



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL - EEC
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – CMEC

KEYLA FABRÍCIA PEREIRA SAHB

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PILARES DE CONCRETO
ARMADO SUBMETIDOS À FLEXO-COMPRESSÃO,
REFORÇADOS COM CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL E
CHUMBADORES**

Goiânia

2008

KEYLA FABRÍCIA PEREIRA SAHB

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PILARES DE CONCRETO
ARMADO SUBMETIDOS À FLEXO-COMPRESSÃO,
REFORÇADOS COM CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL E
CHUMBADORES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás – para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração:
Estruturas e Materiais de Construção

Orientador:
Prof. **Ronaldo Barros Gomes, Ph.D**

Co-Orientador:
Prof. **Ibrahim Abd El Malik Shehata, Ph.D**

Goiânia

2008

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)**

	Sahb, Keyla Fabrícia Pereira.
S131a	Análise experimental de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão, reforçados com concreto auto-adensável e chumbadores [manuscrito] / Keyla Fabrício Pereira Sahb. – 2008. 226 f. : il., figs., tabs., color.
	Orientador: Prof. Ph.D. Ronaldo Barros Gomes; Co-Orientador: Prof. Ph.D Ibrahim Abd El Malik Shehata.
2	Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2008.
3	Bibliografia: f. 175-179. Inclui lista de figuras, tabelas, símbolos, letras gregas e de abreviaturas. Apêndices.
4	1. Concreto armado – Análise estrutural 2. Pilares de concreto armado – Flexo-compressão 3. Concreto auto-adensável – Reforço estrutural 4. Chumbadores I. Gomes, Ronaldo Barros II. Shehata, Ibrahim Abd El Malik III. Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil . IV. Título.
5	
	CDU: 693.55

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PILARES DE CONCRETO ARMADO
SUBMETIDOS À FLEXO-COMPRESSÃO, REFORÇADOS COM
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL E CHUMBADORES**

KEYLA FABRÍCIA PEREIRA SAHB

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 28 de outubro de 2008, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Professor Ronaldo Barros Gomes, Ph.D (UFG)
(ORIENTADOR)

Professor Ibrahim Abd El Malik Shehata, Ph.D (COPPE/UFRJ)
(CO-ORIENTADOR)

Professor Enio José Pazini Figueiredo, D.Sc. (UFG)
(EXAMINADOR INTERNO)

Professor José Márcio Fonseca Calixto, Ph.D (UFMG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

Aos meus pais Milton e Dalva e irmãos
sempre presentes em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À DEUS, minha gratidão eterna, pela força, misericórdia e presença ao longo dessa jornada.

Ao Prof. Ronaldo Barros Gomes, pelo seu compromisso, disposição, competência e ajuda que se estendeu muito além do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Ibrahim Abd El Malik Shehata, pela colaboração e acompanhamento, sempre orientando de forma muito segura.

Aos professores e funcionários do CMEC/UFG, em especial ao Prof. Gilson Natal Guimarães pelos ensinamentos.

Ao amigo Carlos Squeff pela colaboração na revisão deste trabalho.

Ao amigo Carlos de Oliveira Campos, pelo apoio e incentivo em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis.

Ao Engº Reginaldo Porto em nome da Concreteira Realmix e Richilieu Miranda, da IMPERCIA S.A, que disponibilizaram parte dos materiais utilizados na pesquisa incentivando o desenvolvimento do curso de mestrado e do estado de Goiás.

Aos colaboradores da Empresa Carlos Campos Consultoria Ltda, pela ajuda na realização dos ensaios de caracterização do concreto.

À Universidade Católica de Goiás, na pessoa do Prof. Jose Sérgio dos Passos Oliveira e à FURNAS, pela colaboração nos ensaios de caracterização do aço.

Aos colegas do CMEC/UFG das turmas de 2005 a 2007, em especial: Murilo, Raphael, Elizandra, David e Ariovaldo, pela amizade e companheirismo.

Aos meus amigos e familiares que tanto colaboraram e muitas vezes compreenderam a minha ausência.

À sociedade brasileira que por meio do CNPq e o Procad/Capes disponibilizaram minha bolsa de estudos e financiaram os materiais necessários para a pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à EEC/UFG como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PILARES DE CONCRETO ARMADO
SUBMETIDOS À FLEXO-COMPRESSÃO, REFORÇADOS COM CONCRETO
AUTO-ADENSÁVEL E CHUMBADORES**

As estruturas de concreto armado estão sujeitas à interferência de diversos fatores que alteram sua estabilidade e seu desempenho podendo gerar a necessidade de intervenções e eventualmente reforço. Diversas são as técnicas de reforço que podem ser empregadas e, no caso dos pilares, o aumento da seção com concreto armado é bastante usual. Esse tipo de reforço exige o atendimento a requisitos que garantam a sua eficácia, dentre os quais se destacam em importância: o atendimento às necessidades e características de projeto; o adequado dimensionamento; e a aderência entre concretos de diferentes idades.

Apesar de o reforço de estruturas envolver situações de risco e, em muitos casos, ser oneroso e incerto, não existe no país uma normalização específica para seu projeto e execução; assim têm sido executados considerando as disposições normativas para projeto e execução de estruturas de concreto armado e em experiências pessoais.

Nesta pesquisa foi avaliado o comportamento de pilares de concreto armado solicitados à flexo-compressão reta, com uma seção inicial de 120 mm x 250 mm e altura de 2000 mm e reforçados na região comprimida com uma camada de 35 mm de concreto auto-adensável e chumbadores. Foi variada a quantidade de chumbadores e mantidas as demais variáveis como: as resistências dos concretos dos pilares originais e do reforço, a taxa de armadura inicial, a excentricidade de ensaio do carregamento, a espessura da camada de reforço e o método de preparação do substrato.

Os pilares reforçados apresentaram ganhos crescentes de carga com o aumento da quantidade de chumbadores utilizada na interface entre os concretos de diferentes idades. Foi observada melhora no desempenho da interface, retardando o deslocamento e em um dos casos, no pilar com maior quantidade de chumbadores, ocorrendo o deslocamento e esmagamento do concreto quase simultaneamente. Houve redução dos deslocamentos horizontais dos pilares, provocada pela diminuição da ductilidade. Estas evidências indicam que a técnica de reforço adotada se mostrou eficiente, promovendo melhor consolidação da seção composta.

Palavras-chave: Pilar. Reforço. Flexo-Compressão Reta. Concreto Auto-Adensável. Chumbadores.

SAHB, K. F. P. **Análise experimental de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão, reforçados com concreto auto-adensável e chumbadores.** 2008. 226 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFG. Goiânia, 2008.

Abstract of Dissertation presented to EEC/UFG as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS
SUBMITTED TO FLEXURAL COMPRESSION, STRENGTHENED SELF
COMPACT CONCRETE AND ANCHORS**

The reinforced concrete structures are subject to interference from many factors that affect its stability and its performance and may generate the need for interventions and eventual reinforcement. There are several techniques of enhancing that can be employed and in the case of columns, the increase of the section with reinforced concrete is quite usual. This type of enhancement requires the attendance requirements to ensure its effectiveness, among which stand out in importance: meeting the needs and characteristics of project, the appropriate sizing, and the adhesion between concrete of different ages.

Although the reinforcement of structures involve risk situations, and in many cases, are costly and uncertain, does not exist in the country a specific normalization for their specific design and implementation, thus they have been executed considering the normative disposals for project and execution of structures of armed concrete and in personal experiences.

This research was evaluated the behavior of reinforced concrete columns required to flexural compression, with an initial section of 120 mm x 250 mm and height of 2000 mm in the compressed section and enhanced with a layer of 35 mm of self compact concrete and anchors. Was varied the amount of anchors and kept the other variables such as the concrete strength of the original columns and the enhanced columns, the initial rate of reinforcement, the eccentricity of the load test, the thickness of the reinforcement and the preparation of the substratum method.

The strengthened columns had presented increasing load by increasing the amount of anchors used in the interface between the concrete of different ages. The improvement in the performance of the interface was observed, slowing the spitting and in one case, the column with a larger amount of anchors, with the crushing of concrete and spitting, almost simultaneously. There was a reduction of displacements caused by the decrease in ductility. These evidences indicate that the adopted technique of reinforcement if showed efficient, promoting consolidation of the composed section better.

Keywords: Column. Strengthening. Flexural Compression. Self Compacting Concrete. Anchors.

SAHB, K. F. P. **Experimental analysis of reinforced concrete columns submitted to flexural compression, strengthened with self compacting concrete and anchors.** 2008. 226 p. Dissertation (Master in Civil Engineering) - UFG. Goiânia, 2008.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	31
1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	31
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	33
1.3 OBJETIVOS.....	34
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	34
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE DIMENSIONAMENTO DE PILARES DE CONCRETO ARMADO.....	35
2.1.1 Prescrições da NBR 6118 (2003).....	40
2.1.2 Prescrições do ACI 318 (2008).....	43
2.1.3 Prescrições do EUROCODE 2 – Design of Concrete Structure (2007).....	44
2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE PILARES.....	45
2.3 TÉCNICAS E MATERIAIS PARA REFORÇO DE PILARES.....	47
2.3.1 Reforço com concreto.....	47
2.3.2 Reforço com o uso de elementos metálicos.....	48
2.3.3 Reforço com o uso de materiais compósitos.....	50
2.4 ADERÊNCIA ENTRE CONCRETOS.....	52
2.4.1 Transferência pela superfície de contato.....	53
2.4.2 Transferência pela armadura transversal à interface.....	54

2.4.3	Resistência da interface.....	55
2.4.4	Avaliação da resistência ao cortante na ligação entre concretos.....	56
2.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUNS MATERIAIS UTILIZADOS NO REFORÇO DE PILARES.....	58
2.5.1	Concreto auto-adensável (CAA)	58
2.5.2	Conectores de cisalhamento.....	63
2.6	ESTUDOS REALIZADOS SOBRE REFORÇO, ESPECIALMENTE EM PILARES.....	65
2.6.1	Pesquisa realizada por TAKEUTI (2003)	65
2.6.2	Pesquisa realizada por ZANATO <i>et al.</i> (2000)	69
2.6.3	Pesquisa realizada por CARRAZEDO (2002)	73
2.6.4	Pesquisa realizada por OMAR (2006)	75
2.6.5	Pesquisa realizada por RISSO (2008)	79
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
 CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....		83
3.1	CARACTERÍSTICAS DOS PILARES.....	83
3.1.1	Dimensões das peças.....	83
3.1.2	Armadura das peças.....	85
3.1.3	Chumbadores.....	87
3.1.4	Detalhes e nomenclatura dos pilares.....	89
3.2	MATERIAIS.....	92
3.2.1	Concreto convencional e concreto auto-adensável (CAA)	92
3.2.2	Aço.....	93

3.2.3	Chumbadores.....	93
3.3	INSTRUMENTAÇÃO.....	94
3.3.1	Instrumentação das armaduras.....	94
3.3.2	Instrumentação do concreto.....	95
3.3.3	Instrumentação para medição dos deslocamentos do pilar.....	97
3.3.4	Desenvolvimento das fissuras.....	98
3.4	PRODUÇÃO DOS PILARES.....	98
3.4.1	Preparação das formas.....	98
3.4.2	Montagem e moldagem dos pilares.....	99
3.5	REFORÇO DOS PILARES.....	100
3.5.1	Preparação do substrato.....	100
3.5.2	Fixação dos chumbadores e colagem dos extensômetros.....	102
3.5.3	Preparação para aplicação do reforço.....	103
3.5.4	Reforço.....	104
3.5.5	Reforço do consolo do pilar PB-R9-8.....	106
3.6	ENSAIO DOS PILARES.....	107
3.6.1	Elementos constituintes do ensaio.....	107
3.6.2	Posicionamento do pilar na estrutura de reação.....	110
	CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	112
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	112
4.1.1	Concreto.....	112
4.1.2	Aço.....	115

4.2	COMPORTAMENTO DOS PILARES.....	116
4.2.1	Deslocamentos horizontais e verticais.....	116
4.2.2	Deformações específicas nas armaduras.....	121
4.2.3	Deformações específicas no concreto.....	128
4.2.4	Formação e desenvolvimento das fissuras.....	134
4.2.5	Cargas e modos de ruptura.....	138
CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DE RESULTADOS.....		147
5.1	CARGA RESISTENTE E TAXA DE CHUMBADORES.....	147
5.2	DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	150
5.3	DEFORMAÇÕES DAS ARMADURAS LONGITUDINAIS.....	157
5.4	DEFORMAÇÕES NO CONCRETO.....	161
5.5	COMPORTAMENTO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS.....	163
5.6	RELAÇÃO MOMENTO FLETOR E CURVATURA.....	169
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....		171
6.1	CONCLUSÕES.....	171
6.1.1	Comportamento carga x deslocamento horizontal.....	171
6.1.2	Comportamento carga x deformação no aço situado na face tracionada ou menos comprimida.....	171
6.1.3	Comportamento carga x deformação no concreto.....	172
6.1.4	Modos de ruptura.....	172
6.1.5	Desempenho do concreto auto-adensável como reforço.....	173

6.1.6	Desempenho dos chumbadores.....	173
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	173
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	175
	APÊNDICE A – CÁLCULOS.....	180
	APÊNDICE B - CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL.....	184
	APÊNDICE C – DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS.....	188
	APÊNDICE D – MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DO SUBSTRATO.....	191
	APÊNDICE E – DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS E VERTICAIS.....	193
	APÊNDICE F – DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS E CONCRETO.....	205
	APÊNDICE G – DESLOCAMENTOS RELATIVOS.....	222

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 2

Figura 2.1	Situações de projeto de pilares (CLÍMACO, 2005).....	36
Figura 2.2	Dispositivos para proteção contra flambagem das barras (CLÍMACO, 2005).....	43
Figura 2.3	Configurações de reforço (adaptado de Takeuti, 1999).....	48
Figura 2.4	Reforço com elementos metálicos: (a) perfis e chapas metálicas (CÁNOVAS, 1988); e (b) jaquetas de aço (AKIMOTO; NAKAJIMA; KOGURE, 1990).....	49
Figura 2.5	Tipos de transferência: (a) por atrito entre superfícies; (b) Por ação mecânica no engrenamento entre agregados (adaptado de RISSO, 2008)...	53
Figura 2.6	Efeito pino (RISSO, 2008).....	54
Figura 2.7	<i>Slump Flow Test</i> (adaptado de GOMES, 2002).....	61
Figura 2.8	<i>L-Box Test</i> (adaptado de GOMES, 2002).....	61
Figura 2.9	<i>V-Funnel Test</i> (adaptado de TUTIKIAN, 2004).....	63
Figura 2.10	Tipos de mecanismo de transferência de cisalhamento por meio de conectores: (a) Pino-com-cabeça; (b) “shot-fired nails” (adaptado de JOHANSSON, 2002).....	64
Figura 2.11	Características do pilar de referência e reforçados (TAKEUTI, 1999).....	65
Figura 2.12	Esquema de ensaio (TAKEUTI, 1999).....	67
Figura 2.13	Detalhamento dos pilares de referência (ZANATO <i>et al.</i> , 2000).....	69
Figura 2.14	Detalhamento dos pilares reforçados, ZANATO <i>et al.</i> (2000).....	70
Figura 2.15	Detalhe da excentricidade adotada (ZANATO <i>et al.</i> , 2002).....	70

Figura 2.16	Esquema de ensaio (ZANATO <i>et al</i> , 2002).....	71
Figura 2.17	Seções dos pilares: (a) modelos circulares; (b) modelos quadrados (adaptado de CARRAZEDO, 2002).....	73
Figura 2.18	Detalhe do ensaio: (a) modelos circulares; (b) modelos quadrados (adaptado de CARRAZEDO, 2002).....	74
Figura 2.19	Características dos pilares ensaiados (OMAR, 2006).....	76
Figura 2.20	Seção Transversal das Peças Ensiadas (OMAR, 2006).....	77
Figura 2.21	Características dos modelos ensaiados (RISSO, 2008).....	80
Figura 2.22	Esquema de ensaio dos modelos, RISSO (2008).....	81

CAPÍTULO 3

Figura 3.1	Características dimensionais dos pilares.....	84
Figura 3.2	Características das seções transversais de todos os pilares.....	85
Figura 3.3	Detalhe das armaduras dos pilares.....	86
Figura 3.4	Detalhe da armadura de combate à retração.....	87
Figura 3.5	Componentes dos chumbadores.....	88
Figura 3.6	Detalhe para espaçamento entre chumbadores.....	88
Figura 3.7	Detalhe da colocação do chumbador.....	89
Figura 3.8	Planta de detalhamento dos pilares das séries PA e PB.....	90
Figura 3.9	Posicionamento dos extensômetros instalados nas armaduras.....	94
Figura 3.10	Instalação dos extensômetros nas armaduras.....	95
Figura 3.11	Posicionamento dos extensômetros instalados no concreto.....	96
Figura 3.12	Instalação dos extensômetros no concreto.....	96
Figura 3.13	Posicionamento dos relógios comparadores (R1 a R9).....	97
Figura 3.14	Instalação dos relógios comparadores.....	97

Figura 3.15	Detalhe das formas utilizadas.....	98
Figura 3.16	Detalhe dos espaçadores plásticos e dos grampos de travamento.....	99
Figura 3.17	Moldagem dos pilares.....	99
Figura 3.18	Preparação do substrato – escarificação manual.....	100
Figura 3.19	Marcação para medição da rugosidade.....	101
Figura 3.20	Processo de medição da rugosidade do substrato após escarificação.....	101
Figura 3.21	Fixação dos chumbadores.....	102
Figura 3.22	Instalação do extensômetro de concreto no substrato.....	103
Figura 3.23	Preparação para aplicação do reforço de CAA.....	103
Figura 3.24	Produção e caracterização reológica do CAA.....	104
Figura 3.25	Reforço dos pilares com CAA.....	106
Figura 3.26	Detalhe do projeto do reforço da região do consolo no pilar PB-R9-8.....	107
Figura 3.27	Reforço da região do consolo no pilar PB-R9-8.....	107
Figura 3.28	Esquema de ensaio dos pilares.....	108
Figura 3.29	Elementos constituintes do ensaio.....	109
Figura 3.30	Fotografia do esquema de ensaio dos modelos.....	111

CAPÍTULO 4

Figura 4.1	Diagramas de resistência à compressão dos concretos convencionais e auto-adensáveis.....	113
Figura 4.2	Diagramas de módulo de elasticidade dos concretos convencionais e auto-adensáveis.....	113
Figura 4.3	Diagramas de resistência à tração dos concretos convencionais e auto-adensáveis.....	114
Figura 4.4	Diagrama de tensão x deformação das barras de 5,0 mm de diâmetro.....	115
Figura 4.5	Diagrama de tensão x deformação das barras de 10,0 mm de diâmetro.....	116

Figura 4.6	Diagramas carga x deslocamento do pilar PA-Ref.....	117
Figura 4.7	Diagramas carga x deslocamento do pilar PA-M.....	118
Figura 4.8	Diagramas carga x deslocamento do pilar PA-R.....	118
Figura 4.9	Diagramas carga x deslocamento do pilar PA-R3.....	118
Figura 4.10	Diagramas carga x deslocamento do pilar PA-R5.....	119
Figura 4.11	Diagramas carga x deslocamento do pilar PA-R9.....	119
Figura 4.12	Diagramas carga x deslocamento do pilar PB-M.....	119
Figura 4.13	Diagramas carga x deslocamento do pilar PB-R5-4d.....	120
Figura 4.14	Diagramas carga x deslocamento do pilar PB-R9d.....	120
Figura 4.15	Diagramas carga x deslocamento do pilar PB-R9-8.....	120
Figura 4.16	Diagramas carga x deformação da armadura do pilar PA-Ref.....	122
Figura 4.17	Diagramas carga x deformação da armadura do pilar PA-M.....	122
Figura 4.18	Diagramas carga x deformação da armadura do pilar PA-R.....	123
Figura 4.19	Diagramas carga x deformação da armadura do pilar PA-R3.....	123
Figura 4.20	Diagramas carga x deformação da armadura do pilar PA-R5.....	124
Figura 4.21	Diagramas carga x deformação da armadura do pilar PA-R9.....	124
Figura 4.22	Diagramas carga x deformação da armadura do pilar PB-M.....	125
Figura 4.23	Diagramas carga x deformação da armadura do pilar PB-R5-4d.....	125
Figura 4.24	Diagramas carga x deformação da armadura do pilar PB-R9d.....	126
Figura 4.25	Diagramas carga x deformação da armadura do pilar PB-R9-8.....	126
Figura 4.26	Diagramas carga x deformação do concreto do pilar PA-Ref.....	128
Figura 4.27	Diagramas carga x deformação do concreto do pilar PA-M.....	129
Figura 4.28	Diagramas carga x deformação do concreto do pilar PA-R.....	129
Figura 4.29	Diagramas carga x deformação do concreto do pilar PA-R3.....	130

Figura 4.30	Diagramas carga x deformação do concreto do pilar PA-R5.....	130
Figura 4.31	Diagramas carga x deformação do concreto do pilar PA-R9.....	131
Figura 4.32	Diagramas carga x deformação do concreto do pilar PB-M.....	131
Figura 4.33	Diagramas carga x deformação do concreto do pilar PB-R5-4d.....	132
Figura 4.34	Diagramas carga x deformação do concreto do pilar PB-R9d.....	132
Figura 4.35	Diagramas carga x deformação do concreto do pilar PB-R9-8.....	133
Figura 4.36	Mapa de fissura dos pilares PA-Ref e PA-M.....	135
Figura 4.37	Mapa de fissura dos pilares PA-R e PA-R3.....	136
Figura 4.38	Mapa de fissura dos pilares PA-R5 e PA-R9.....	136
Figura 4.39	Mapa de fissura dos pilares PB-M e PB-R5-4d.....	137
Figura 4.40	Mapa de fissura dos pilares PB-R9d e PB-R9-8.....	137
Figura 4.41	Localização da ruptura nos pilares.....	141
Figura 4.42	Fotografia do pilar PA-Ref após a ruptura.....	142
Figura 4.43	Fotografia do pilar PA-M após a ruptura.....	142
Figura 4.44	Fotografia do pilar PA-R após a ruptura.....	143
Figura 4.45	Fotografia do pilar PA-R3 após a ruptura.....	143
Figura 4.46	Fotografia do pilar PA-R5 após a ruptura.....	144
Figura 4.47	Fotografia do pilar PA-R9 após a ruptura.....	144
Figura 4.48	Fotografia do pilar PB-M após a ruptura.....	145
Figura 4.49	Fotografia do pilar PB-R5-4d após a ruptura.....	145
Figura 4.50	Fotografia do pilar PB-R9d após a ruptura.....	146
Figura 4.51	Fotografia do pilar PB-9-8 após a ruptura.....	146

CAPÍTULO 5

Figura 5.1	Diagramas carga x taxa de chumbadores.....	149
Figura 5.2	Diagramas carga x deslocamento horizontal do pilar PA-Ref.....	150
Figura 5.3	Diagramas carga x deslocamento horizontal do pilar PA-M.....	151
Figura 5.4	Diagramas carga x deslocamento horizontal do pilar PA-R.....	151
Figura 5.5	Diagramas carga x deslocamento horizontal do pilar PA-R3.....	151
Figura 5.6	Diagramas carga x deslocamento horizontal do pilar PA-R5.....	152
Figura 5.7	Diagramas carga x deslocamento horizontal do pilar PA-R9.....	152
Figura 5.8	Diagramas carga x deslocamento horizontal do pilar PB-B.....	152
Figura 5.9	Diagramas carga x deslocamento horizontal do pilar PB-R5-4d.....	153
Figura 5.10	Diagramas carga x deslocamento horizontal do pilar PB-R9d.....	153
Figura 5.11	Diagramas carga x deslocamento horizontal do pilar PB-R9-8.....	153
Figura 5.12	Diagramas carga x deslocamento horizontal da face T a 100 kN.....	154
Figura 5.13	Diagramas carga x deslocamento horizontal da face T a 200 kN.....	155
Figura 5.14	Diagramas carga x deslocamento horizontal do relógio R3.....	155
Figura 5.15	Diagramas carga x deformação da armadura situada na face tracionada ou menos comprimida de todos os pilares.....	158
Figura 5.16	Diagramas carga x deformação da armadura situada na mais comprimida de todos os pilares.....	160
Figura 5.17	Diagramas carga x deformação do concreto comprimido.....	161
Figura 5.18	Deformações ao longo do plano médio da seção crítica (PA-Ref).....	164
Figura 5.19	Deformações ao longo do plano médio da seção crítica (PA-M).....	164
Figura 5.20	Deformações ao longo do plano médio da seção crítica (PA-R).....	165
Figura 5.21	Deformações ao longo do plano médio da seção crítica (PA-R3).....	165
Figura 5.22	Deformações ao longo do plano médio da seção crítica (PA-R5).....	166

Figura 5.23	Deformações ao longo do plano médio da seção crítica (PA-R9).....	166
Figura 5.24	Deformações ao longo do plano médio da seção crítica (PB-M).....	167
Figura 5.25	Deformações ao longo do plano médio da seção crítica (PB-R5-4d).....	167
Figura 5.26	Deformações ao longo do plano médio da seção crítica (PB-R9d).....	168
Figura 5.27	Deformações ao longo do plano médio da seção crítica (PB-R9-8).....	168
Figura 5.28	Diagramas Momento Fletor x Curvatura dos pilares.....	169

APÊNDICE A – CÁLCULOS

Figura A.1	Detalhe da mudança do centro de gravidade da seção composta e da excentricidade.....	180
------------	--	-----

APÊNDICE B - CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

Figura B.1	Diagramas de dosagem do CAA (ARAÚJO, 2007).....	184
Figura B.2	Detalhamento do equipamento <i>L-Box</i>	185
Figura B.3	Detalhamento do <i>V-Funnel</i>	186
Figura B.4	Detalhamento da comporta do <i>V-Funnel</i>	187

APÊNDICE G – DESLOCAMENTOS RELATIVOS

Figura G.1	Posicionamento dos potenciômetros (Pt1 a Pt4).....	222
Figura G.2	Instalação dos transdutores lineares.....	223
Figura G.3	Diagrama carga x deslocamento relativo entre substrato e reforço do pilar PA-R9.....	226
Figura G.4	Diagrama carga x deslocamento relativo entre substrato e reforço do pilar PB-R9-8.....	226

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1	Expressões propostas para a avaliação da resistência ao cisalhamento das ligações (adaptado de RISSO, 2008).....	57
Tabela 2.2	Recomendações dos ensaios para medição da trabalhabilidade do CAA (PETERSSEN, 1999).....	59
Tabela 2.3	Limites de resultados e dimensões para o <i>L-Box Test</i> , segundo diversas referências (TUTIKIAN, 2004).....	62
Tabela 2.4	Limites de resultados e dimensões para o <i>V-Funnel Test</i> segundo diversas referências (TUTIKIAN, 2004).....	63
Tabela 2.5	Descrição das séries de pilares (TAKEUTI, , 1999).....	66
Tabela 2.6	Cargas de ruptura dos pilares (TAKEUTI, , 1999).....	68
Tabela 2.7	Cargas de ruptura e incrementos de carga (ZANATO <i>et al</i> , 2002).....	72
Tabela 2.8	Principais características dos pilares ensaiados (OMAR, 2006).....	77
Tabela 2.9	Cargas e modos de ruptura (OMAR, 2006).....	78

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1	Principais características dos pilares ensaiados.....	89
Tabela 3.2	Descrição dos pilares ensaiados.....	91
Tabela 3.3	Proporção de materiais (CC e CAA) por m ³ de concreto.....	92
Tabela 3.4	Características dos chumbadores tipo AF (Âncora Chumbadores).....	93

Tabela 3.5	Medições do <i>L-Box Test</i>	105
Tabela 3.6	Medições do <i>V-Funnel 5 minTest</i>	105

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1	Resistência à compressão dos concretos na data dos ensaios.....	114
Tabela 4.2	Caracterização das armaduras.....	116
Tabela 4.3	Relação entre a carga de fissuração e ruptura.....	134
Tabela 4.4	Cargas e modo de ruptura.....	139

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1	Cargas relativas de ruptura.....	148
Tabela 5.2	Deslocamentos nas cargas de ruptura dos pilares.....	154
Tabela 5.3	Cargas de referência no estado limite de serviço (E.L.S.).....	156
Tabela 5.4	Deslocamento horizontal relativo entre os pilares reforçados e monolíticos e o pilar de referência PA-Ref.....	157
Tabela 5.5	Deformações da armadura na face tracionada ou menos comprimida dos pilares para as cargas de ruptura ou anterior a ela.....	158
Tabela 5.6	Deformações da armadura na face mais comprimida dos pilares para as cargas de ruptura ou anterior a ela.....	160
Tabela 5.7	Deformações no concreto comprimido dos pilares para as cargas de ruptura ou anterior a ela.....	162

APÊNDICE A – CÁLCULOS

Tabela A.1	Cálculo das taxas de armadura.....	182
------------	------------------------------------	-----

Tabela A.2	Determinação da taxa de chumbadores.....	183
------------	--	-----

APÊNDICE C – DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DOS CONCRETOS

Tabela C.1	Resistência à compressão do concreto convencional na data do ensaio.....	188
Tabela C.2	Resistência à compressão do concreto convencional – 1ª concretagem.....	189
Tabela C.3	Resistência à compressão do concreto convencional – 2ª concretagem.....	189
Tabela C.4	Resistência à compressão do CAA – 1ª concretagem.....	190
Tabela C.5	Resistência à compressão do CAA – 2ª concretagem.....	190

APÊNDICE D – MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DO SUBSTRATO

Tabela D.1	Medições das profundidades da rugosidade do pilar PA-R.....	191
Tabela D.2	Medições das profundidades da rugosidade do pilar PB-R9-8.....	192

APÊNDICE E – DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS E VERTICAIS

Tabela E.1	Deslocamentos horizontais e verticais de PA-Ref.....	193
Tabela E.2	Deslocamentos horizontais e verticais de PA-R.....	194
Tabela E.3	Deslocamentos horizontais e verticais de PA-M.....	195
Tabela E.4	Deslocamentos horizontais e verticais de PA-R3.....	196
Tabela E.5	Deslocamentos horizontais e verticais de PA-R5.....	198
Tabela E.6	Deslocamentos horizontais e verticais de PA-R9.....	200
Tabela E.7	Deslocamentos horizontais e verticais de PB-M.....	201
Tabela E.8	Deslocamentos horizontais e verticais de PB-R5-4d.....	202

Tabela E.9	Deslocamentos horizontais e verticais de PB-R9d.....	202
Tabela E.10	Deslocamentos horizontais e verticais de PB-R9-8.....	203
Tabela E.11	Deslocamentos horizontais e verticais de PC35 e PC45T10.....	204

APÊNDICE F – DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS E CONCRETO

Tabela F.1	Deformações nas armaduras e concreto do pilar PA-Ref.....	205
Tabela F.2	Deformações nas armaduras e concreto do pilar PA-R.....	206
Tabela F.3	Deformações nas armaduras e concreto do pilar PA-M.....	208
Tabela F.4	Deformações nas armaduras e concreto do pilar PA-R3.....	210
Tabela F.5	Deformações nas armaduras e concreto do pilar PA-R5.....	212
Tabela F.6	Deformações nas armaduras e concreto do pilar PA-R9.....	215
Tabela F.7	Deformações nas armaduras e concreto do pilar PB-M	217
Tabela F.8	Deformações nas armaduras e concreto do pilar PB-R5-4d	218
Tabela F.9	Deformações nas armaduras e concreto do pilar PB-9d.....	219
Tabela F.10	Deformações nas armaduras e concreto do pilar PB-9-8.....	219
Tabela F.11	Deformações nas armaduras e concreto do pilar PC35 e PC45T10.....	221

APÊNDICE G – DESLOCAMENTOS RELATIVOS

Tabela G.1	Deslocamentos horizontais e verticais de PA-R9.....	224
Tabela G.2	Deslocamentos horizontais e verticais de PA-R9-8.....	225

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção cheia
A_c	Área da seção transversal de concreto comprimido
A_{ch}	Área de chumbadores
A_{int}	Área da interface entre substrato e reforço
A_s	Área total da armadura longitudinal
$A_{s,min}$	Área mínima de armadura longitudinal
$A_{s,máx}$	Área máxima de armadura longitudinal
A_{sr}	Área da barra de aço de referência
b	Menor dimensão do pilar
d	Deslizamento relativo na interface
$d_{máx.agreg}$	Diâmetro máximo do agregado
DL	Deslocamento limite (NBR 6118:2003) em “mm”
D_p	Deslocamento horizontal do pilar em “mm”
e_a	Excentricidade acidental
e_{cc}	Excentricidade adicional – devido ao fenômeno de fluência
e_{ens}	Excentricidade de aplicação do carregamento na estrutura indeformada
e_{inic}	Excentricidade inicial – antes do reforço
e_{min}	Espaçamento mínimo livre entre as faces das barras longitudinais
$e_{máx}$	Espaçamento máximo entre eixos das barras longitudinais ou do centro de feixes de barras
e_1	Excentricidade inicial (de 1ª ordem) – não inclui a excentricidade acidental
e_2	Excentricidade de segunda ordem
E_c	Módulo de elasticidade longitudinal do concreto
E_c^{sub}	Módulo de elasticidade longitudinal do concreto do substrato

E_c^{ref}	Módulo de elasticidade longitudinal do concreto do reforço
E_{ref}	Espessura da camada de reforço com CAA
E_s	Módulo de elasticidade do aço
f_c	Resistência média à compressão do concreto
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{ct}	Resistência média à tração do concreto por compressão diametral
f_c^{sub}	Resistência do concreto do substrato
f_c^{ref}	Resistência do concreto do reforço
f_y	Tensão de início de escoamento da armadura
f_{yd}	Resistência de cálculo de início de escoamento do aço
$f_y(ch)$	Tensão de escoamento do chumbador, adotada igual a 500 MPa
f_{yk}	Resistência à tração característica do aço
F	Fissura observada
GPa	Giga Pascal
h	altura da seção transversal do pilar na direção considerada
$h1$	Altura que o concreto permanece no início da caixa L
$h2$	Altura que o concreto atinge na extremidade da caixa L
i	Raio de giração do pilar
I	Momento de inércia
l	Distância entre os eixos dos elementos estruturais que o pilar está vinculado
l_e	Comprimento equivalente do pilar
l_0	Distância entre as faces internas dos elementos estruturais, supostos horizontais, que vinculam o pilar
LT	Comprimento total da barra de aço
M_{atuante}	Momento atuante no pilar – calculado por dados experimentais
M_A	Maior momento de 1ª ordem em valor absoluto ao longo do pilar biapoiado

M_B	Menor momento de 1ª ordem em valor absoluto ao longo do pilar biapoiado
M_C	Momento de 1ª ordem no meio de um pilar em balanço
M_{eng}	momento de engastamento perfeito do vão extremo da viga
M_x	Momento na direção x
M_y	Momento na direção y
M_{vig}	Momento na viga
M_{sup}	Momento no engaste superior de um pilar bi-rotulado
M_{inf}	Momento no engaste inferior de um pilar bi-rotulado
$M_{1d,min}$	Momento total de 1ª ordem de cálculo mínimo que possibilita o atendimento da verificação das imperfeições localizadas de um lance de pilar
n	Número de barras no feixe de barras
N	Força ou carga normal
N_d	Força normal de cálculo
N_{sd}	Força normal solicitante de cálculo na seção
P	Carga aplicada
P_{DL}	Carga experimental atuante no pilar quando este atinge o deslocamento limite (NBR 6118:2003)
P_{fiss}	Carga em que foi observada visualmente a primeira fissura
$P_{f,visual}$	Carga da 1ª fissura observada visualmente
$P_{f,gráf}$	Carga de fissuração determinada através da curva carga x deslocamento horizontal de cada pilar
P_i	Carga em que foi observada a fissura
P_u	Carga de ruptura do pilar
r_{inf}	Rigidez de tramo inferior de pilar em uma ligação tramo inferior de pilar-viga-tramo superior de pilar
r_{sup}	Rigidez de tramo superior de pilar em uma ligação tramo inferior de pilar-viga-tramo superior de pilar
r_{vig}	Rigidez de uma viga em uma ligação tramo inferior de pilar-viga-tramo

	superior de pilar
<i>RB</i>	Relação de bloqueio
<i>R^{fiss}</i>	Relação entre a carga de fissuração e a carga de ruptura
<i>s_{máx}</i>	Espaçamento máximo entre estribos
<i>T_{ch}</i>	Taxa de chumbadores
<i>T₂₀</i>	Leitura do tempo em que o concreto atinge a marcação de 20 cm da caixa L
<i>T₄₀</i>	Leitura do tempo em que o concreto atinge a marcação de 40 cm da caixa L
<i>w</i>	Afastamento entre concretos diferentes

LETRAS GREGAS

α_b	Parâmetro de instabilidade
ε_c	Deformação específica do concreto
ε_s	Deformação específica do aço
$\varepsilon_c máx$	Deformação máxima registrada no concreto comprimido
$\varepsilon_s máx$	Deformação máxima registrada nas barras situadas na face tracionada ou menos comprimida
ε_y	Deformação específica de início de escoamento do aço
ε^*_y	Deformação específica de escoamento do aço correspondente ao Diagramas tensão-deformação simplificado
ε_u	Deformação específica de esmagamento do concreto adotado pelo ACI 318M-02
ϕ	Diâmetro
ϕ_{feixe}	Diâmetro do feixe de barras
ϕ_l	Diâmetro da barra longitudinal
ϕ_t	Diâmetros de barra transversal
Φ	Curvatura da seção
γ_n	Coefficiente adicional de majoração da carga
λ	Índice de esbeltez do pilar
λ_1	Valor limite para índice de esbeltez (contempla excentricidade acidental do pilar)
μ_a	Coefficiente de atrito interno
μ	Coefficiente de correção da tensão cisalhante teórica
v	Força normal reduzida de cálculo
ρ	Taxa de armadura longitudinal
ρ_w	Taxa geométrica da armadura transversal à ligação
ρ_{inic}	Taxa de armadura longitudinal inicial (antes do reforço)
ρ_{fin}	Taxa de armadura da seção composta, após o acréscimo da camada de 35 mm de concreto auto-adensável e da armadura de combate à retração
σ_{sr}	Tensão de escoamento do aço para a deformação registrada nas cargas de referência
$\tau_{teórica}$	Tensão cisalhante teórica
τ_{exp}	Tensão cisalhante experimental
τ_u	Resistência média de ruptura ao cisalhamento horizontal

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Face lateral do pilar
C	Face mais comprimida do pilar
CAA	Concreto auto-adensável
C.A.M	Carga média de arrancamento
CC	Concreto convencional
CEB	Comite Euro-International du Beton
CP	Corpo-de-prova
CP-V – ARI	Cimento Portland – de Alta Resistência Inicial
C.R.C	Carga de resistência ao cisalhamento
D	Face lateral do pilar
DMC	Dimensão Máxima Característica
DR	Deslocamento do reforço
EA	Escoamento do aço
EC	Esmagamento do concreto
EEC	Escola de Engenharia Civil
E.L.S.	Estado Limite de Serviço
MF	Módulo de Finura
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology – USA</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
R	Relógio Comparador
T	Face tracionada ou menos comprimida do pilar
UFG	Universidade Federal de Goiás
UnB	Universidade de Brasília