

## Pilares de concreto armado reforçados à flexo-compressão com encamisamento parcial

D. R. C. de Oliveira<sup>1\*</sup> , I. I. R. Damasceno<sup>2</sup> , V. H. L. Branco<sup>3</sup> 

\* Autor de Contato: [denio@ufpa.br](mailto:denio@ufpa.br)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.276>

Recepção: 23/10/2017 | Aceitação: 21/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

### RESUMO

Investiga-se o comportamento de seis pilares à flexo-compressão. As amostras apresentaram uma seção inicial de (120 x 200) mm<sup>2</sup>, uma seção final de (200 x 200) mm<sup>2</sup> e altura de 1.600 mm, reforçadas nos lados tracionados e comprimidos com reboco pré-existente ou não. A aderência entre concreto novo e velho, e padrão de fissuração foram satisfatórios. Embora os pilares revestidos tenham o mesmo comportamento dos pilares não revestidos, mesmo quando a área de concreto foi reduzida em aproximadamente 20%, os problemas consistiram no esmagamento da camada de reforço imediatamente antes da ruptura dos pilares. Esse reforço provou ser mais adequado quando realizado na zona comprimida podendo ser executado através de procedimentos convencionais com ou sem camada de argamassa de reboco.

**Palavras-chave:** pilares; reforço parcial; encamisamento parcial; concreto armado.

**Citar como:** D. R. C. de Oliveira, I. I. R. Damasceno, V. H. L. Branco (2018), “*Pilares de concreto armado reforçados à flexo-compressão com encamisamento parcial*”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 150 - 162, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.276>

<sup>1</sup> Associated Professor, Dr., Federal University of Pará, Civil Engineering Department.

<sup>2</sup> Adjunct Prof., M.Sc., Federal University of South and Southeast of Pará, Civil Engineering Department.

<sup>3</sup> Adjunct Prof., M.Sc., Federal Institution of Science, Education and Technology of Pará, Infrastructure Department.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo, No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2018.

## **Eccentrically-compressed reinforced concrete columns strengthened with partial jacketing**

### **ABSTRACT**

The behavior of six uniaxial compression columns is investigated. Specimen featured an initial section of (120 x 200) mm<sup>2</sup>, a final section of (200 x 200) mm<sup>2</sup> and height of 1.600 mm, strengthened on the tensile and compression sides with plaster or not. Adherence between new and old concrete, and cracking pattern was satisfactory. Although coated columns showed the same behavior to their respective non-coated ones even when concrete area was reduced by approximately 20%, problems consisted in the crushing of the reinforced concrete layer immediately prior to the rupture of the columns. This strengthening proved to be more adequate when undertaken at the columns' compressed zone and may be executed through conventional procedures with or without mortar coating layer.

**Keywords:** columns; partial retrofit; partial jacketing; reinforced concrete.

## **Columnas de hormigón armado comprimido de forma excéntrica y reforzados con encamisado parcial**

### **RESUMEN**

Se investiga el comportamiento de seis columnas a flexo-compresión con sección inicial (120 x 200) mm<sup>2</sup>, sección final (200 x 200) mm<sup>2</sup> y altura de 1.600 mm, reforzadas en los lados traccionados y comprimidos con revoque preexistente o no. La adherencia entre hormigón nuevo y viejo, y patrón de fisuración fueron satisfactorios. Aunque los pilares revestidos tienen el mismo comportamiento de los no revestidos, incluso cuando el área de hormigón se redujo en aproximadamente 20%, los problemas consistieron en el aplastamiento de la capa de refuerzo inmediatamente antes de la ruptura de los pilares. Este refuerzo resultó ser más adecuado cuando se realiza en la zona comprimida, a través de procedimientos convencionales con o sin capa de revoco de mortero.

**Palabras clave:** pilares; refuerzo parcial; encaje parcial; concreto armado.

## **1. INTRODUÇÃO**

Ainda que as estruturas de concreto armado sejam consideradas permanentes, estas apresentam problemas patológicos ao longo de sua vida útil. De fato, algumas estruturas trabalham excepcionalmente bem, enquanto outras revelam falhas prematuras. Certas patologias são de longa duração apesar da incessante busca pela qualidade. Metodologias para a sua prevenção e correção ainda requerem certo desenvolvimento. Guimarães *et al.* (2016) relata que diferentes tipos de patologias podem aparecer na estrutura, o que, por sua vez, causa vários problemas e pode até mesmo provocar rupturas. Cargas maiores do que as calculadas no estado de projeto, falhas no projeto, variações de umidade, processos de corrosão no concreto armado, variações térmicas intrínsecas e extrínsecas ao concreto, agentes biológicos e uso inadequado do material, podem causar problemas patológicos. As consequências são um grau inadequado de segurança da estrutura (estado limite último) e de condições no uso da construção (estado limite de serviço), o que influencia as condições funcionais da estrutura. De acordo com Gillum *et al.* (2001), um desenvolvimento recente em reparo e reabilitação de estruturas de concreto consiste em camadas mais finas de reforço de concreto armado usadas como encamisamento.

Tendo em vista a relevância da temática do assunto, as frequentes demandas por reforços estruturais em obras civis, esta pesquisa visa contribuir para a avaliação de reforço de pilares e a análise dos

ensaios experimentais do comportamento estrutural e da eficiência do encamisamento parcial de pilares de concreto armado, revestidos e não-revestidos, submetidos à flexo-compressão normal. O exposto acima justifica o desenvolvimento de pesquisas sobre o comportamento estrutural do concreto armado, uma vez que a técnica de encamisamento é normalmente mais adequada para aumentar a resistência à compressão, aumento das seções transversais e reforço do concreto armado (Gomes & Appleton, 1998). Para que o revestimento seja bem sucedido, a ruptura do novo concreto deve ser evitada quando a estrutura retornar às cargas de serviço.

## 1. REVISÃO DE LITERATURA

### 1.1 Método de cálculo

Carregamento normal e momento fletor são predominantes em pilares de concreto armado. Eles são chamados de esforços normais desde que produzam tensões normais (tração e compressão) à seção transversal do pilar, com taxas máximas nas superfícies do pilar. A situação é comum e, via de regra, ocorre devido à rigidez da conexão ou à excentricidade das forças verticais causadas pelas imperfeições das construções. Frequentemente, os pilares de edifícios são afetados por atividades excêntricas, de modo que uma excentricidade inicial ( $e$ ) deve ser levada em conta no projeto estrutural. Os pilares de edifícios geralmente sofrem flexo-compressão normal ou oblíqua devido às conexões entre vigas e pilares, e à posição delas em relação aos eixos principais da seção transversal dos pilares.

O diagrama de interação foi empregado para calcular a resistência à flexo-compressão normal, seguindo as recomendações de Wight & Macgregor (2009) e as prescrições e simplificações da norma ACI 318 (ACI, 2008), em concomitância com os parâmetros da NBR 6118 (ABNT, 2014). Como exemplo da metodologia de cálculo, a Figura 1 mostra uma seção transversal de compressão uniaxial na qual duas camadas de concreto armado longitudinal são comprimidas, enquanto a camada inferior na seção transversal  $A_{s3}$  é tracionada, onde  $F_{s1}$ ,  $F_{s2}$  e  $F_{s3}$  são forças em cada camada de aço, e  $F_c$  é a resistência à compressão do concreto. A deformação limite adotada leva em consideração o esmagamento do concreto à 3.5‰ e o escoamento do aço à 2.62‰ ( $\epsilon_{s3}$ , obtido experimentalmente) para todas as barras de armadura.

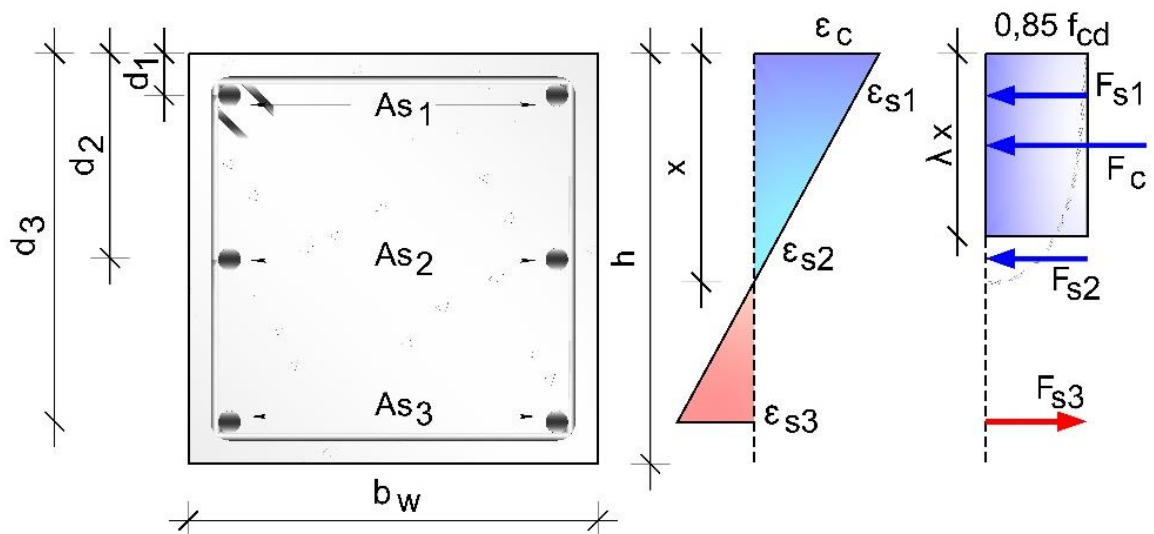


Figura 1. Tensão, deformação e forças resultantes na seção transversal do pilar.

A Equação 1 determina a carga normal máxima aplicada ao pilar; A Equação 2 a resistência à flexão levando em consideração a flexo-compressão normal, onde:  $f_c$  é a resistência à compressão;  $x$  é a linha neutra;  $b$  é a largura da seção;  $\epsilon$  é a deformação do material;  $E$  é o módulo de elasticidade do aço;  $A_s$  é a área de aço;  $h$  é a altura da seção;  $F$  é a força na camada e  $d$  é a altura útil.

Quando a deformação limite é estabelecida, a interação do diagrama pode ser desenvolvida, como mostrado na Figura 2, onde:  $M$  é o momento fletor;  $P$  é a carga axial. A Figura 2 mostra possíveis interações e planos de ação dos momentos fletores ( $M_x$  e  $M_y$ ) e carga axial ( $P$ ), acoplado a uma simplificação para que o momento fletor possa ser considerado apenas na direção principal ( $M_x$ ), como estudado no presente trabalho.

$$P_{RK} = 0.68. f_c. x. b + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{si} \cdot E_s \cdot A_{si} = F_c + \sum_{i=1}^n F_{si} \quad (1)$$

$$M_{RK} = F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - 0.4 \cdot x\right) + \sum_{i=1}^n F_{si} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_i\right) \quad (2)$$

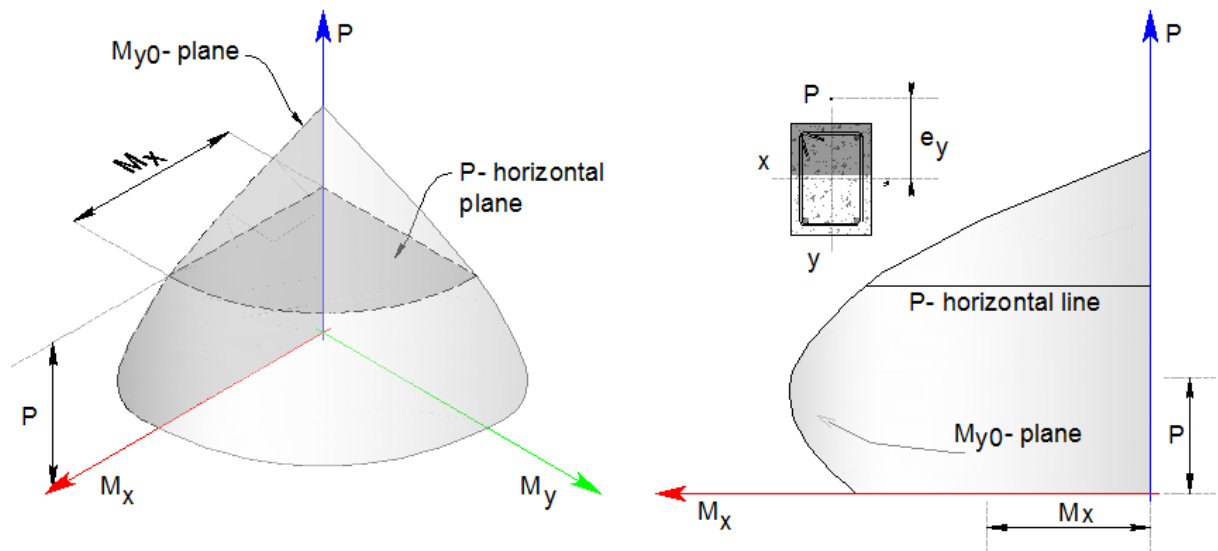


Figura 2. Diagrama de interação para seções submetidas à flexo-compressão (Macgregor, 1996).

Adorno (2004) desenvolveu uma pesquisa com pilares retangulares de concreto armado submetidos à flexo-compressão reta, a fim de comprovar o método de cálculo desenvolvido por Mello (2003). O concreto apresentou uma resistência à compressão média de 40 MPa e o programa experimental foi composto por 12 espécimes, divididos em dois grupos: PSA e PCA. A série PSA consistiu em quatro elementos e a PCA em oito elementos. Todos eles tiveram seção transversal retangular de  $(250 \times 250)$  mm<sup>2</sup>, sujeitas à compressão e flexão. O espaçamento das armaduras o cobrimento mínimo de concreto seguiram as recomendações da NBR 6118 (2007).

Ao analisar as cargas finais, é possível observar que os pilares PSA foram esmagados com uma carga maior do que a série PCA, devido ao aumento da resistência à compressão. Segundo Adorno (2004), a variação inicial de excentricidade teve pouca influência na tensão crítica de tração que foi evidenciada pelo estágio avançado de fissuração. O autor concluiu que os modelos testados mantiveram a proporcionalidade entre a deformação longitudinal e a distância do eixo neutro até a ruptura, confirmando a validade do princípio de Bernoulli de que as seções planas permanecem planas após a flexão, o que também valida o modelo utilizado na presente pesquisa.

Melo (2009) desenvolveu um estudo experimental e numérico do comportamento de pilares de concreto armado articulados (40 MPa) submetidos a carga axial mais momento fletor. Para continuar a pesquisa desenvolvida por Adorno (2004), foram utilizados pilares com a mesma seção transversal e taxa de armadura longitudinal (1,57%). O programa experimental compôs 24 pilares divididos em três séries de acordo com o seu comprimento, sendo a principal variável a excentricidade da carga normal. Os pilares foram de seção transversal de (250 x 120) mm<sup>2</sup> e espaçamento entre barras e cobertura mínima de concreto conforme recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2007).

Os resultados experimentais mostraram um bom funcionamento do sistema de ensaio, o que valida os procedimentos metodológicos aplicados na presente pesquisa, com ruína de pilares ocorrendo a meia altura, como esperado. Além disso, a principal variável dos testes realizados foi a excentricidade, o que mostrou grande influência na carga última dos pilares. Uma resposta não linear da resistência à flexão foi observada em função da esbeltez e excentricidade da aplicação de carga nos pilares. Melo (2009) verificou que o conservadorismo dos métodos de previsão de cargas finais aumenta à medida que a excentricidade é reduzida.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Características gerais

Seis pilares de concreto encamisados parcialmente foram analisados e submetidos a flexo-compressão normal. Todos os pilares foram monitorados por extensômetros elétricos de resistência, colocados longitudinalmente ao pilar para registrar a deformação do concreto e do aço. Relógios comparadores digitais foram utilizados para monitorar os deslocamentos. As variáveis foram a posição do encamisamento parcial, e a presença ou ausência de camada de reboco. A seção transversal, taxa de armadura longitudinal, carga de compressão e posicionamento dos extensômetros utilizados na montagem dos ensaios, foram constantes para todas os pilares.

A excentricidade da carga axial foi de 100 mm medida a partir do eixo longitudinal do pilar. Os pilares foram divididas em dois grupos: um grupo reforçado na zona de compressão (PCR, PCS e PCSR) e outro grupo reforçado na zona de tração (PTR, PTS e PTSR). Um pilar de referência foi moldado em cada grupo, um simulando o reforço da coluna sem a remoção do revestimento de argamassa da seção original e a outra com a remoção completa do revestimento. Os pilares de referência apresentavam uma seção transversal de (200 × 200) mm<sup>2</sup> e comprimento total de 1.600 mm, com índice de esbeltez de aproximadamente 28. Os pilares reforçados tinham uma seção inicial de (120 × 200) mm<sup>2</sup> e comprimento total de 1.600 mm, com 80 mm de camada de reforço. Após o reforço, os pilares mostraram uma seção transversal final idêntica à dos pilares de referência. A Figura 3 mostra o tamanho dos pilares e o consolo de concreto feito para evitar a fissuração prematura do concreto nos espécimes reforçados.

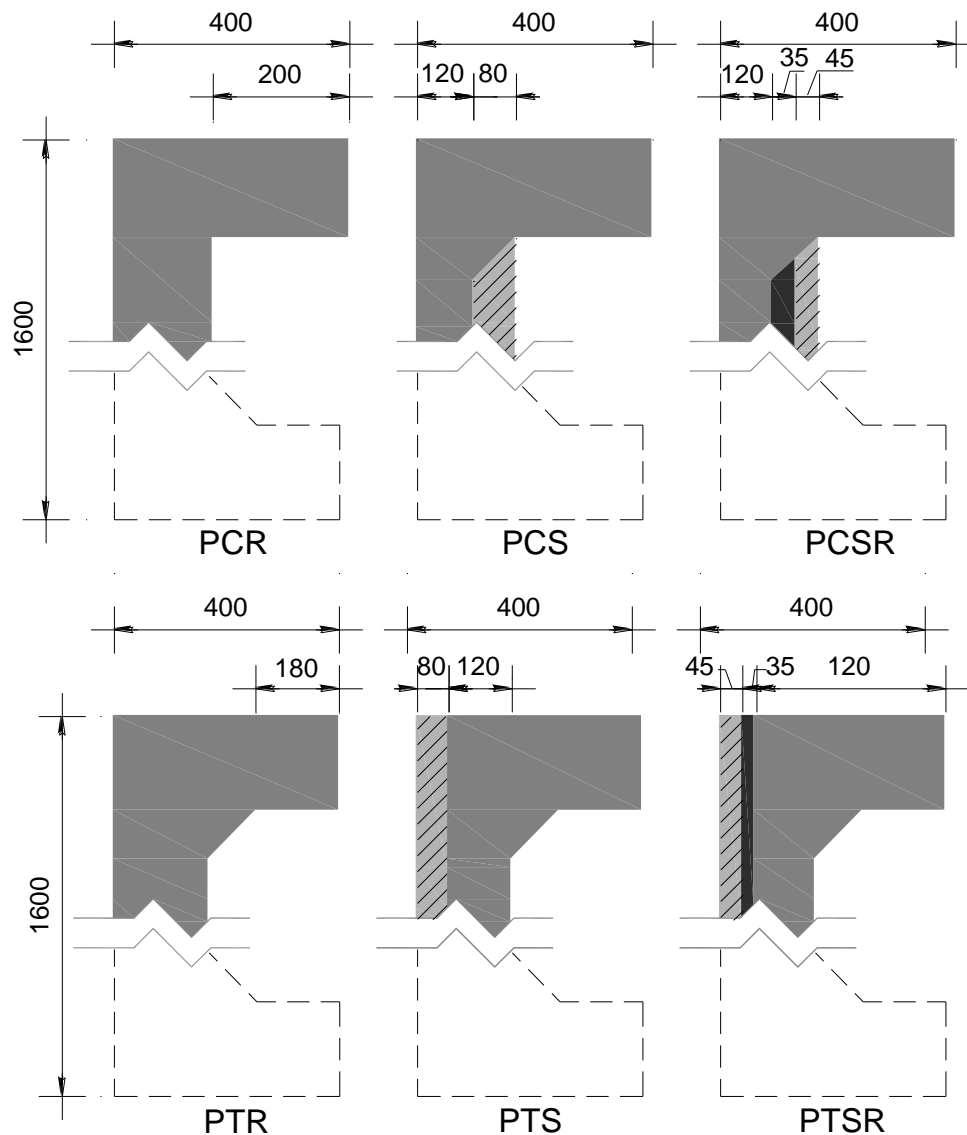


Figura 3. Dimensões dos pilares.

## 2.2 Armaduras

Representando uma situação comum de obra, a armadura longitudinal dos pilares de referência foi de 6  $\varnothing$  10,0 mm ( $A_s = 4.71 \text{ mm}^2$ ), com estribos de  $\varnothing$  5,0 mm espaçados à cada 100 mm de eixo à eixo, e  $\varnothing$  5,0 mm a cada 50 mm nas extremidades. Além disso, foram utilizados estribos abertos adicionais, de  $\varnothing$  5,0 mm a cada 100 mm, posteriormente fixados no concreto endurecido fixados com adesivo epóxi para auxiliar na aderência entre concreto novo e velho. A armadura inicial de todos os pilares foi de  $\varnothing$  10,0 mm ( $A_s = 314 \text{ mm}^2$ ), com duas barras longitudinais adicionadas à armadura, coincidindo com o número de barras usadas do pilar de referência sem reforço, ou melhor, 6  $\varnothing$  10,0 mm ( $A_s = 4.71 \text{ mm}^2$ ). A armadura transversal empregada nos pilares reforçados foi a mesma especificada para os pilares de referência (Figura 4).

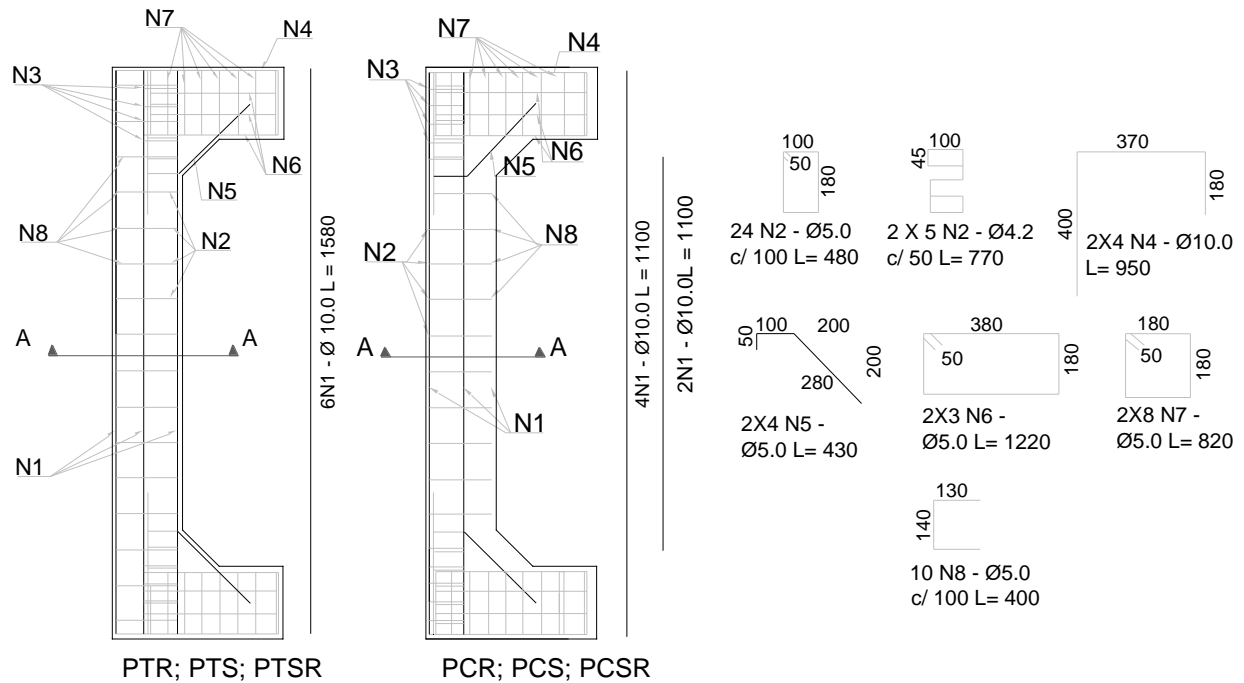


Figura 4. Armadura dos pilares.

## 2.3 Instrumentação

### 3.3.1 Concreto

Para reforço na região de tração e compressão dos pilares, o reforço transversal (estribos abertos) foi fixado no concreto endurecido com um adesivo estrutural à base de epóxi em furos de 60 mm de profundidade. Este compreendeu estribos de Ø 5,0 mm a cada 100 mm, simulando procedimentos em obras civis. Os extensômetros foram instalados no concreto posteriormente à fixação dos estribos abertos (Figura 5). Um revestimento de argamassa de cimento-areia foi aplicado nos pilares PTSR e PCSR antes da instalação dos estribos abertos, por isso outro extensômetro foi colocado na superfície do revestimento. As armaduras longitudinais (2 Ø 10,0 mm) foram posicionadas colocando os moldes de madeira para complementar o reforço, e para a moldagem do concreto. A instrumentação da superfície do concreto foi finalizada com a colocação de um extensômetro na camada de reforço.

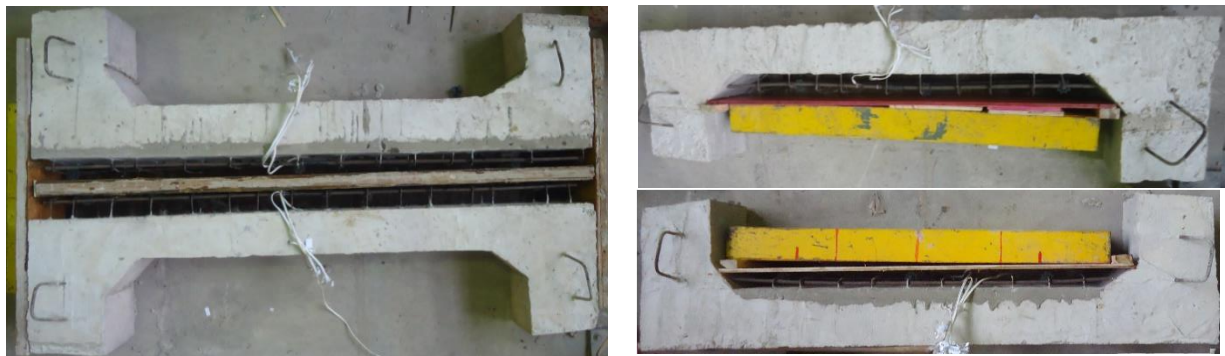


Figura 5. Extensômetros instalados no concreto (PTS; PTSR; PCS; PCSR respectivamente).

### 3.3.2 Armaduras

Os extensômetros elétricos de resistência foram usados em barras de aço para monitorar deformações durante os testes. A Figura 6 mostra o posicionamento dos sensores nos pilares PTR, PTS e PTRS e a Figura 7 exibe a colocação dos sensores nos pilares PCR, PCS e PCSR. Extensômetros foram posicionados a meia altura dos pilares.

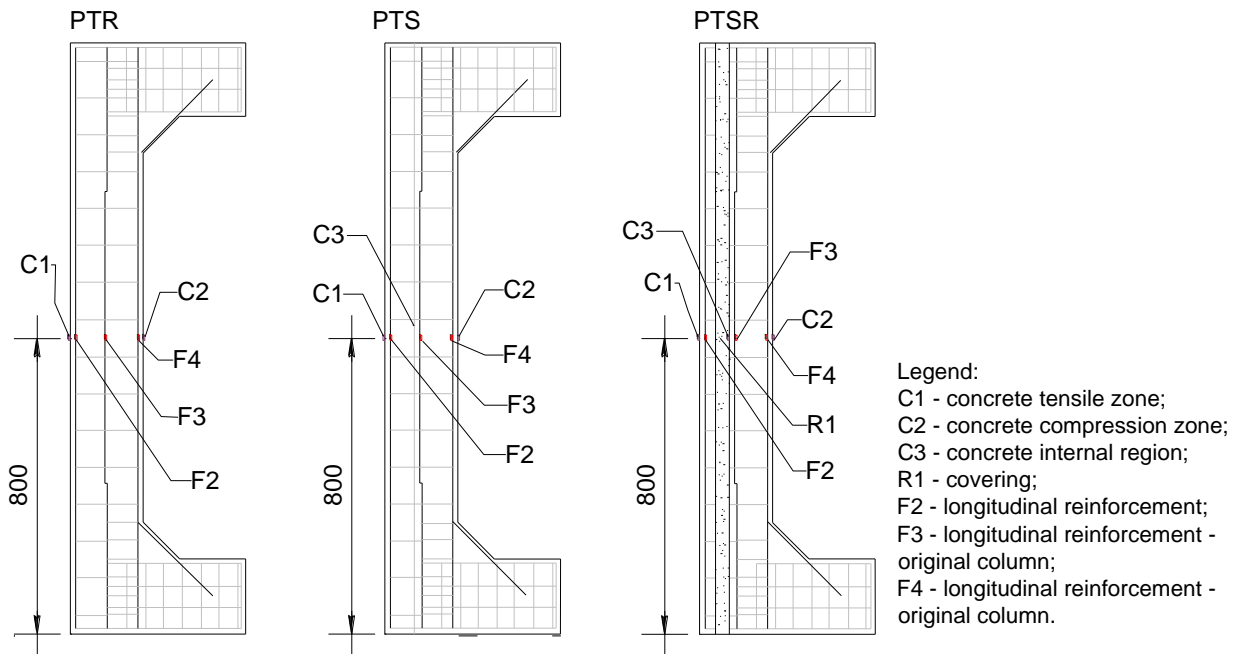


Figura 6. Extensômetros nas barras e concreto dos pilares reforçados na zona tracionada.

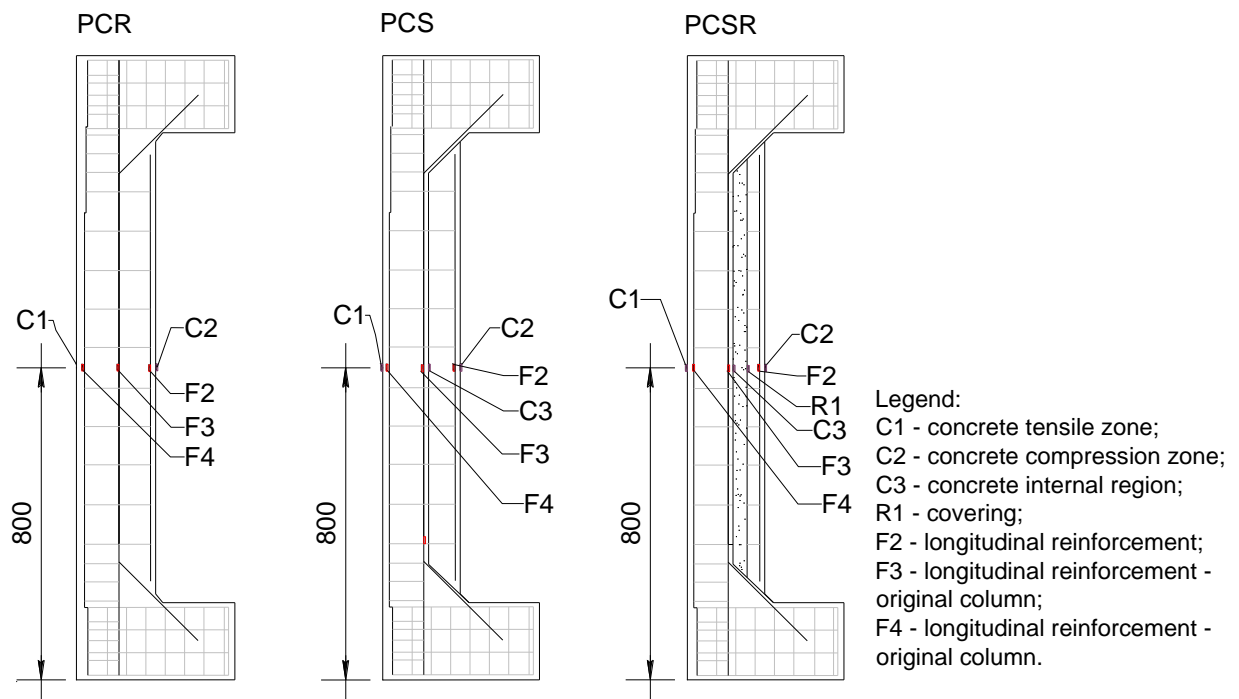


Figura 7. Extensômetros nas barras e concreto dos pilares reforçados na zona comprimida.



## 2.4 Sistema de ensaio

A Figura 8 detalha a configuração do sistema de ensaio usado na análise experimental das pilares. O sistema compreendeu um pórtico metálico altamente rígido fixado à laje de reação, um macaco hidráulico de 2000 kN acionado por uma bomba hidráulica para carregamento e uma célula de carga de 2000 kN com precisão de 0,5 kN, conectados à uma célula de carga com indicador digital para registro de carga. Os pilares foram apoiados em aparelhos de segundo gênero, simulando dobradiças colocadas excentricamente ao eixo longitudinal das peças e viabilizando a flexo-compressão reta esperada. As deformações foram registradas por um sistema de aquisição de dados conectado ao computador, através de extensômetros instalados nos vergalhões e por aqueles fixados na superfície de concreto.

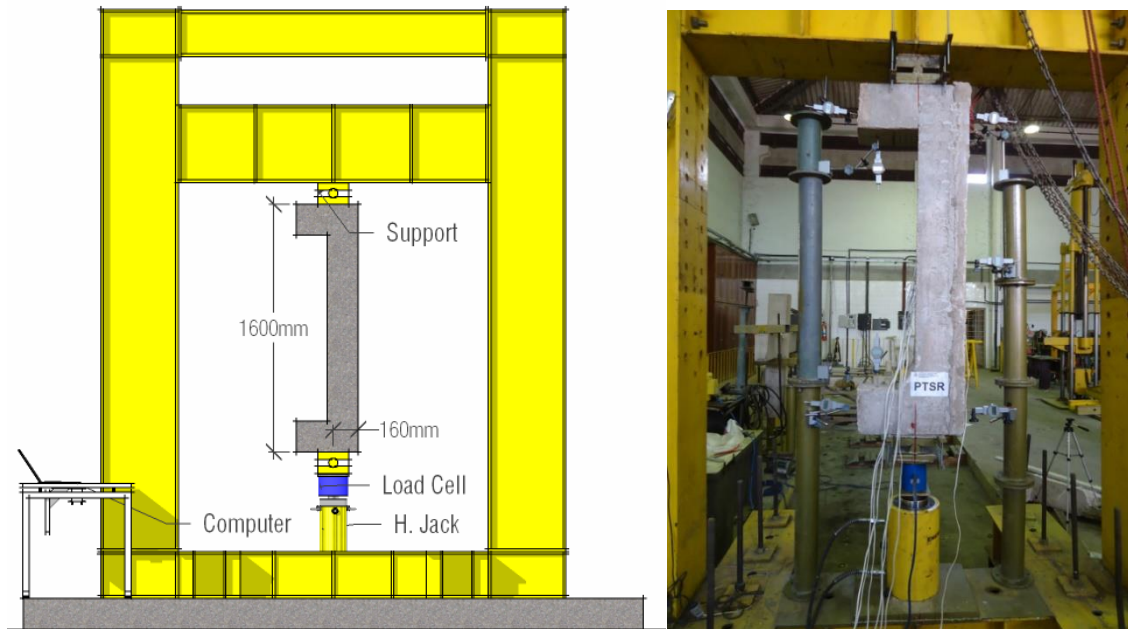


Figura 8. Sistema de ensaio.

## 3. RESULTADOS DOS ENSAIOS

### 3.1 Aço e concreto

Os pilares foram concretados simultaneamente. Os pilares foram reforçados 28 dias após a aplicação do reboco. Três corpos de prova cilíndricos foram moldados em cada etapa e ensaiados de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2007), a resistência à compressão ( $f_c$ ) da argamassa de reboco e do concreto foram respectivamente 7.0 MPa and 32.0 MPa. O módulo de elasticidade do concreto ( $E_{cs}$ ) foi equivalente a 28.1 GPa. No caso das barras de aço, os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2008). A tensão de escoamento ( $f_{ys}$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_s$ ) foram 662.0 MPa e 218.4 GPa para as barras de 5,0 mm e 548.1 MPa e 209.2 GPa para as barras de 10.0 mm de diâmetro, respectivamente.

### 3.2 Cargas e modos de ruptura

Os pilares de referência PTR (pilar de referência reforçado à tração) e PCR (pilar de referência reforçado à compressão) revelaram ao comportamento frágil do concreto na zona de compressão próxima ao vão intermediário. O pilar PCR também mostrou falha perto da borda, na zona de compressão. Os pilares reforçados também revelaram diferentes modos de ruptura, embora tenham demonstrado um comportamento monolítico durante os ensaios até imediatamente antes da ruína. O pilar reforçado PTS apresentou comportamento monolítico até imediatamente antes da ruína, embora, nessa ocasião, o descolamento do reforço tenha ocorrido na zona próxima à extremidade superior. Um comportamento semelhante foi registrado para o pilar PTRS com a cobertura de

argamassa. O pilar PCS, reforçado na zona de compressão, revelou comportamento monolítico até a falha do pilar, sem perda ou fissuração da camada de reforço ou na interface do concreto. Ocorreu o esmagamento do concreto na zona próxima à superfície dos pilares. O pilar PCRS mostrou um padrão de fissuração na superfície entre o reforço e o substrato imediatamente antes da ruína. A Tabela 1 apresenta as cargas de ruptura, a deformação máxima de tração no aço ( $\epsilon_s$ ) e a deformação máxima de compressão no concreto ( $\epsilon_c$ ), a carga normal última ( $N_u$ ), e a comparação entre carga última e carga de referência ( $N_{Ref}$ ) dos pilares PTR e PCR, e os modos de ruptura dos pilares. Os modos de ruptura foram adotados levando-se em consideração as deformações e modos de fissuração, observados experimentalmente. O pilar de referência PTR rompeu com carga normal de 340 kN, revelando deformações de do aço maiores que a de escoamento ( $\epsilon_s \geq \epsilon_{ys} = 2.62\%$ ). O pilar de referência PCR rompeu com carga normal de 400 kN, correspondendo aproximadamente 120% da carga última apresentada pelo pilar PTR. Os pilares reforçados à tração PTS e PTSR apresentaram ruptura por descolamento da camada de reforço estrutural. Além disso, os pilares reforçados à compressão PCS e PCRS romperam com o escoamento do aço na zona de tração e o esmagamento de concreto na zona de compressão, sem sinais de descolamento registrados.

Tabela 1. Cargas e modos de ruptura.

Pilares	Zona reforçada	Revestimento	$\epsilon_s$	$\epsilon_c$	$N_u$	$N_u/N_{Ref}$	Modos de ruptura
			(%)	(%)	(kN)		
PTR	-	Não	3.2	3.6	340	-	Escoamento e esmagamento
PTS	Tração	Não	2.4	1.9	300	0.88	Ruptura do reforço
PTSR	Tração	Sim	2.8	2.3	320	0.94	Ruptura do reforço
PCR	-	Não	4.9	1.9	400	-	Esmagamento do concreto
PCS	Compressão	Não	4.0	3.5	400	1.01	Escoamento e esmagamento
PCSR	Compressão	Sim	3.4	2.0	370	0.92	Escoamento

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta a cargas de ruptura experimentais ( $N_u$ ), Momento fletor experimental ( $M_u$ ), excentricidade inicial ( $e_i$ ) e final ( $e_f$ ), carga de ruptura teórica ( $N$ ) e resistência à flexão ( $M$ ) estimadas pelo diagrama de interação, a relação entre carga de ruptura experimental e carga estimada ( $N_u/N$ ) e a relação entre momentos fletores experimentais e teóricos ( $M_u/M$ ). Os resultados para os momentos fletores teóricos foram satisfatórios para os pilares PTR, PTS e PTSR, com uma taxa média de 1.09 para  $M_u/M$ ; essa mesma taxa alcançou 1.36 para os pilares PCR, PCS e PCRS. O revestimento de argamassa de cimento e areia não foi significativamente danificado nas duas condições de reforço. Em outras palavras, os pilares alcançaram ou foram além das estimativas. Em relação às cargas normais, os pilares revelaram cargas experimentais inferiores às estimativas teóricas. O resultado médio (0,88) para  $N_u/N$  foi melhor para os pilares reforçados na zona de compressão.

A Figura 9 mostra um diagrama de interação (baseado em MacGregor & Ibrahim, 1996) da seção transversal comum a todas os pilares e suas respectivas resistências experimentais finais. Para qualquer excentricidade existe um par único ( $M/N$ ), e plotando estas séries de pares correspondendo a uma excentricidade diferente, o diagrama de interação é obtido.

O eixo horizontal mostra os valores dos momentos fletores e o eixo vertical os valores da carga normal, de modo que as linhas radiais mostram uma excentricidade constante. Quanto mais verticais tenderem as linhas radiais menor a excentricidade conduzindo à ruptura por compressão, então quanto mais horizontais tenderem as linhas radiais maior a excentricidade conduzindo à faixa de ruptura por tração. O traçado da trajetória linear da carga mostra uma ruptura proporcional bem balanceada entre aço e concreto da seção transversal dos pilares de acordo com a NBR 6118 (2014).

Quando as trajetórias de carga foram comparadas, o efeito de segunda ordem, associado à não linearidade física, diminuiu as estimativas de resistência última da carga normal em até 28%, enquanto uma redução de apenas 5% ocorreu.

O exposto acima demonstra que, mesmo com baixos índices de esbelteza, esse efeito deve ser levado em conta devido à diminuição da segurança dos pilares. Enquanto a Figura 10 mostra pilares pós-fissuração, a Figura 11 detalha as zonas danificadas. Os pilares reforçados na zona de tração mostraram descolamento de camada de concreto próximo à extremidade da coluna, devido ao arrancamento dos estribos com a ruptura do pilar. A falha da zona comprimida na extremidade do pilar PCR também pode ser notada.

Tabela 2. Comparação entre resultados teóricos e experimentais.

Pilares	$f_c$ (MPa)	$N_u$ (kN)	$M_u$ (kN·m)	$e_i$ (mm)	$e_r$ (mm)	N (kN)	M (kN·m)	$N_u/N$	$M_u/M$
PTR	32	340	48.3	100	142	442.7	39.6	0.77	1.22
PTS		300	39.3		131			0.68	1.00
PTSR		320	42.2		132			0.72	1.07
PCR		400	56.4		141			0.90	1.42
PCS		400	56.0		140			0.90	1.41
PCSR		370	48.8		132			0.84	1.23

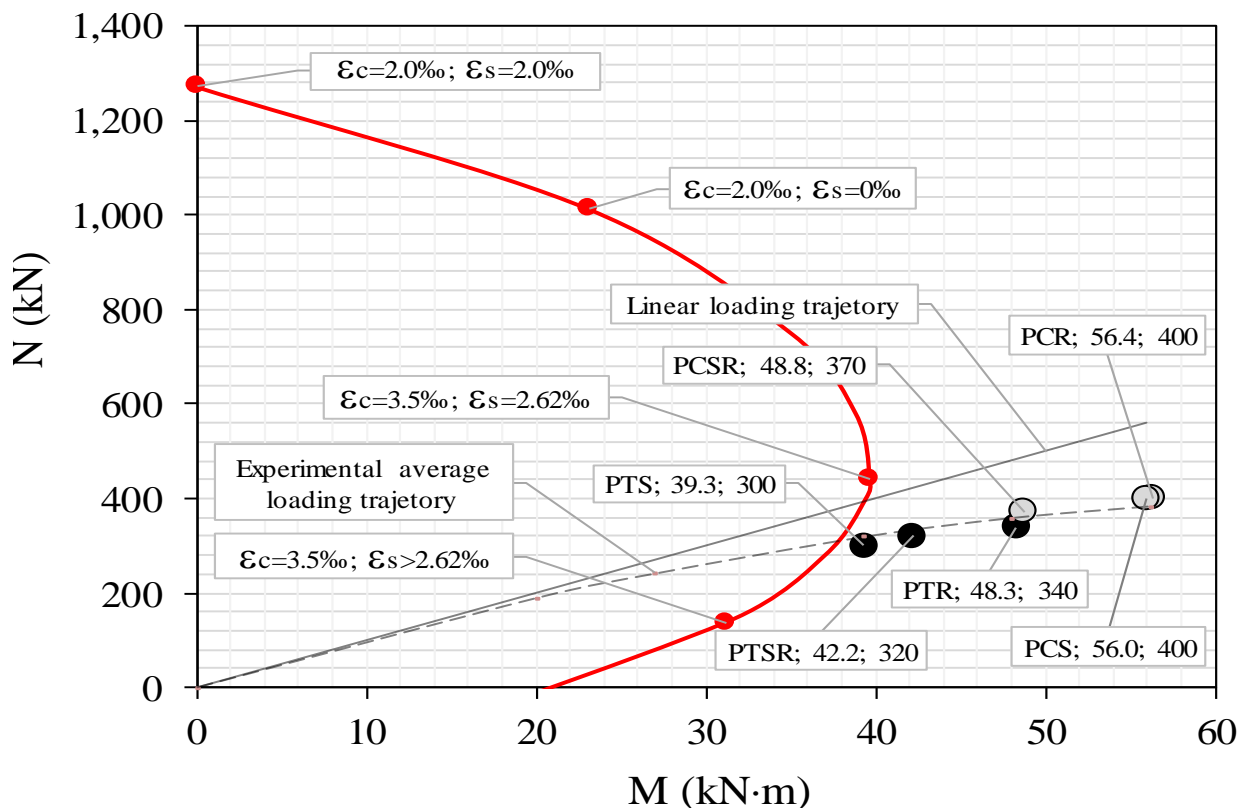


Figura 9. Resultados do diagrama de interação.



Figura 10. Pilares após a ruptura.



Figura 11. Detalhe dos pilares após a ruptura.

## 5. CONCLUSÕES

Os testes realizados fornecem os resultados experimentais de seis pilares de concreto armado reforçados em diferentes zonas, superfície de tração e compressão, submetidos a flexo-compressão normal. Os resultados foram analisados levando-se em consideração as diferentes forças de compressão dos pilares, a zona de reforço e os deslocamentos máximos na zona central dos pilares. O deslocamento máximo dos pilares atingiu 44 mm, dentro das estimativas de falhas e elaboração do diagrama de interação.

Os pilares reforçados PTS, PCS, PTSR e PCSR mostraram um comportamento similar, sem deformações evidentes na superfície original do concreto, o que indica que o concreto entre as camadas de reforço não foi esmagado. O revestimento aplicado na superfície da seção original da coluna PTSR não sofreu grandes deformações, ao invés da coluna PCSR. Os resultados foram satisfatórios, pois a coluna que apresentou maior perda, a coluna PTS, teve uma perda média de 35%.

Os pilares PCR, PTR, PTS e PTSR apresentaram resultados além das estimativas, com perda máxima de 32% para o pilar PTS, a única sem revestimento de argamassa, com descolamento imediatamente antes da ruptura. Os pilares de referência e pilares reforçados à compressão tiveram o melhor desempenho entre todos os pilares analisados. O mencionado acima foi corroborado pela análise feita pelo diagrama de interação. Os pilares com revestimento PTSR e PCSR apresentaram um comportamento semelhante ao das respectivas não revestidas (PTS e PCSR), mesmo quando a área de concreto foi reduzida em aproximadamente 20%. O encamisamento parcial sujeito à flexo-compressão mostrou-se mais adequado quando realizado na zona comprimida de pilares e podendo ser executado através de procedimentos convencionais de reforço. Em relação à remoção ou não do revestimento de argamassa (reboco), os ensaios revelaram influência muito pequena na resistência dos pilares e comportamento semelhante ao dos pilares sem revestimento, ocorrendo descolamento imediatamente anterior à ruptura das peças.

## 6. REFERENCES

- Adorno, A. L. C. (2004), “*Análise Teórica e Experimental de Pilares em Concreto Simples e Armado sob Flexo-Compressão Reta*”, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, p. 300.
- American Concrete Institute (2008), *ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete*, Farmington Hills, Michigan.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), *NBR 5739: Concreto – ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), *NBR 6118: Projeto e execução de estruturas de concreto armado*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *NBR 6118: Projeto e execução de estruturas de concreto armado*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), *NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo de elasticidade e diagrama tensão-deformação*, Rio de Janeiro.
- Comite Euro-International Du Beton (1983), *Bulletin d’Information n. 162: Assessment of Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading (Redesign)*, London.
- Comite Euro-International Du Beton (1993), *Model Code 1990: Design Code*, London.
- Gillum, A. J., Shahrooz, B. M., Cole, J. R. (2001), *Bond strength between sealed bridge decks and concrete overlays*, ACI Structural Journal, p.13.
- Gomes, A., Appleton, J. (1998), *Strengthening of Reinforced Concrete Structures by use of Jacketing*, RPEE, p.67.
- Guimarães, G. N., Ferreira, D. B., Gomes, R. B., Carvalho, A. L. (2016), *Behavior of Reinforced Concrete columns strengthened by partial jacketing*, Ibracon Structures and Materials Journal, p. 155-159. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000100002>
- Macgregor, J. G., Ibrahim, H. H. H. (1996), *Tests of eccentrically loaded high-strength concrete columns*, ACI Structural Journal, pp. 585 - 594.
- Mello, E. L. (2003), “*Concreto armado: resistência limite à flexão composta normal e oblíqua*”, 1ª Ed., Finatec UnB, Brasília, Brasil, p.113.
- Melo, C. E. L. (2009), “*Análise Teórica e Experimental de Pilares de Concreto Armado Submetidos à Flexo-compressão Normal*”, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, p. 157.
- Wight, J. K., Macgregor, J. G. (2009), “*Reinforced Concrete: Mechanics and Design*”. Pearson Education, New Jersey, p.516.