

Experimental analysis of reinforcing columns of reinforced concrete, with anchor steel bolts

Análise experimental de reforço de pilares em concreto armado, com chumbadores metálicos



A. C. MESQUITA ^a
adelson@srocha.eng.br

A. S. ROCHA ^a
andersonsrocha@yahoo.com.br

R. G. DELALIBERA ^b
delalibera@ufu.br

W. A. DA SILVA ^c
wellington_andrade@ufu.br

Abstract

This article presents a columns reinforcement experimental study, with the use of anchor steel bolts and fill with self-compacting concrete. Were tested five columns of reinforced concrete subjected to flexion-compression: two columns were used as reference, and a cross-section equal to 120 x 250 mm; with a monolithic section equal to 155 x 250 mm cross section of the same reinforced columns and three which were initially molded with a 120 x 250 mm section and subsequently received a layer of 35 mm thick self-compacting concrete in the compressed side. Despite the studs do not present break, there was peeling of the reinforcement layer. The results indicate the possibility of using this method in reinforcing structural rehabilitation of reinforced concrete columns, with increase in load capacity on average equal to 403% in relation to the column reference.

Keywords: columns, reinforcement, flexo-compression, reinforced concrete, anchor bolts.

Resumo

Este artigo apresenta um estudo experimental de reforço de pilares, com emprego de chumbadores metálicos e preenchimento com concreto autoadensável. Foram ensaiados cinco pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão: dois pilares foram usados como referência, sendo um com seção transversal igual a 120 x 250 mm; um monolítico com seção igual a 155 x 250 mm, mesma seção transversal dos pilares reforçados e três, que inicialmente foram moldados com seção de 120 x 250 mm e posteriormente receberam uma camada de 35 mm de espessura de concreto autoadensável na face comprimida. Apesar dos chumbadores não apresentarem ruptura, houve o deslocamento da camada do reforço. Os resultados obtidos indicam a possibilidade da utilização deste método de reforço na reabilitação estrutural de pilares de concreto armado, apresentando acréscimo na capacidade resistente em média igual a 403 % em relação ao pilar de referência.

Palavras-chave: pilar, reforço, flexo-compressão, concreto armado, chumbadores.

^a CMEC, UFG, SRocha Consultoria e Projetos Ltda., Goiânia, GO, Brasil;

^b Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Faculdade de Engenharia Civil;

^c Universidade Federal de Goiás, Faculdades de Engenharia, Regional Catalão, Catalão, GO, Brasil.

1. Introdução

1.1 Considerações iniciais

Pilares são elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes, segundo a ABNT NBR 6118 [5]. São destinados a transmitir as ações externas às fundações, embora possam também transmitir para outros elementos de apoio, como no caso de pilares apoiados em vigas de transição. As ações atuantes nos pilares são provenientes geralmente das

vigas e lajes. Os pilares são os elementos estruturais de maior importância nas estruturas, tanto do ponto de vista da capacidade resistente dos elementos estruturais e estabilidade da edificação, quanto no aspecto de segurança. De acordo com Bastos [6], além da transmissão das cargas verticais para os elementos de fundação, os pilares fazem parte do sistema de contraventamento responsável por garantir a estabilidade global da edificação.

A Universidade Federal de Goiás (UFG), em parceria com a Universidade de Brasília (UnB), vem desenvolvendo linhas de pesquisa sobre reforço estrutural e pilares em concreto armado ini-

Figura 1 – Forma do pilar de referência

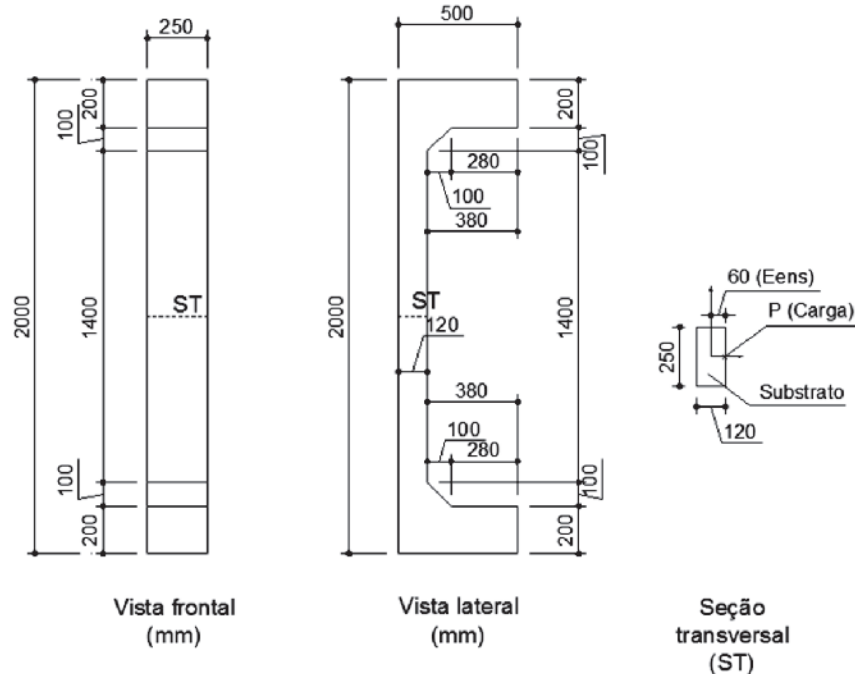


Tabela 1 – Principais características dos pilares

Principais características e nomenclaturas dos pilares ensaiados						
Nomenclatura		Seção (mm)	Nº chumbadores	e_{ens} (mm)	Ø chumb. (mm)	e_{ref} (mm)
Referência	(P_{ref})	120 x 250	-	60	-	-
Monolítico	(P_{mon})	155 x 250	-	42,5	-	-
P6-150-34-AP150-SP	(P_1)	155 x 250	34	42,5	8	35
P6-150-34-AP75-SP	(P_2)	155 x 250	34	42,5	8	35
P6-150-34-AP75-CP	(P_3)	155 x 250	34	42,5	8	35

SP - chumbadores sem porca; CP - chumbadores com porca; e_{ens} - excentricidade de aplicação de carregamento na estrutura indelocada; e_{ref} - espessura da camada de reforço

Figura 2 - Forma do pilar monolítico

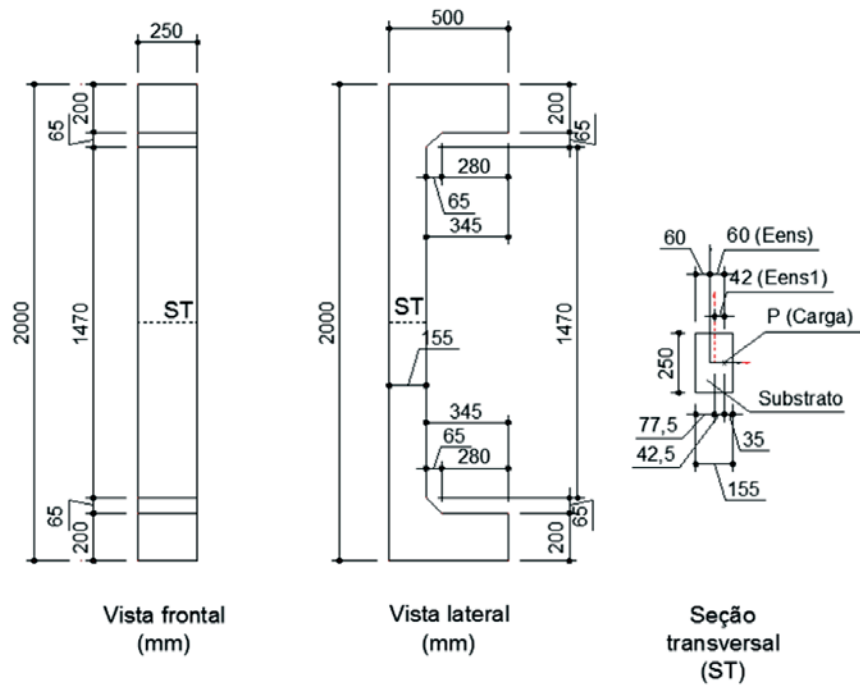
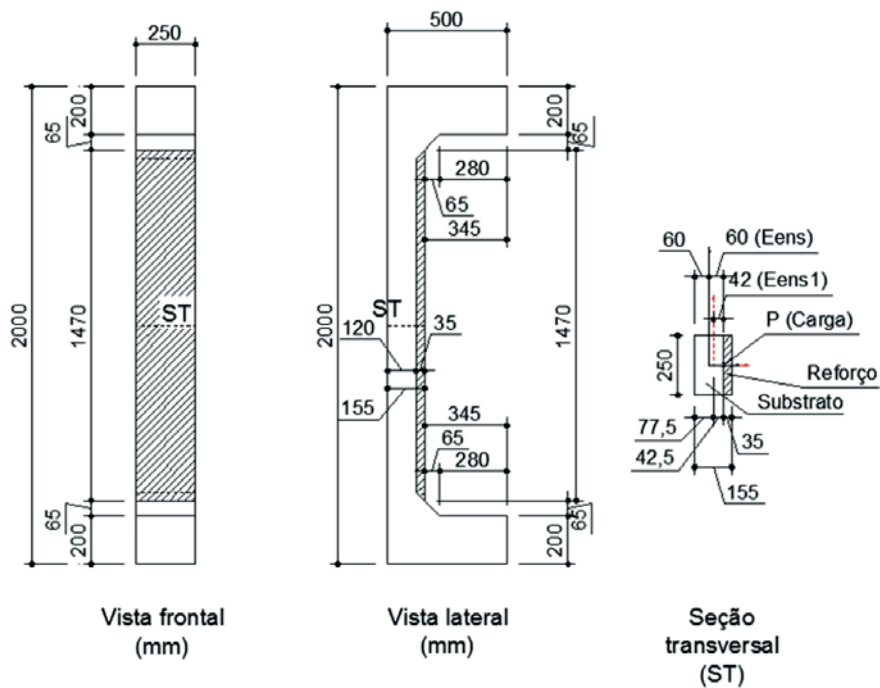


Figura 3 - Forma dos pilares reforçados P1, P2 e P3



ciada por Adorno [10] seguida por Araújo [9] Omar [7], Sahb [1], Melo [12], Nascimento [8], Marques [3], Ferreira [4] e Virgens [2].

1.2 Justificativa

A área de reabilitação estrutural vem apresentando importância cada vez maior na indústria da construção civil, levando em consideração a necessidade de redução de tempo de obra, arquiteturas mais ousadas, com grandes vãos e edificações esbeltas, entre outros motivos. A necessidade do emprego do reforço pode ser aplicada às estruturas, corrigindo problemas patológicos ou aumentando sua capacidade resistente. Entretanto, mesmo com o desenvolvimento deste ramo, os profissionais da área de reabilitação estrutural ainda contam basicamente com modelos empíricos, pois não há norma brasileira específica para análise e dimensionamento de peças reabilitadas. Sendo assim, pretende-se aprofundar o conhecimento estrutural de pilares reforçados, especificamente com chumbadores metálicos.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento dos pilares reforçados após a ruptura, com intuito de verificar o deslocamento do reforço.

2. Programa experimental, materiais e métodos

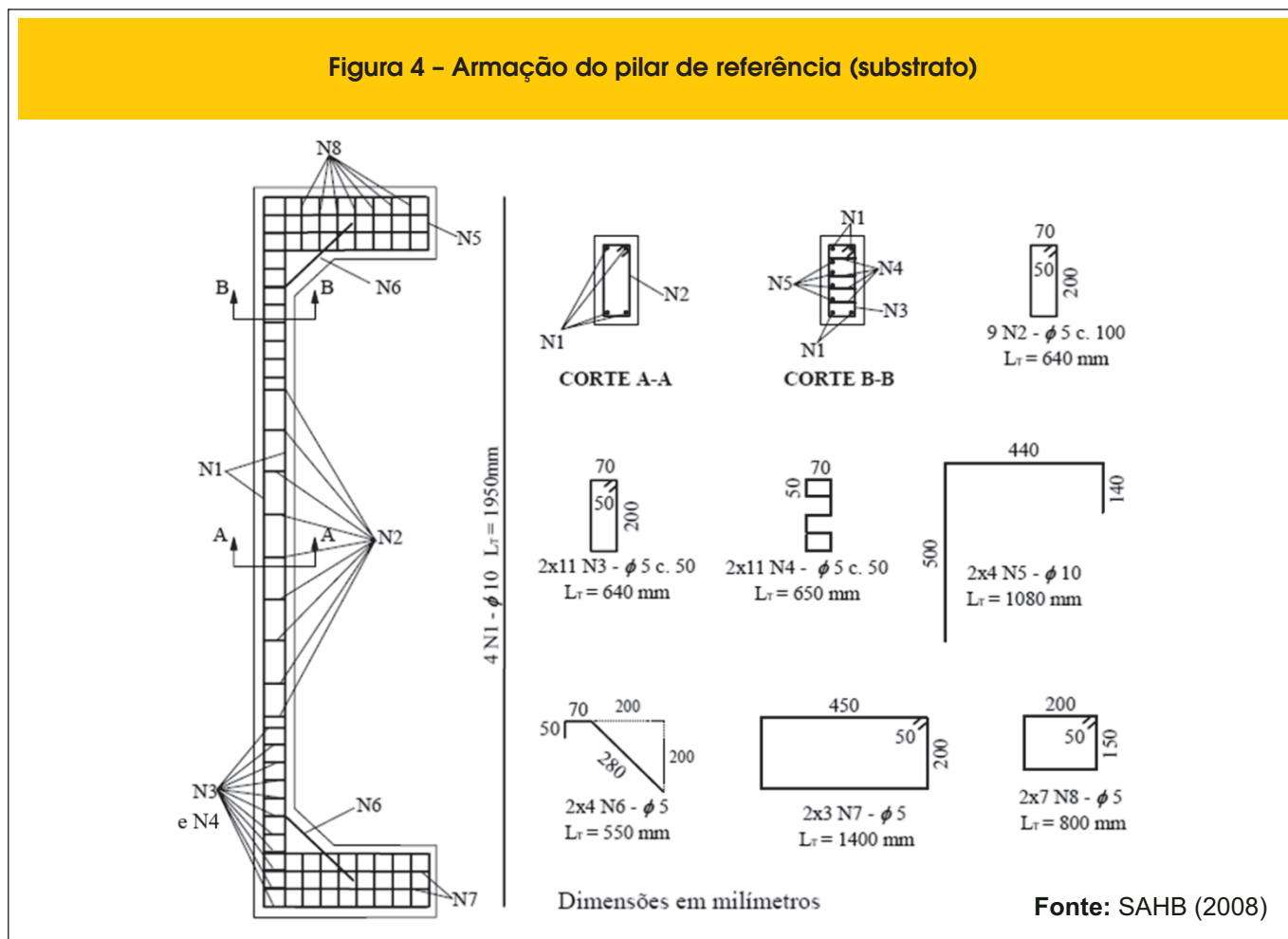
2.1 Características geométricas dos pilares

Para esta pesquisa foram construídos cinco pilares, sendo um de referência (P_{ref}), com seção transversal de 120 x 250 mm (seção original), um monolítico (P_{mon}) cuja seção transversal é a mesma dos pilares reforçados, 155 x 250 mm, porém executado em uma única moldagem e três pilares reforçados (P1, P2 e P3), conforme descrito na Tabela [1].

As características geométricas e a armadura do pilar de referência seguiram os padrões dimensionais dos pilares ensaiados por Sahb [1], conforme indicado nas Figuras [1], [2], [3] e [4]. O posicionamento e quantidade de chumbadores foram os mesmos considerados nos pilares P6-150-34 de Virgens [2], indicados nas Figuras [5], [6] e [7].

A superfície do pilar que recebeu o reforço foi preparada inicialmente recebendo uma escarificação por meio de uma hidrojateadora (hidrodemolidora) que projeta água em alta pressão (320 psi); em seguida os furos foram executados por meio de uma furadeira, controlando a profundidade dos mesmos, de forma que dentro do concreto do reforço, ficassem somente 15 mm da rosca

Figura 4 - Armadura do pilar de referência (substrato)



módulo de elasticidade longitudinal também foi obtido por meio do ensaio de dois corpos de prova cilíndricos.

Escolheu-se um concreto de 30 MPa para obter a mesma resistência adotada por Omar [7] e Sahb [1]. O concreto foi produzido em central dosadora.

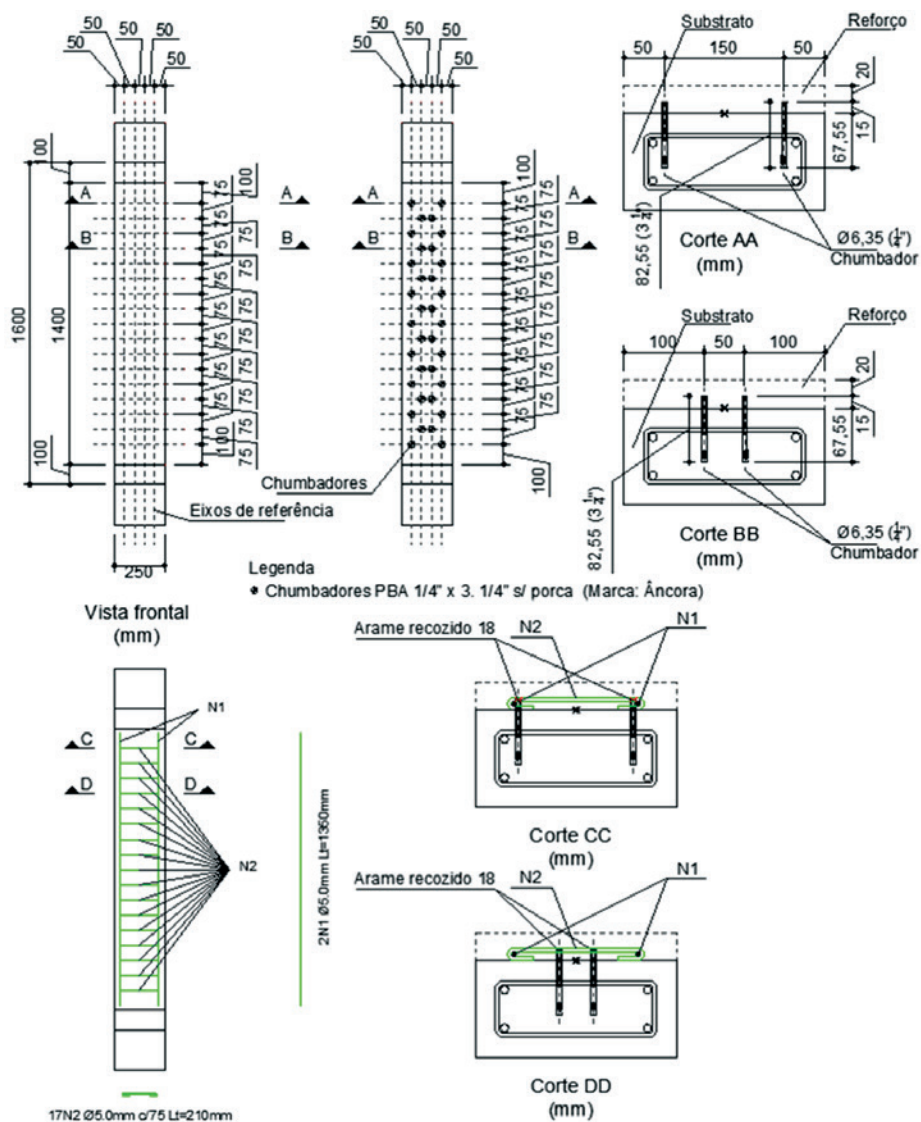
As resistências médias à compressão e à tração do concreto do substrato, na data dos ensaios, tiveram valores médios iguais a 44,2 MPa e 3,6 MPa, respectivamente, e o módulo de elasticidade longitudinal inicial foi igual à 31,4 GPa.

Para determinação das propriedades do concreto do substrato, tanto no estado fresco, quanto no endurecido, foram seguidos os procedimentos prescritos nas seguintes normas: ABNT NBR 15823 [13], ABNT NBR 5738 [14], ABNT NBR 5739 [15], ABNT NBR 7222 [16], ABNT NBR 8522 [17].

2.3 Concreto do reforço

A moldagem do reforço dos pilares também foi feita empregando-se concreto autoadensável, com intuito de obter resultados semelhantes ao concreto do substrato (resistência à compressão e módulo de elasticidade). O mesmo foi moldado no laboratório de estruturas do CMEC (Curso de Mestrado em Engenharia Civil – UFG). Foi feito um estudo de dosagem, caracterizando os materiais e determinando o traço em massa do concreto utilizado na moldagem do reforço que foi igual a 1 : 2,05 ; 1,36 ; 1,14 ; 0,76 : 0,67 (cimento, areia natural, areia artificial, brita 0, brita 1 e relação água cimento – a/c). Para atingir a fluidez e coesão necessárias, ainda foram utilizados 0,6% de aditivo polifuncional, 0,4% de aditivo superplastificante e 6% de sílica ativa, ambos em relação ao

Figura 6 – Conectores e armação pilar reforçado (P2)



consumo de cimento. Para obter as propriedades mecânicas do concreto utilizado, foram realizados os mesmos ensaios executados para o concreto do substrato.

As resistências médias à compressão e à tração do concreto do substrato, na data dos ensaios, tiveram valores médios iguais a 39,7 MPa e 3,8 MPa, respectivamente, e o módulo de elasticidade foi igual a 31,2 GPa.

2.4 Aço

Para obter as características dos aços empregados foram ensaiadas duas amostras para cada diâmetro (5,0 mm e 10,0 mm), utilizando-se o ensaio à tração simples de acordo com as orientações da ABNT NBR 6152 [11]. Foram determinadas pela média

dos resultados das amostras o valor da tensão de escoamento e o valor de cada deformação específica relativa ao escoamento das barras de aço.

As barras de aço da armadura transversal e armadura do reforço com diâmetro igual a 5 mm não apresentaram patamar de escoamento bem definido, porém foi possível observar uma mudança de direção no gráfico tensão versus deformação, destes corpos de prova, determinando assim, a tensão de escoamento e a deformação específica dos mesmos, já as barras de aço da armadura longitudinal com diâmetro igual a 10 mm tiveram o patamar de escoamento bem definido, obtendo valores de tensão de escoamento e deformação específica igual a 575 MPa e 2,50 mm/m (%) respectivamente. Para armadura de diâmetro igual a 5 mm, os resultados obtidos foram 720 MPa de

Figura 7 - Conectores e armação pilar reforçado (P3)

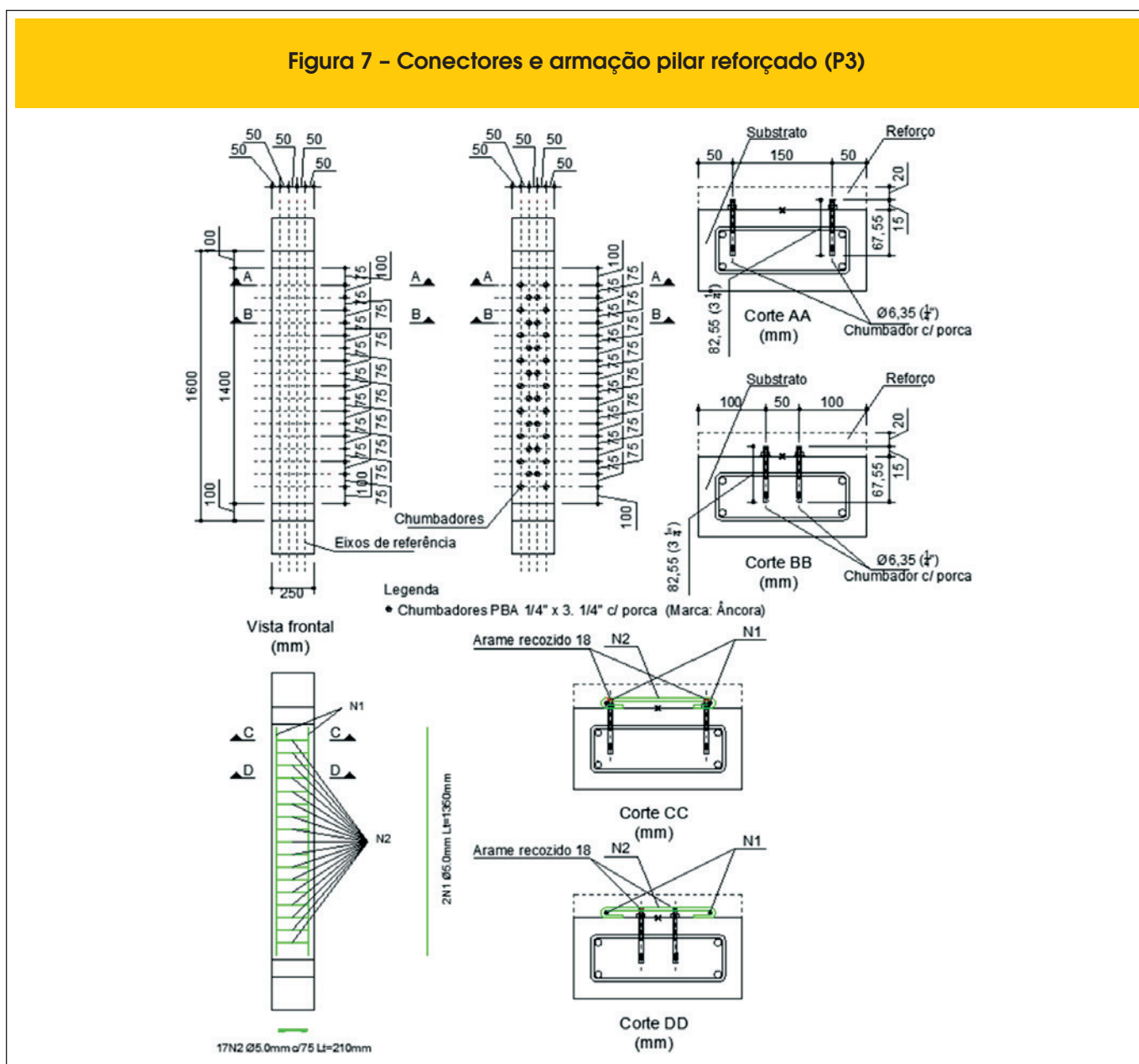


Tabela 2 - Comparativo pilares e modos de ruptura

Tabela comparativa geral													
Pilar	Idade (dias)		f_c (MPa)		$P_{ult.}$ leitura (kN)	P_u (kN)	P_u/P_{mon}	P_u/P_{ref}	Desl. R3 (mm)	Desl. régua (mm)	$\epsilon_{s,máx}/\epsilon_y$	$\epsilon_{s,máx}/\epsilon_u$	Modo de ruptura
	Sub.	Ref.	Sub.	Ref.									
P_{ref}	90	-	41,9	-	120,0	126,7	0,23	1,00	26,00	34,20	0,84	0,82	EA - EC
P_{mon}	80	-	41,3	-	540,0	542,2	1,00	4,28	18,43	19,20	0,56	0,60	EA - EC
P1	192	19	45,9	40,0	400,0	510,0	0,94	4,03	7,42	17,50	0,58	0,71	DR
P2	191	18	45,9	39,4	420,0	522,0	0,96	4,12	4,63	15,00	0,60	0,61	DR
P3	187	14	45,8	26,9	500,0	501,4	0,92	3,96	11,20	17,40	0,41	0,57	DR

Sub.: concreto do substrato (CAA); Ref.: concreto do reforço (CAA); f_c : resistência à compressão do concreto; $P_{ult.}$ leitura: carga da última leitura do equipamento de coleta de dados; P_u : carga última de ruptura; Desl. R3: deslocamento máximo lido no relógio R3; Desl. régua: deslocamento máximo lido na régua; $\epsilon_{s,máx}$: deformação máxima lida no extensômetro da barra tracionada no substrato; ϵ_y : deformação de início de escoamento obtida para aço ensaiado; ϵ_u : deformação do concreto segundo ABNT NBR 6118:2014; EA: escoamento do aço; EC: esmagamento do concreto; DR: deslocamento do reforço

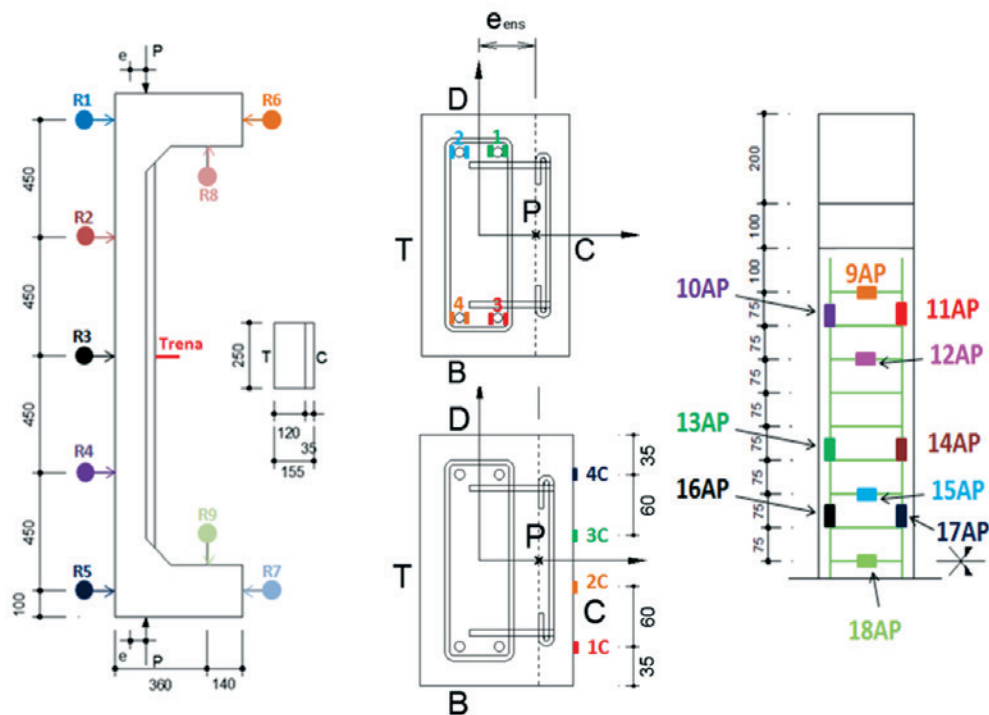
tensão de escoamento e 3,5 mm/ m (‰) de deformação específica, respectivamente.

2.5 Chumbadores metálicos

Para solidarização do concreto do reforço com o substrato, foram

utilizados parafusos chumbadores tipo PBA de 5/16" x 3 1/4" – C/P da ÂNCORA SISTEMAS DE FIXAÇÃO. Com diâmetro de 7,9 mm (5/16"), comprimento total de 82,55 mm (3 1/4"), carga de arrancamento média de 1430 kgf , considerando um furo com profundidade mínima de 40 mm e torque de aperto de 1,8 kgf.m, segundo catálogo técnico do fabricante.

Figura 8 - Instrumentação empregada nos modelos



2.6 Forma

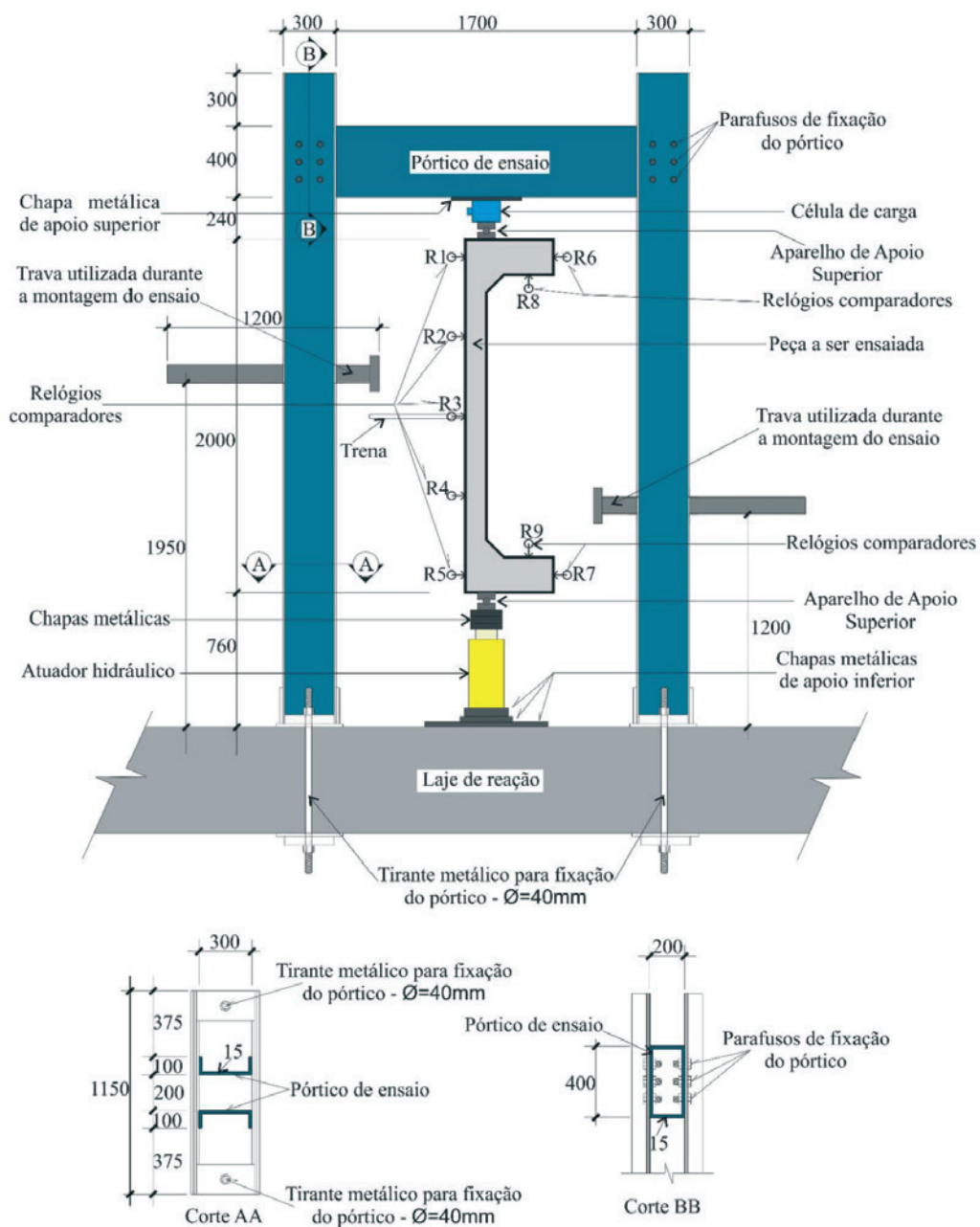
A moldagem do substrato dos pilares de referência e monolítico foi executada com emprego de formas metálicas. O cobrimento 2,5 cm da armadura foi garantido com emprego de espaçadores plásticos, devidamente posicionados na armadura. Para concretagem do reforço, utilizou-se chapas de madeira compensada plastificada, espessura de 18 mm, posicionadas

nas laterais dos pilares e fixadas por meio de grampos metálicos.

2.7 Instrumentação

Para medir as deformações das barras de aço da armadura longitudinal do substrato e da armadura do reforço, foram colados respectivamente oito e dez extensômetros elétricos de resistência (EER), do tipo PA-06-250BA-120-L, e também, quatro extensômetros na

Figura 9 – Esquema geral do ensaio e pilar preparado para ensaiar



face mais comprimida do reforço do tipo PA-06-201BA-120-L, ambos da marca EXCEL. A leitura das deformações dos extensômetros foi realizada por meio do equipamento de coleta de dados *AGILENT BenchLink Data Logger* Modelo 34970^a, Figura [8].

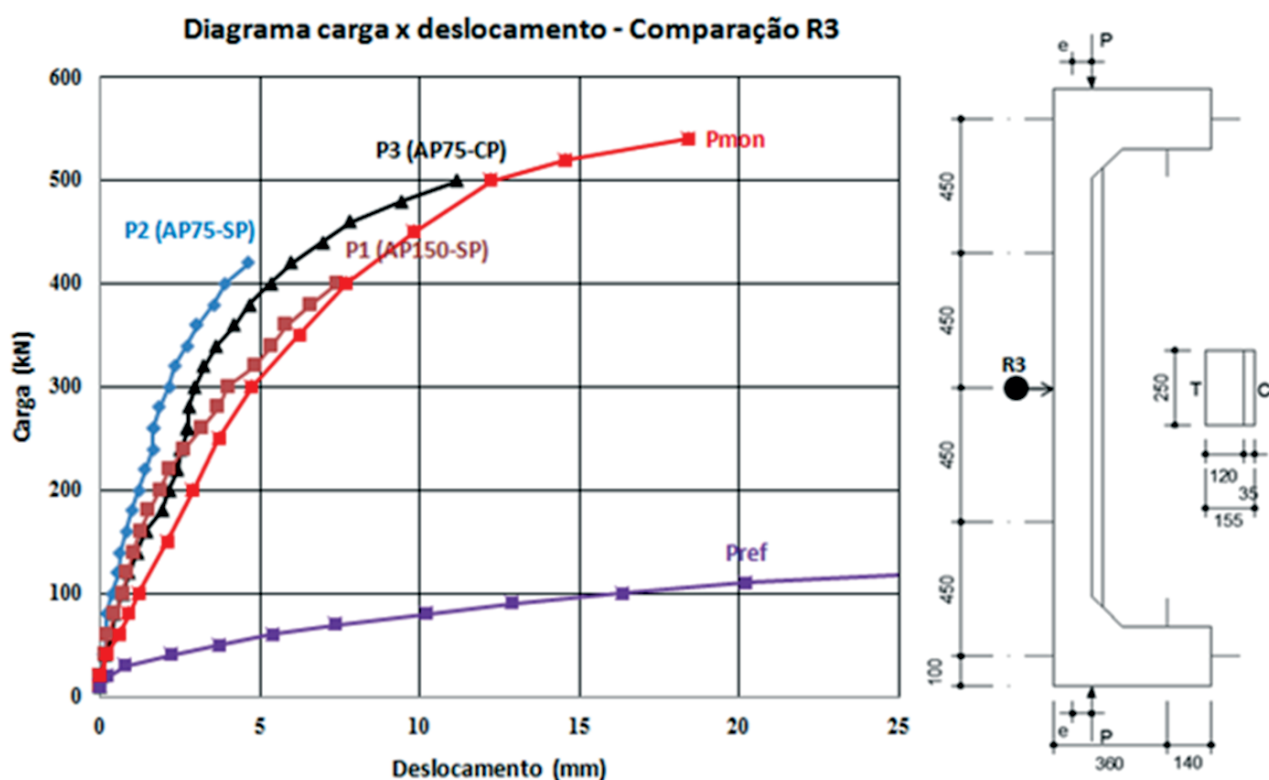
Para medição dos deslocamentos horizontais e verticais dos pilares, foram posicionados nove relógios comparadores, da marca Mitutoyo, com precisão de 0,01 mm, nomeados R1 à R9. Os relógios foram instalados com auxílio da base magnética, fixados em uma estrutura metálica de apoio e o cursor sobre chapas metálicas coladas no pilar conforme posições indicadas no projeto, Figura [8].

2.8 Análise experimental

Os pilares tinham dois metros de altura e dois consoles cuja fi-

nalidade foi permitir que a carga fosse aplicada excêntrica-mente à seção central. A seção central representa a região de interesse da análise. O reforço dos consoles serviu apenas para garantir que a ruptura ocorresse na seção central. Os ensaios foram realizados no laboratório de estruturas da Universidade Federal de Goiás. O carregamento foi aplicado por meio de um atuador hidráulico, da marca *Yellow Power*, com capacidade nominal de 1500 kN, acionado por uma bomba hidráulica manual. O atuador hidráulico foi posicionado na parte inferior do pilar. Para controle do carregamento aplicado, foi posicionada uma célula de carga com capacidade de leitura de carga de 1500 kN (marca *Kratos*) na cabeça do pilar, como apresentado na Figura [9]. O carregamento foi aplicado considerando passos de carga de 100 kN, coincidindo simultaneamente com a leitura de todos os instrumentos.

Figura 10 – Diagrama de carga versus deslocamento do relógio R3 de todos os pilares



	P1	P2	P3	Pref	Pmon
Pu (kN)	510	522	501,4	126,7	542,2
Pret,rel (kN)	400	420	500	120	540
e (mm)	42,5	42,5	42,5	60	42,5
fc sub. (MPa)	45,9	45,9	45,8	41,9	41,3
fc ref. (MPa)	40	39,4	26,9	-	-

3, Resultados e discussões

Todos os pilares reforçados obtiveram força última maiores que o pilar de referência (P_{ref}) e próximas da carga do pilar monolítico (P_{mon}), mas ainda sendo menores.

A carga resistente esperada dos modelos estudados, foi definida com base em análise nas diversas pesquisas semelhantes já realizadas e também em função dos resultados da análise numérica dos mesmos.

Verificou-se que a utilização da armadura do reforço pouco influenciou, no comportamento dos modelos estudados e também não impediu o deslocamento do concreto do reforço. Todos os pilares apresentaram ruptura do tipo brusca, acarretada pelo deslocamento do reforço.

A diferença da resistência à compressão entre o concreto do sub-

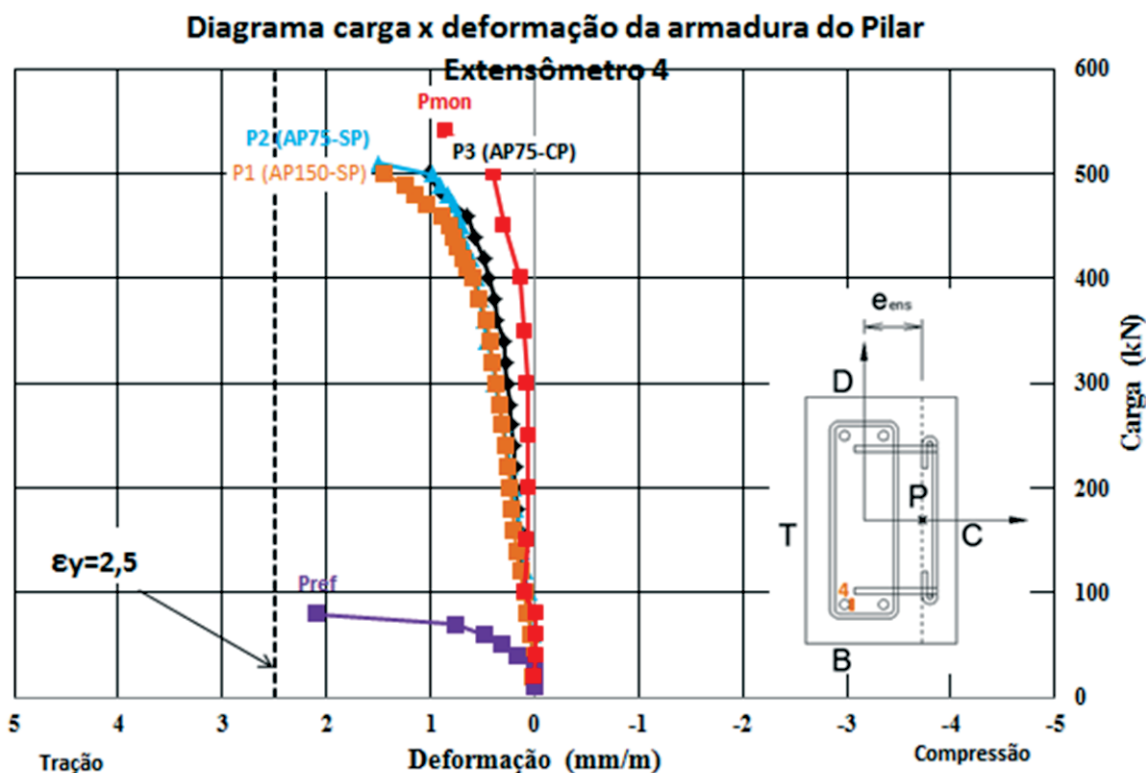
trato e o concreto do reforço, do pilar P1, foi de 5,9 MPa, do P2, 6,5 MPa e do P3, 18,9 MPa.

Os pilares reforçados apresentaram carga de ruptura superior como valores entre 3,96 a 4,28 vezes a carga do pilar de referência, como apresentado na Tabela [2]. Os pilares atingiram em média 94 % da carga do pilar monolítico.

Na Tabela [2] foi feita uma análise comparativa de todos os pilares, apresentando as características do concreto, forças últimas, maiores deslocamentos, maiores deformações e modos de ruptura.

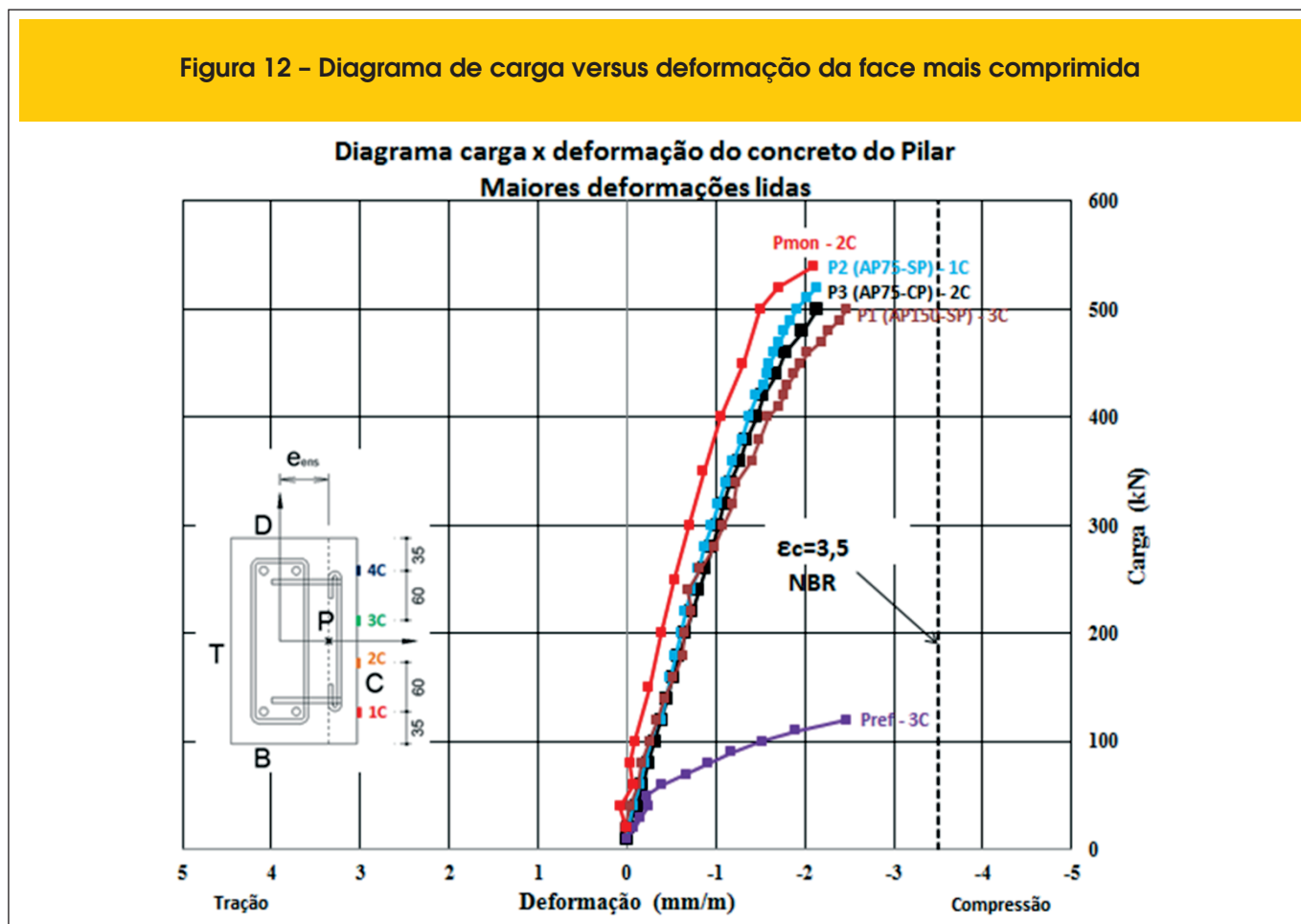
Observou-se que houve surgimento de várias fissuras nos pilares reforçados, mas não foi possível verificar uma fissura crítica que pudesse provocar a ruptura, conforme aumento da carga, pois um dos pilares apresentou ruptura na região superior, um na região central e um na região inferior da superfície estudada, ocorrendo logo após o deslocamento do reforço.

Figura 11 - Diagrama de carga versus deformação da barra mais tracionada



	P1	P2	P3	Pref	Pmon
Pu (kN)	510	522	501,4	126,7	542,2
Pret,rel (kN)	400	420	500	120	540
e (mm)	42,5	42,5	42,5	60	42,5
fc sub. (MPa)	45,9	45,9	45,8	41,9	41,3
fc ref. (MPa)	40	39,4	26,9	-	-

Figura 12 – Diagrama de carga versus deformação da face mais comprimida



Antes do deslocamento da camada de reforço, os pilares tiveram um comportamento semelhante ao pilar monolítico, tanto nos deslocamentos, como apresentado na Figura [10], quanto nas deformações. Os mesmos apresentaram uma tendência de escoamento do aço e esmagamento do concreto, Figuras [11] e [12], característica de ruptura dúctil, mas o deslocamento do reforço provocou uma ruptura brusca nos modelos. Já os pilares de referência e monolítico, tiveram uma ruptura mais suave, caracterizando uma ruptura relativamente dúctil e gradual.

Os relógios comparadores foram removidos antes da ruptura dos pilares para não serem danificados; após a retirada dos relógios comparadores a leitura dos deslocamentos na posição do relógio R3, continuou sendo efetuada pelo monitoramento, à olho nu, através do deslocamento de uma trena, com escala milimétrica, devidamente fixada ao pilar. Os maiores deslocamentos foram verificados pela trena e pelo relógio comparador R3, posicionados na região central da face T dos pilares.

A Figura [11] apresenta as maiores deformações das armaduras tracionadas (face T). A Figura [13] apresenta a deformação das barras da armadura do reforço, na região mais comprimida (face C). As barras de aço com diâmetro igual a 10 mm (armadura longitudinal do substrato) e 5 mm (armadura do reforço), foram devidamente caracterizadas e obtiveram uma deformação de início de escoamento (ϵ_y) de 2,5 ‰ e 3,5 ‰, respectivamente.

O limite para o esmagamento do concreto foi adotado, conforme

indicado na ABNT NBR 6118 [5], 3,5 ‰, considerando o caso de flexo-compressão.

4. Conclusões

As forças últimas dos pilares P1, P2 e P3 foram em média 3,96 a 4,28 vezes maiores que a força última do pilar de referência e em média 94% da carga do pilar monolítico, confirmando a eficiência do reforço empregado e ressaltando a possibilidade do emprego deste tipo de reforço na reabilitação estrutural, considerando certo coeficiente de segurança, com objetivo de evitar o deslocamento da camada do reforço.

Os deslocamentos e as deformações verificadas nos pilares P1, P2 e P3 foram próximos ao do pilar monolítico, mas houve deslocamento da camada do reforço, acarretando uma ruptura brusca. A variação no espaçamento da armadura do reforço, pouco influenciou, nas cargas de ruptura e nos deslocamentos dos pilares estudados.

Em nenhum dos pilares estudados ocorreu ruptura dos parafusos chumbadores.

Portanto, a técnica de reforço empregada poderá ser utilizada em situações reais, contudo, faz-se necessário a utilização de coeficientes de segurança e uma análise minuciosa dos esforços da peça à ser reabilitada, para ser apresentado um modelo de dimensionamento adequado, que evitara o deslocamento e que atentada as recomendações normativas.

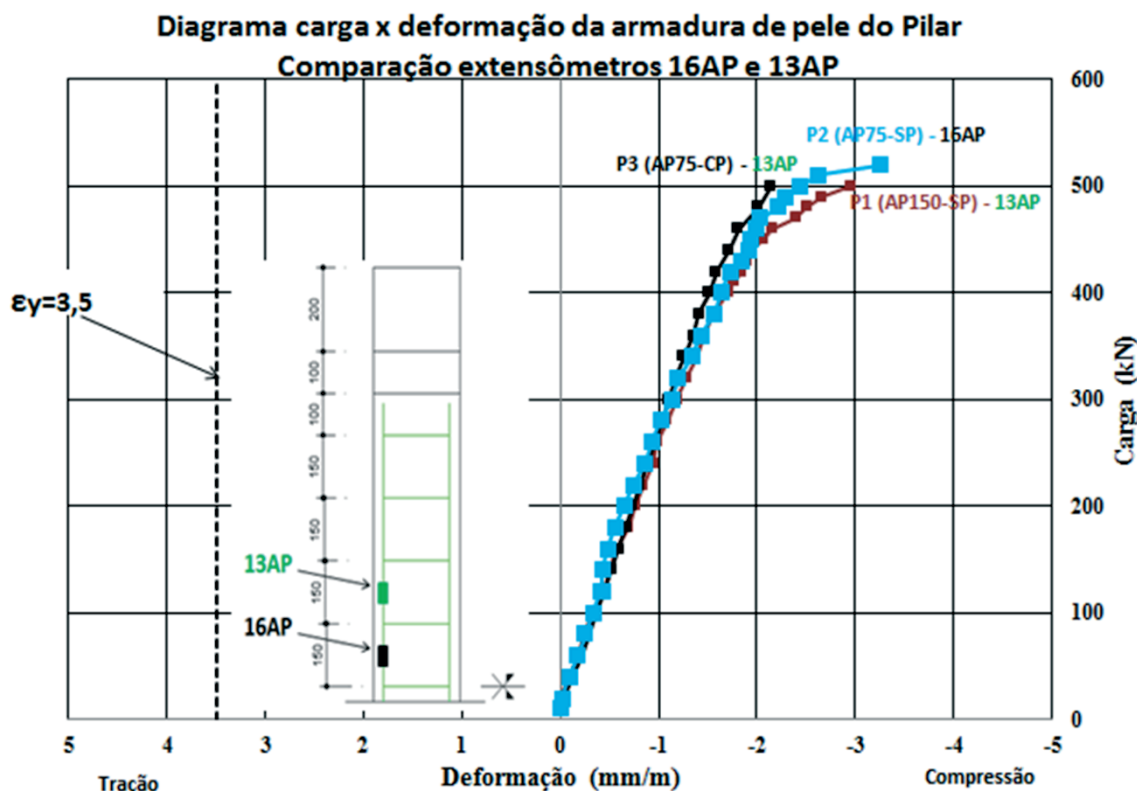
5. Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro em forma de bolsa de mestrado ao primeiro autor. À Concreto Redimix do Brasil S.A. pelo fornecimento dos materiais para moldagem do concreto utilizado. Ao Sr. Divino Pedro Rocha pelo transporte dos materiais para caracterização. Ao Laboratório Carlos Campos Consultoria e Projetos Ltda pela caracterização dos materiais, o estudo de dosagem do concreto e disponibilização do equipamento e mão-de-obra para operação da hidrodemolidora. À PUC-GO pelos ensaios de tração das barras de aço.

6. Referências bibliográficas

- [1] SAHB, K. F. P. Análise Experimental de Pilares de Concreto Armado Submetidos à Flexo-Compressão, Reforçados com Concreto Auto-Adensável e Chumbadores. 224f. Dissertação (Mestrado), UFG, Goiânia, Goiás, 2008.
- [2] VIRGENS, P. J. Análise experimental de pilares de concreto armado, com carga excêntrica, reforçados com chumbadores e concreto autoadensável (caa), REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, volume 8, nº 1, Goiânia, Goiás, 2014.
- [3] MARQUES, M. G. Análise do comportamento de pilares de concreto armado reforçados com chumbadores e concreto auto adensável. 197f. Dissertação (Mestrado), UFG, Goiânia, Goiás, 2014.

Figura 13 - Diagrama de carga versus deformação da “armadura de pele”



	P1	P2	P3	Pref	Pmon
Pu (kN)	510	522	501,4	126,7	542,2
Pret,rel (kN)	400	420	500	120	540
e (mm)	42,5	42,5	42,5	60	42,5
fc sub. (MPa)	45,9	45,9	45,8	41,9	41,3
fc ref. (MPa)	40	39,4	26,9	-	-

- [4] FERREIRA, D. B.. Análise experimental de pilares de concreto armado reforçados com concreto auto adensável e conectores. 199f. Dissertação (Mestrado), UFG, Goiânia, Goiás, 2014.
- [5] ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [6] BASTOS, P. S. d. S., Fundamentos do Concreto Armado, Bauru, São Paulo (UNESP), 2004, 107P. Notas de Aula.
- [7] OMAR, Mohamad Y.M. Análise experimental de pilares de concreto armado reforçados com concreto auto-adensável (CAA). Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.
- [8] NASCIMENTO, P. P. Análise experimental de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão, reforçados com concreto auto-adensável e conectores. 205f. Dissertação (Mestrado), UFG, Goiânia, Goiás, 2009.
- [9] ARAÚJO, L. M. B. Análise teórico experimental de pilares de concreto armado submetidos à flexão normal composta. 196f. Dissertação (Mestrado), UFG, Goiânia, 2004.
- [10] ADORNO, A. L. C. Análise Teórica e Experimental de Pilares em Concreto Simples e Armado sob Flexo-Compressão Reta. 399p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/UnB, Brasília, DF, 2004.
- [11] ABNT NBR 6152: Metais metálicos – Determinação das propriedades mecânicas à tração, Rio de Janeiro, 2002.
- [12] MELO, C. E. L. Análise Experimental e Numérica de Pilares Birrotulados de Concreto Armado Submetidos a Flexo-Compressão Normal. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/UnB, Brasília, DF, 2009.
- [13] ABNT NBR 15823: Concreto auto-adensável, Rio de Janeiro, 2010.
- [14] ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-prova, Rio de Janeiro, 2007.
- [15] ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007.
- [16] ABNT NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de Corpos-de-prova Cilíndricos, Rio de Janeiro, 2011.
- [17] ABNT NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, Rio de Janeiro, 2008.