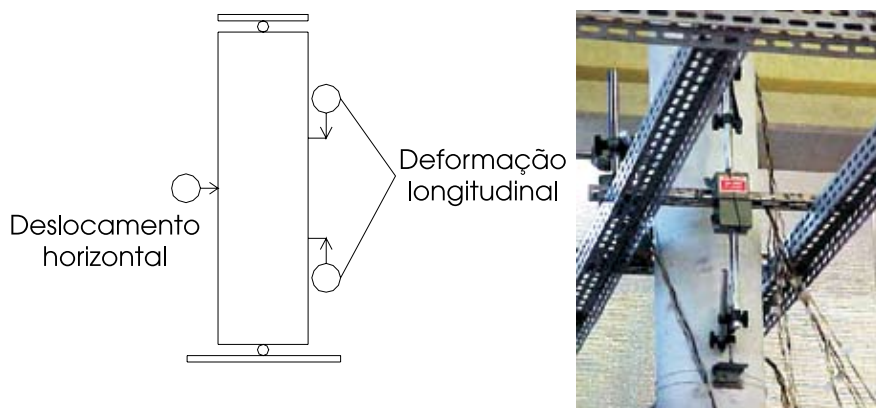


Tabela 1 – Arranjos de reforço dos pilares

Pilar	Número de camadas do compósito PRFC	Espaçamento entre laços (S' em cm)
PCT	-	-
PC01S'0	1	0 (*)
PC02S'5	2	5
PC03S'10	3	10
PC04S'0	4	0
PQT	-	-
PQ01S'0	1	0
PQ02S'5	2	5

(*) indica que o pilar foi todo revestido com PRFC

Para os pilares PCT, PC01S'0, PC02S'5, PC04S'0, PQT, PQ01S'0 e PQ02S'5 a instrumentação das armaduras seguiu o esquema da figura 3, no qual a letra "L" representa os extensômetros colados na armadura longitudinal e a letra "T" representa os extensômetros colados na armadura transversal.

Para o pilar PC03S'10, a instrumentação das armaduras seguiu o esquema representado na figura 4.

No caso das fibras de carbono, foram colados extensômetros na camisa ou nos cintos PRFC na mesma posição dos extensômetros colados nos estribos.

Os ensaios foram realizados em equipamento com capacidade de carga de 5000KN, sendo que a aplicação do carregamento seguiu um incremento de carga de 50KN para os pilares sem reforço e 100KN para os reforçados.

4 Resultados e Discussões

Neste item serão apresentados resultados e conclusões

obtidos através do trabalho experimental de RIGAZZO [6], sobre o aumento da capacidade portante de pilares reforçados com PRFC, sobre os modelos para concreto confinado apresentados no item 2 e sobre alguns parâmetros de projeto que influenciam o dimensionamento desse tipo de reforço.

4.1 Aumento da capacidade portante

A tabela 2 apresenta a carga experimental, correspondente a uma deformação longitudinal dos pilares de 0,2%, valor normalmente tomado como limite último para o concreto na compressão simples, e a carga experimental obtida no momento do colapso dos pilares ensaiados.

Através da tabela 2 é possível notar que para um encurtamento de 0,2% a maioria dos pilares reforçados com PRFC não apresenta aumento significativo da capacidade portante. Por outro lado, é possível perceber que, antes

Figura 3 - Instrumentação das armaduras

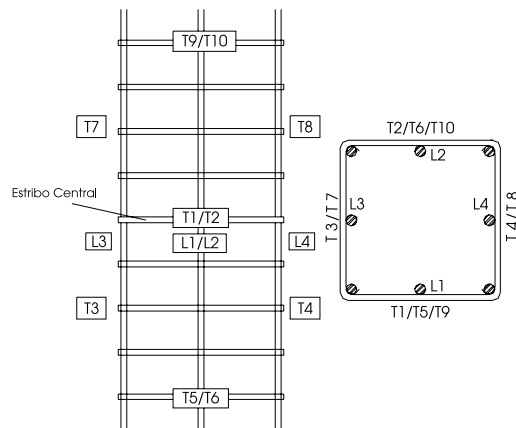
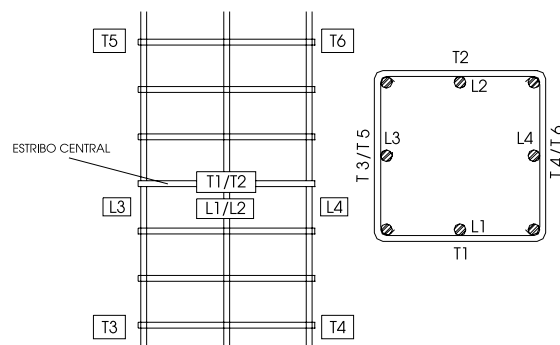


Figura 4 - Instrumentação das armaduras PC03S'10



do colapso, os pilares reforçados atingem uma deformação longitudinal muito maior que 0,2%. Isto significa que considerar um encurtamento último em torno de 0,2% para o concreto confinado com PRFC pode ser conservador. Da mesma forma, não é possível, em termos de projeto, adotar deformações da ordem de 0,8 a 1,0%. Assim sendo, para o projeto adequado desse tipo de reforço, é necessário adotar um limite de deformação longitudinal que não seja muito conservador, mas que também se encontre dentro de valores de comportamento para uma estrutura real.

Admitindo-se, por exemplo, uma deformação longitudinal de 0,3%, que é um valor aceitável em termos de projeto, chega-se aos aumentos da capacidade portante dos pilares, descritos na tabela 3, através dos quais é possível perceber a necessidade de se levar em conta a deformação longitudinal para avaliar adequadamente o aumento da capacidade portante produzido pelo reforço e também para dimensionar pilares de concreto armado reforçados com PRF.

4.2 Análise dos modelos para concreto confinado com PRF

A tabela 4 apresenta uma comparação entre a resistência e a deformação longitudinal do concreto confinado obtidas experimentalmente no colapso do pilar PC01S'0 e a resistência e a deformação obtidas, para o mesmo pilar, através dos modelos analíticos de confinamento.

O modelo de SAAMAN et al [8] forneceu uma resistência 7,3% maior que a determinada experimentalmente e uma deformação longitudinal quase duas vezes maior que a experimental. Esse modelo foi desenvolvido empiricamente para tubos de PRF com núcleo de concreto, nos quais o compósito apresenta uma espessura muito maior que a do compósito utilizado no reforço do pilar em questão. Isso pode ter contribuído para os erros nas previsões do modelo.

O modelo de MYIAUCHI et al [4] apresentou um resultado mais próximo para a resistência do concreto confinado, cometendo um erro de 4,5%. Entretanto, o erro apresentado

Tabela 2 – Cargas experimentais e deformação

Pilar	Estado limite último para o concreto não confinado ($E_c = 2^0/_{00}$)	Colapso do Pilar	Deformação no colapso ($^0/_{00}$)	Modo de Colapso dos Pilares Reforçados
Nome	Carga (kN)	Carga (kN)	--	--
PCT	739,7	809,7	3,4	--
PC01S'0	847,4 (+14,6%)	1294,9 (+59,9%)	9,5	Ruptura do compósito
PC02S'5	786,3 (+6,3%)	1291,4 (+59,5%)	12,2	Ruptura do compósito
PC03S'10	743,8 (+0,55%)	1065,7 (+31,6%)	11,9	Ruptura do concreto entre laços PRFC
PC04S'0	854,6 (+15,5%)	1672,5 (+106,6%)	14,4	Ruptura do concreto
PQT	722,3	786,3	3,1	--
PQ01S'0	743,8 (+3,0%)	1000,0 (+27,2%)	14,6	Ruptura do compósito
PQ02S'5	723,5 (0,17%)	900,0 (+14,5)	8,5	Ruptura do concreto entre laços PRFC

Tabela 3 – Carga experimental para deformação longitudinal de 0,3%

Pilar	Carga Experimental para deformação de 0,3% (kN)
PCT	801,9
PC01S'0	928,5 (+15,8%)
PC02S'5	925,2 (+14,4%)
PC03S'10	840,8 (+4,9%)
PC04S'0	955,7 (+19,2%)
PQT	786,3
PQ01S'0	847,4 (+5,7%)
PQ02S'5	796,5 (+1,3%)

para a deformação longitudinal foi bastante acentuado. Na tabela 5 é feita uma nova comparação entre os dados experimentais e os dados fornecidos pelos modelos analíticos, considerando-se agora uma deformação longitudinal de 0,2%. Essa nova comparação visa avaliar os modelos na previsão da resistência do concreto confinado para uma deformação longitudinal aceitável num projeto desse tipo de reforço. Os novos resultados mostram que os dois modelos forneceram resultados satisfatórios para a resistência à compressão calculada para uma deformação longitudinal de

0,2%. Vale ressaltar, inclusive, que as previsões fornecidas por esses dois modelos passaram a ser a favor da segurança nessa nova situação.

4.3 Influência da geometria da seção transversal

A ACI-440 [1] recomenda uma diminuição de 50% na resistência do concreto confinado para um pilar quadrado comparado a um pilar circular equivalente.

Figura 5 - Diagramas tensão-deformação: Experimental x teórico (bi-linear)

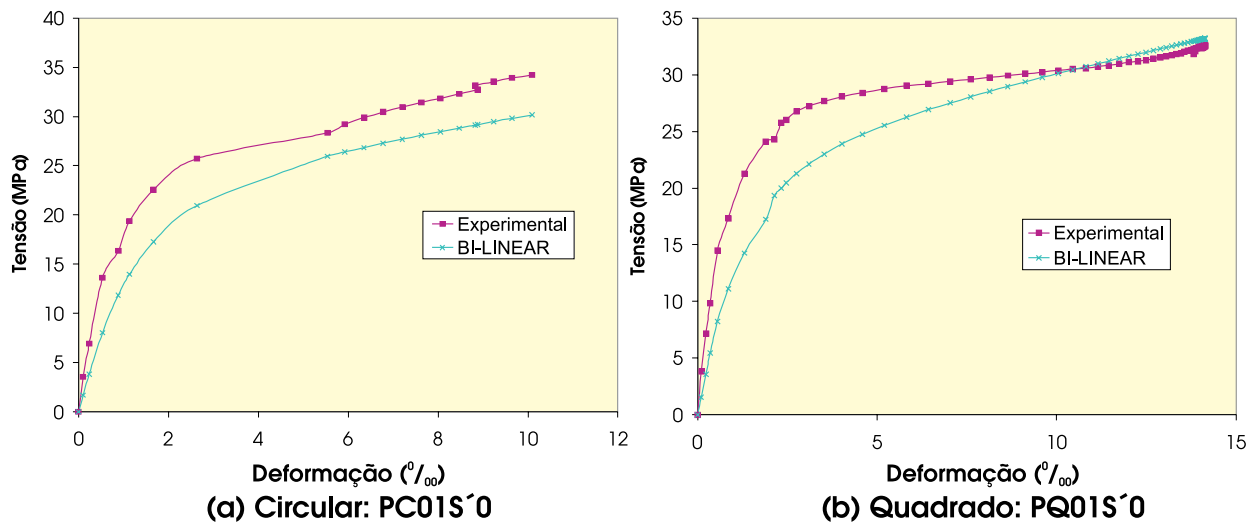


Tabela 4 - Comparação entre resultados experimentais e teóricos - Colapso PC01S'0

Resultado	f_{cc} (MPa)	$\frac{f_{cc}}{f_{cc,exp}}$	e_{cc} (‰)	$\frac{e_{cc}}{e_{cc,exp}}$
Experimental	31,71	--	9,5	--
SAAMAN et al	34,03	1,073	18,2	1,916
MIYAUCHI et al	33,15	1,045	16,2	1,705

Tabela 5 - Resultados experimentais e teóricos - deformação 0,2% - Pc01S'0

Resultado	f_{cc} (MPa)	$\frac{f_{cc}}{f_{cc,exp}}$
Experimental	19,12	—
SAAMAN et al	16,78	0,878
MIYAUCHI et al	15,05	0,787

Visando avaliar a validade desta recomendação RIGAZZO [6] ensaiou pilares circulares e quadrados com mesma área da seção transversal e mesmas características de reforço.

Os experimentos mostraram que a eficiência do confinamento com PRF em pilares quadrados é muito menor que a verificada para pilares circulares equivalentes.

A tabela 6 oferece uma comparação entre as resistências do concreto confinado obtidas para os pila-

res quadrados e seus respectivos pilares circulares equivalentes.

Através dos resultados apresentados na tabela, é possível afirmar que para os pilares ensaiados na pesquisa em questão a recomendação da ACI 440 [1] se confirmou. Vale ressaltar, no entanto, a necessidade de um maior número de análises experimentais para que se possa garantir a adequação da recomendação da ACI 440 [1].

Tabela 6 – Comparação entre pilares circulares e quadrados

PQ01S'0	PC01S'0	f_{cc} do pilar quadrado/ f_{cc} do pilar circular
f_{cc} (MPa)	f_{cc} (MPa)	
19,26	31,71	0,61
PQ02S'5	PC02S'5	f_{cc} do pilar quadrado/ f_{cc} do pilar circular
f_{cc} (MPa)	f_{cc} (MPa)	
14,98	30,93	0,48

Figura 6 – Detalhe da ruptura - PC01S'0



4.4 Influência do uso de laços PRFC

Alguns autores têm sugerido um coeficiente de eficácia do confinamento para avaliar a influência do espaçamento entre laços de cintamento na eficiência do reforço com PRF. Esse coeficiente é dado pela razão entre a área do núcleo de concreto efetivamente confinado e a área líquida de concreto e é aplicado sobre a pressão de confinamento lateral. Esse expediente foi utilizado na análise dos resultados para pilares reforçados com laços PRF ensaiados por RIGAZZO [6]. Os resultados mostraram que para valores de espaçamento menores que 1/4 do diâmetro ou lado do pilar a utilização do coeficiente de eficácia mostra-se adequada. Entretanto, para valores maiores de espaçamento, a eficiência do reforço é seriamente afetada e a utilização do coeficiente de eficácia não representa adequadamente os resultados experimentais.

De qualquer forma, fazem-se necessários outros trabalhos experimentais que permitam dizer se as relações S'/D e S'/L podem ser um parâmetro adequado para se limitar o espaçamento entre laços a valores que não comprometam a eficiência do reforço com PRFC. É necessário, por exemplo, verificar o que acontece com essas relações para outras resistências do concreto não confinado.

4.5 Influência da Taxa de Reforço

Uma vez conhecido o diâmetro do pilar e a resistência do compósito PRF é possível adotar uma pressão lateral de confinamento e determinar a espessura do compósito necessária para aquela pressão lateral.

Assim sendo, um bom parâmetro para se avaliar a taxa de reforço com PRF é a relação f_l/f_c , que segundo alguns pesquisadores deve se encontrar na faixa de 0,1 a 0,6.

Figura 7 - Ruptura do concreto entre os laços



Abaixo do limite inferior de 0,1 a eficiência do confinamento seria desprezível e acima do limite superior de 0,6 ocorreria desperdício de material, uma vez que não se conseguiria incrementar a resistência do concreto mesmo utilizando-se uma taxa de reforço maior.

A análise realizada para o pilar PC04S'0 aponta para a adequação do limite superior de 0,6.

No que se refere ao limite inferior, são necessárias algumas análises que permitam verificar a adequação do valor de 0,1. Para o pilar PC03S'10, a pressão lateral de confinamento calculada através dos resultados experimentais é de 1,66 MPa, o que representa uma relação f_l/f_c de aproximadamente 0,11.

Considerando-se que para esse pilar não houve incremento de resistência devido o confinamento do concreto para

uma deformação de 0,2%, pode-se dizer que é recomendável trabalhar com um limite inferior maior.

Para o pilar PC02S'5, por exemplo, a resistência do concreto confinado para uma deformação de 0,2% foi 10,1% maior que a resistência obtida para o pilar testemunho. A relação experimental f_l/f_c para o pilar PC02S'5 é de aproximadamente 0,3. Pode-se afirmar, portanto, que é conveniente um limite inferior dessa ordem de grandeza.

5 Conclusões

Este artigo permite as seguintes conclusões:

- **Aumento da Capacidade Portante:** Para uma adequada avaliação do aumento da capacidade portante de pilares reforçados com PRF é necessário levar-se em conta

Figura 8 - Ruptura laço PRFC - PC02S'5



a deformação longitudinal do pilar. Isso ocorre, pois, na situação de colapso desses elementos estruturais as deformações longitudinais atingem valores inaceitáveis para uma estrutura real.

• **Forma da seção transversal:** os resultados indicaram uma adequação da recomendação da ACI-440 [1], que estima que a resistência do concreto confinado em pilares quadrados é 50% menor que a resistência para pilares circulares equivalentes.

• **Reforço com laços PRF:** os resultados evidenciaram a necessidade de mais estudos sobre essa questão. Vale destacar que, dependendo do espaçamento adotado, a eficiência do confinamento pode ser totalmente comprometida.

• **Modelos para concreto confinado com PRF:** não se pode eleger um modelo que represente adequadamente todos os casos, embora os modelos de SAMMAN et al [8] e MIYAUCHI et al [4] tenham se mostrado adequados em várias situações.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento deste trabalho e à empresa REAX/FOSROC pelo fornecimento do compósito de fibra de carbono.

7 Referências bibliográficas

- [01] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440(2000) – “Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”. ACI, USA, 2000.
- [02] RUBINSKY, I.; RUBINSKY, A. “An Investigation on the Use of Fiber Glass for Pretressed Concrete”. Magazine of Concrete Research. Janeiro, 1954.
- [03] CARRAZEDO, R. “Mecanismos de Confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósitos de fibras de carbono”. São Carlos, 2002. 171p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [04] MIYAUCHI, K.; NISHIBAYASHI, S. e INOUE, S. “Estimation of Strengthening effects with Carbon Fiber Sheet for Concrete Column”. In: THIRD INTERNATIONAL SYMPOSIUM, V.1, TOKIO, OUT, JAPAN CONCRETE INSTITUTE, p. 217-225, 1997.
- [05] MIRMIRAN, A. e SHAHAWY, M. “Behavior of Concrete Columns Confined By Fiber Composites”. Journal of Structural Engineering, V. 123, N. 5, p. 583-590, Maio 1997.
- [06] RIGAZZO, A. O. “Reforço em pilares de concreto armado por cintamento externo com mantas flexíveis de fibras de carbono”. Campinas, 2003. 126p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.
- [07] SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R.; e LI, M. W. “Strengthening and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps”. ACI Structural Journal, V. 91, N. 4, p. 434-447, Jul-Ago 1994.
- [08] SAMAN, M.; MIRMIRAN, A. e SHAHAWY, M. “Model of Concrete Confined by Fiber Composites”. Journal of Structural Engineering, V. 124, N. 9, p. 1025-1031, Set. 1998.
- [09] SILVA, A. S. “Comportamento de pilares curtos confinados por compósitos de fibras de vidro e carbono”. São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [10] TOUTANJI, H. A. “Stress – Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets.” ACI Materials Journal, V. 96, N. 3, Maio-Junho 1999.