

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Walter Edgley de Oliveira**

**Estudo experimental da influência do cobrimento na interação  
aço-concreto em elementos sujeitos à compressão**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Giuseppe Barbosa Guimarães

Rio de Janeiro  
Agosto de 2008



**Walter Edgley de Oliveira**

**Estudo experimental da influência do cobrimento na  
interação aço-concreto em elementos sujeitos à compressão**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Profa. Cláudia Maria O. Campos**

Universidade Estácio de Sá

**Prof. Emil de Souza Sánchez Filho**

UFF

**Profa. Lídia da Conceição D. Shehata**

UFRJ

**Profa. Marta de Souza Lima Velasco**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de agosto de 2008.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Walter Edgley de Oliveira**

Graduou-se em Engenharia Civil na UFPB (Universidade Federal da Paraíba). Na UFPB, participou de programas de Monitorias e de Iniciação Científica nas áreas de Informática e Engenharia Civil. Na PUC-Rio desenvolveu seu trabalho de pesquisa com ênfase em Análise Experimental de Estruturas, obtendo o grau de Mestre em Engenharia Civil. Atualmente exerce o cargo de Pesquisador em Propriedade Industrial na Divisão de Engenharia Civil do Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI.

### Ficha Catalográfica

Oliveira, Walter Edgley de

Estudo experimental da influência do cobrimento na interação aço-concreto em elementos sujeitos à compressão / Walter Edgley de Oliveira; orientador: Giuseppe Barbosa Guimarães. – 2009.

182 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Pilares. 3. Tensão de aderência. 4. Cobrimento. 5. Emendas por traspasse. I. Guimarães, Giuseppe Barbosa. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Iracy Maria e Sebastião, e  
a minha esposa Ednalva.

## Agradecimentos

Agradeço inicialmente a Deus, pela minha existência e por tudo que me permitiu conquistar.

À minha família, especialmente minha esposa, pelo apoio, incentivo e carinho em todos os momentos.

Ao professor Giuseppe Barbosa Guimarães, pela orientação e apoio recebidos, e também pela amizade mostrada ao longo da realização deste trabalho.

Aos colegas da Pós-Graduação, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil. Em especial aos funcionários do Laboratório de Estruturas e Materiais, pelo apoio e colaboração.

A todas as pessoas que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho. Em especial aos amigos Magnus Meira, Igor Otiniano, Vivianne Cardoso, Evandro Bastos, Cláudia Pacheco, Alex Almeida e Sandoval Quaresma, pelo companheirismo.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

## Resumo

Oliveira, Walter Edgley de; Guimarães, Giuseppe Barbosa. **Estudo experimental da influência do cobrimento na interação aço-concreto em elementos sujeitos à compressão.** Rio de Janeiro, 2008. 182p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho trata da influência do cobrimento da armadura longitudinal sobre a resistência de aderência em regiões de emenda por traspasse de elementos de concreto armado comprimidos. Neste estudo foram ensaiados dezoito pilares de concreto armado com seção transversal de 200 mm x 150 mm e comprimento de 1100 mm, com armadura longitudinal composta de barras de aço CA-50 com diâmetro nominal de 12,5 mm e estribos de 5 mm. O arranjo da armadura longitudinal definiu três séries de pilares, sendo a *Série 1* composta por seis pilares com a armadura longitudinal contínua, e as *Séries 2 e 3* cada uma composta por seis pilares com a armadura longitudinal, tendo uma emenda por traspasse localizada na região da metade da altura do pilar de 470 cm e 235 mm de comprimento, respectivamente. Os ensaios consistiram na aplicação de uma força de compressão com uma excentricidade de 20 mm, sendo tal excentricidade aplicada apenas na direção da menor dimensão da seção transversal. Para os seis pilares de cada série o cobrimento da armadura longitudinal variou de 25 mm até que a metade do diâmetro da barra longitudinal ficasse exposta. Os resultados obtidos indicam que a influência do cobrimento sobre a capacidade do pilar resistir às solicitações torna-se visível quando a relação  $c/\phi$  da espessura do cobrimento  $c$  e do diâmetro da barra  $\phi$  é inferior a 0,4. Para pilares com barras emendadas por traspasse e com armadura exposta até a metade de seu diâmetro, a aderência na zona da emenda foi substancialmente afetada, provocando a ruptura do pilar sob forças inferiores às alcançadas em pilares com cobrimento adequado.

## Palavras-chave

Pilares; tensão de aderência; cobrimento; emendas por traspasse.

## Abstract

Oliveira, Walter Edgley de; Guimarães, Giuseppe Barbosa. **Experimental study on the influence of concrete cover on the interaction between steel bars and concrete in elements subjected to compression.** Rio de Janeiro, 2008. 182p. D.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work describes the influence of the concrete cover of the longitudinal reinforcement on the bond strength along the overlapping splice zones of compressed elements. Tests have been carried out on eighteen reinforced concrete columns, with cross section of 200 mm x 150 mm and 1100 mm of length. The longitudinal reinforcement consisted of CA-50 steel bars with nominal diameter of 12,5 mm and stirrups of 5 mm. Three series of columns (*Serie 1, Serie 2 and Serie 3*) were defined according to the arrangements of the longitudinal reinforcement: *Serie 1* composed by six columns with continuous longitudinal reinforcement; *Serie 2 and 3* composed by six columns each, presenting an overlapping splice of 470 mm and 235 mm of length, respectively. The columns were submitted to a load applied with an eccentricity of 20 mm in the direction of the smallest dimension of the cross section. In each series, the concrete cover varied from 25 mm to a value corresponding to the situation in which half of the diameter of the longitudinal bar was exposed. The results showed that the influence of the concrete cover on the column strength becomes relevant when the ratio  $c/\phi$  of the cover thickness  $c$  to the bar diameter  $\phi$  is less than 0,4. For columns with overlapping splice and reinforcement exposed up to the half of diameter, the bond along the overlapping zone has been substantially affected, resulting in the column failure at lower loads when compared to columns with proper value of concrete cover.

## Keywords

Columns; bond stress; concrete cover; overlapping splice.

# Sumário

1	Introdução	24
1.1.	Objetivo	25
1.2.	Conteúdo do trabalho	25
2	Revisão bibliográfica	27
2.1.	Aderência entre barras de aço e concreto	27
2.2.	Mecanismos envolvidos na aderência	28
2.2.1.	Aderência por adesão química	29
2.2.2.	Aderência por atrito	30
2.2.3.	Aderência mecânica	30
2.3.	Mobilização da aderência	32
2.4.	Modos de ruptura da aderência	35
2.5.	Principais fatores que influenciam a aderência	38
2.5.1.	Efeitos de confinamento	38
2.5.2.	Influência das emendas por traspasse	45
2.6.	Comportamento da aderência ao longo da ancoragem	47
2.7.	Modelo analítico proposto por TASSIOS (1979)	48
2.8.	Ensaio para a determinação da resistência de aderência	51
2.9.	Determinação da resistência de aderência de cálculo	53
3	Estudo experimental	55
3.1.	Confecção dos Pilares	55
3.1.1.	Armaduras	57
3.1.2.	Resistência à compressão da armadura longitudinal	57
3.1.3.	Formas	60
3.1.4.	Posicionamento da armadura na forma e cobrimento	61
3.1.5.	Instrumentação	65
3.1.6.	Concreto	71
3.1.7.	Resistência do concreto	72
3.1.8.	Sistema de aquisição de dados	74
3.1.9.	Sistema de aplicação de forças	76

4 Apresentação e análise dos resultados	80
4.1. Modos de ruptura	80
4.1.1. Pilares da <i>Série 1</i> : armadura longitudinal contínua	83
4.1.2. Pilares da <i>Série 2</i> : armadura longitudinal com emenda de 470 mm	90
4.1.3. Pilares da <i>Série 3</i> : armadura longitudinal com emenda de 235 mm	96
4.2. Curvas força vs. deformação específica e força vs. deslocamento	102
4.2.1. Pilares da <i>Série 1</i> : armadura longitudinal contínua	103
4.2.2. Pilares da <i>Série 2</i> : armadura longitudinal com emenda de 470 mm	106
4.2.3. Pilares da <i>Série 3</i> : armadura longitudinal com emenda de 235 mm	115
4.3. Comparação entre os resultados experimentais e os valores teóricos	123
4.4. Tensão de aderência ao longo da emenda	125
4.5. Comparação da tensão normal na ponta e no início da emenda	139
4.6. Comparação da Tensão de Aderência Média Experimental com a Resistência de Aderência segundo a NBR 6118: 2003	140
5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	141
5.1. Conclusões	141
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	142
6 Referências	144
A ANEXO A: Gráficos força vs. deformação nas armaduras	147
A.1. Deformação longitudinal nas armaduras ao longo da emenda	147
B ANEXO B: Modelo numérico	156
B.1.1. Sobre o Ansys	156
B.1.2. Problemas de contato no Ansys	157
B.1.3. Tipo de elementos finitos do ANSYS utilizados nos modelos	159
B.1.4. Parâmetros usados para os materiais	164
B.1.5. Descrição dos modelos analisados	165
B.1.6. Apresentação e avaliação dos resultados dos modelos numéricos	169
B.1.7. Considerações sobre a análise numérica	182

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Aderência por adesão.	29
Figura 2.2 – Aderência por atrito (FUSCO, 1995).	30
Figura 2.3 – Aderência mecânica (FUSCO, 1995).	31
Figura 2.4 – Áreas possíveis de ruptura dos consolos de concreto entre nervuras em uma barra ideal com nervuras anulares (REHM, 1969).	32
Figura 2.5 – Fissuração por tração (FUSCO, 1995).	33
Figura 2.6 – Fissuração estabilizada (FUSCO, 1995).	34
Figura 2.7 – Microfissuras em um elemento de concreto com barra nervurada sob tração centrada (Adaptada de GOTO, 1971).	35
Figura 2.8 – Ruptura da aderência por fendilhamento em concreto não-confinado.	36
Figura 2.9 – Ruptura da aderência por arrancamento em concreto confinado.	36
Figura 2.10 – Esquema do fendilhamento longitudinal do concreto.	37
Figura 2.11 – Esquema da transferência de tensões por aderência.	37
Figura 2.12 – Geometria dos pilares das séries 1 e 2 (QUINTANA, 2005).	39
Figura 2.13 – Razões $\bar{\tau}_{mexp}/f_{ct}$ vs. $c/\phi$ e $f_b/f_{ct}$ vs. $c/\phi$ (QUINTANA, 2005).	40
Figura 2.14 – Contribuição da armadura de confinamento na aderência vs. deslizamento de barras nervuradas (SOROUSHIAN et al, 1991).	43
Figura 2.15 – Influência da resistência à compressão na aderência vs. deslizamento de barras nervuradas em concreto confinado (SOROUSHIAN et al, 1991).	44
Figura 2.16 – Bielas diagonais comprimidas de concreto nas emendas comprimidas (superior) e tracionadas (inferior).	45
Figura 2.17 – Ruptura de uma emenda comprimida causada pela tensão nas pontas (PARK & PAULAY, 1975).	46
Figura 2.18 – Curva teórica tensão de aderência vs. deslizamento (TASSIOS, 1979).	48
Figura 2.19 – Tensões entre fissuras transversais consecutivas (TASSIOS, 1979).	49
Figura 2.20 – Fissuras transversais e de fendilhamento (TASSIOS,	

1979).	50
Figura 2.21 – Provável estágio de ruptura da aderência para concreto confinado e barra nervurada (TASSIOS, 1979).	51
Figura 2.22 – Suposição do mecanismo da resistência de aderência residual.	51
Figura 2.23 – Corpo-de-prova para o ensaio de arrancamento.	52
Figura 3.1 – Seção transversal típica dos pilares com emenda: seção $L/2$ (cotas em mm).	55
Figura 3.2 – Vista longitudinal do pilar (vista da <i>Face A</i> da Figura 3.1).	56
Figura 3.3 – Detalhamento das armaduras utilizadas nas três séries de pilar: <i>Série 1</i> – armaduras sem emenda, <i>Série 2</i> – emenda por traspasse de 470 mm e <i>Série 3</i> – emenda de 235 mm de comprimento (vista da <i>Face A</i> da Figura 3.1).	58
Figura 3.4 – Corpo-de-prova utilizado na determinação da curva tensão vs. deformação específica do aço.	59
Figura 3.5 – Curva tensão vs. deformação específica longitudinal média do aço sob compressão.	59
Figura 3.6 – Formas usadas na confecção dos pilares (seção transversal).	60
Figura 3.7 – Formas usadas na confecção dos pilares (durante a concretagem).	60
Figura 3.8 – Detalhamento dos pilares com espessura de cobertura de 25, 20 e 10 mm (vista da <i>Face E</i> da Figura 3.1).	62
Figura 3.9 – Detalhamento dos pilares com espessura de cobertura de 5, 0 e -6,25 mm (vista da <i>Face E</i> da Figura 3.1).	63
Figura 3.10 – Detalhe dos pinos utilizados para a obtenção de uma determinada espessura de cobertura.	64
Figura 3.11 – Pilar confeccionado com metade do diâmetro da armadura longitudinal para fora da <i>Face A</i> (P1-AE)	64
Figura 3.12 – Armaduras sendo lixadas com a utilização de uma lixadeira elétrica (a) e regiões já lixadas para a futura colagem dos extensômetros elétricos (b).	65
Figura 3.13 – Posicionamento dos extensômetros em relação a seção transversal do pilar: (a) pilares da <i>Série 1</i> e (b) pilares das <i>Séries 2</i> e <i>3</i> .	66
Figura 3.14 – Posicionamento dos extensômetros nas barras dos pilares com emenda ( <i>Série 2</i> ).	67

Figura 3.15 – Posicionamento dos extensômetros com relação a direção longitudinal dos pilares das Séries 2 e 3 (dimensões em mm).	68
Figura 3.16 – Preparação dos extensômetros elétricos para uso em aço.	68
Figura 3.17 – Etapas de colagem dos extensômetros elétricos para uso em aço.	69
Figura 3.18 – Transdutor de pressão conectado ao sistema hidráulico do atuador.	70
Figura 3.19 – Extensômetros elétricos para medição das deformações específicas no concreto.	70
Figura 3.20 – Réguas de deslocamento linear para medição dos deslocamento laterais.	71
Figura 3.21 – Modo de ruptura do corpos-de-prova na determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de concreto.	74
Figura 3.22 – Moldagem de corpo corpos-de-prova cilíndricos da 5ª betonada.	75
Figura 3.23 – Vista do sistema de aquisição de dados, (a) conexão do transdutor de pressão, (b) conexão das RDL e (c) conexão dos extensômetros.	75
Figura 3.24 – Sistema de aplicação de força nos pilares ( <i>plano XY</i> ).	76
Figura 3.25 – Sistema de aplicação de força nos pilares ( <i>plano YZ</i> ).	77
Figura 3.26 – Sistema de aplicação de força nos pilares (perspectiva).	77
Figura 3.27 – Montagem do sistema de aplicação de força nos pilares.	78
Figura 3.28 – Ruptura prematura das extremidades do pilar P2-25 durante o primeiro ensaio.	79
Figura 3.29 – Etapa de reforço das extremidades dos pilares.	79
Figura 4.1 – Detalhe da vista da Face E do pilar mostrando o eixo da força.	82
Figura 4.2 – Alinhamento dos extensômetros no aço e no concreto para <i>Série 1</i> .	83
Figura 4.3 – Pilar P1-25 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> em perspectiva, (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.	85
Figura 4.4 – Pilar P1-20 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> em perspectiva, (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.	86

Figura 4.5 – Pilar P1-10 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.	86
Figura 4.6 – Pilar P1-05 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.	87
Figura 4.7 – Pilar P1-00 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.	87
Figura 4.8 – Pilar P1-AE após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes mostrando o local da ruptura.	88
Figura 4.9 – Deformações específicas na seção média dos pilares da <i>Série 1</i> para quatro níveis de solicitações.	89
Figura 4.10 – Pilar P2-25 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes da parte inferior da emenda.	91
Figura 4.11 – Pilar P2-20 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes da parte superior da emenda.	92
Figura 4.12 – Pilar P2-10 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes da parte superior da emenda.	92
Figura 4.13 – Pilar P2-05 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes da parte inferior da emenda.	93
Figura 4.14 – Pilar P2-00 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) detalhe da região da emenda.	93
Figura 4.15 – Pilar P2-AE após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.	94
Figura 4.16 – Deformações específicas na seção média dos pilares da <i>Série 2</i> para quatro níveis de solicitação.	95
Figura 4.17 – Pilar P3-25 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.	97

Figura 4.18 – Pilar P3-20 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.	97
Figura 4.19 – Pilar P3-10 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.	98
Figura 4.20 – Pilar P3-05 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.	98
Figura 4.21 – Pilar P3-00 após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.	99
Figura 4.22 – Pilar P3-AE após ruptura: (a) vista da <i>Face E</i> , (b) vista da <i>Face D</i> , (c) vista da <i>Face A</i> , (d) e (e) detalhes das partes superior e inferior da emenda.	99
Figura 4.23 – Deformações específicas na seção média dos pilares da <i>Série 3</i> para quatro níveis de força.	101
Figura 4.24 – Deslocamento transversal no pilar.	102
Figura 4.25 – Curvas força vs. deformação específica do concreto para os pilares da <i>Série 1</i> .	104
Figura 4.26 – Curvas força vs. deformação específica do concreto do pilar P1-25.	104
Figura 4.27 – Curvas força vs. deformação específica para as armaduras longitudinais dos pilares da <i>Série 1</i> .	105
Figura 4.28 – Curvas força vs. deformação específica para as armaduras longitudinais do pilar P1-25.	105
Figura 4.29 – Curvas força vs. deslocamento transversal para os pilares da <i>Série 1</i> .	106
Figura 4.30 – Curvas força vs. deformação específica do concreto para os pilares da <i>Série 2</i> .	108
Figura 4.31 – Pilar P2-25: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	109
Figura 4.32 – Pilar P2-25: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	109
Figura 4.33 – Pilar P2-20: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	110

Figura 4.34 – Pilar P2-20: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	110
Figura 4.35 – Pilar P2-10: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	111
Figura 4.36 – Pilar P2-10: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	111
Figura 4.37 – Pilar P2-05: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	112
Figura 4.38 – Pilar P2-05: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	112
Figura 4.39 – Pilar P2-00: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	113
Figura 4.40 – Pilar P2-00: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	113
Figura 4.41 – Pilar P2-AE: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	114
Figura 4.42 – Pilar P2-AE: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	114
Figura 4.43 – Curvas força vs. deslocamento transversal para os pilares da Série 2.	115
Figura 4.44 – Curvas força vs. deformação específica do concreto para os pilares da Série 3.	116
Figura 4.45 – Pilar P3-25: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	117
Figura 4.46 – Pilar P3-25: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	117
Figura 4.47 – Pilar P3-20: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	118
Figura 4.48 – Pilar P3-20: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	118
Figura 4.49 – Pilar P3-10: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	119
Figura 4.50 – Pilar P3-10: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	119
Figura 4.51 – Pilar P3-05: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	120

Figura 4.52 – Pilar P3-05: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	120
Figura 4.53 – Pilar P3-00: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	121
Figura 4.54 – Pilar P3-00: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	121
Figura 4.55 – Pilar P3-AE: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face D</i> .	122
Figura 4.56 – Pilar P3-AE: Curva força vs. deformação específica longitudinal ao longo da emenda localizada na <i>Face E</i> .	122
Figura 4.57 – Curvas força vs. deslocamento transversal para os pilares da Série 2.	123
Figura 4.58 – Força de ruptura normalizada $v_{m\acute{a}x}$ vs. espessura de cobrimento.	125
Figura 4.59 – Tensão de aderência ao longo da emenda para os pilares da Série 2 para armadura da <i>Face D</i> .	127
Figura 4.60 – Tensão de aderência ao longo da emenda para os pilares da Série 2: para armadura da <i>Face E</i> .	128
Figura 4.61 – Razão $\tau_m/f_{ct}$ vs $c/\phi$ dos pilares da <i>Série 2</i> , para armadura da <i>Face D</i> .	129
Figura 4.62 – Razão $\tau_m/f_{ct}$ vs $c/\phi$ dos pilares da <i>Série 2</i> , para armadura da <i>Face E</i> .	129
Figura 4.63 – Razão $\tau_{MAX}/f_{ct}$ vs $c/\phi$ dos pilares da <i>Série 2</i> para armadura da <i>Face D</i> .	130
Figura 4.64 – Razão $\tau_{MAX}/f_{ct}$ vs $c/\phi$ dos pilares da <i>Série 2</i> para armadura da <i>Face E</i> .	130
Figura 4.65 – Tensão de aderência ao longo da emenda dos pilares da <i>Série 3</i> para armadura da <i>Face D</i> .	131
Figura 4.66 – Tensão de aderência ao longo da emenda dos pilares da <i>Série 3</i> para armadura da <i>Face E</i> .	132
Figura 4.67 – Razão $\tau_m/f_{ct}$ vs $c/\phi$ dos pilares da <i>Série 3</i> , para armadura da <i>Face D</i> .	133
Figura 4.68 – Razão $\tau_m/f_{ct}$ vs $c/\phi$ dos pilares da <i>Série 3</i> , para armadura da <i>Face E</i> .	133
Figura 4.69 – Razão $\tau_{MAX}/f_{ct}$ vs $c/\phi$ dos pilares da <i>Série 3</i> , para armadura da <i>Face D</i> .	134

Figura 4.70 – Razão $\tau_{MAX}/f_{ct}$ vs $c/\phi$ dos pilares da <i>Série 3</i> , para armadura da <i>Face E</i> .	134
Figura 4.71 – Razão $\tau_m/f_{ct}$ vs. $c/\phi$ dos pilares da <i>Série 2 e 3</i> , para as forças de ruptura por aderência.	137
Figura 4.72 – Deformação no <i>Ext5</i> vs. $c/\phi$ dos pilares das <i>Série 2 e 3</i> , para as forças de ruptura por aderência.	137
Figura 4.73 – Deformação no <i>Ext5</i> vs. $c/\phi$ dos pilares das <i>Série 2 e 3</i> , para as forças de ruptura por aderência: média de cada série.	138
Figura 4.74 – Deformação no <i>Ext5</i> vs. $c/\phi$ dos pilares das <i>Série 2 e 3</i> , para as forças de ruptura por aderência: média de todos os valores.	138
Figura A.1 – Deformação específica ao longo da emenda da <i>Face D</i> dos pilares da <i>Série 2</i> para quatro diferentes solicitações.	148
Figura A.2 – Deformação específica ao longo da emenda da <i>Face E</i> dos pilares da <i>Série 2</i> para quatro diferentes solicitações.	149
Figura A.3 – Deformação específica ao longo da emenda da <i>Face D</i> dos pilares da <i>Série 3</i> para quatro diferentes solicitações.	150
Figura A.4 – Deformação específica ao longo da emenda da <i>Face E</i> dos pilares da <i>Série 3</i> para quatro diferentes solicitações.	151
Figura A.5 – Curva Deformação específica vs. comprimento da emenda para diferentes solicitações (pilares: P2-25, P2-20 e P2-10).	152
Figura A.6 – Curva Deformação específica vs. comprimento da emenda para diferentes solicitações (pilares: P2-05, P2-00 e P2-AE).	153
Figura A.7 – Curva Deformação específica vs. comprimento da emenda para diferentes solicitações (pilares: P3-25, P3-20 e P3-10).	154
Figura A.8 – Curva Deformação específica vs. comprimento da emenda para diferentes solicitações (pilares: P3-05, P3-00 e P3-AE).	155
Figura B.1 – Interface do software Ansys.	157
Figura B.2 – Elemento finito tipo SOLID65 do ANSYS.	160
Figura B.3 – Superfície de ruptura bidimensional implementada no software ANSYS.	162
Figura B.4 – Elemento finito tipo SOLID185 do ANSYS.	163
Figura B.5 – Elemento finito de contato tipo TARGE170 do ANSYS.	164
Figura B.6 – Elemento finito de contato tipo CONTA173 do ANSYS.	164
Figura B.7 – Dimensões utilizadas nos modelos do grupo <i>MODELO 1</i> (vista superior).	166
Figura B.8 – Aspecto tridimensional dos modelos do grupo <i>MODELO 1</i> .	166

Figura B.9 – Dimensões utilizadas nos modelos dos grupos <i>MODELO 2</i> e <i>3</i> (vista lateral).	167
Figura B.10 – Aspecto tridimensional dos modelos dos grupos <i>MODELO 2</i> e <i>MODELO 3</i> .	168
Figura B.11 – Dimensões da barra de aço usada nos modelos (medidas em milímetros).	168
Figura B.12 – Localização das linhas usadas para extração dos resultados para o grupo <i>MODELO 1</i> (medidas em milímetros ).	170
Figura B.13 – Localização das linhas usadas para extração dos resultados para os grupos <i>MODELO 2</i> e <i>MODELO 3</i> (medidas em milímetros).	170
Figura B.14 – Discretização usada no <i>MODELO 1-10</i>	173
Figura B.15 – Influência do cobrimento para o modelo <i>MODELO 1-20</i> (barra nervurada).	174
Figura B.16 – Influência do cobrimento para o modelo <i>MODELO 1-30BL</i> (barra lisa).	175
Figura B.17 – Influência do cobrimento para o modelo <i>MODELO 2-20</i> (barra nervurada).	176
Figura B.18 – Influência do cobrimento para os modelos do grupo <i>MODELO 1</i> para barra nervurada.	177
Figura B.19 – Influência do cobrimento para os modelos do grupo <i>MODELO 1</i> , comparação entre a barra nervurada e a barra lisa.	178
Figura B.20 – Influência do cobrimento para os modelos do grupo <i>MODELO 2</i> .	179
Figura B.21 – Influência do cobrimento para os modelos do grupo <i>MODELO 2</i> , comparação entre a barra nervurada e a barra lisa.	180
Figura B.22 – Influência do cobrimento para os modelos do grupo <i>MODELO 3</i> .	181

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Resistência de aderência segundo a NBR 6118: 2003 e o CEB-FIP MC90 (1993) e tensão de aderência média experimental (QUINTANA, 2005).	40
Tabela 3.1 – Espessura do cobrimento para cada série de pilar.	61
Tabela 3.2 – Consumo de materiais por metro cúbico de concreto.	72
Tabela 3.3 – Valores de abatimento no tronco de cone para cada betonada.	72
Tabela 3.4 – Resultado da resistência à compressão de acordo com a idade do concreto.	73
Tabela 3.5 – Resultado da resistência à tração de acordo com a idade do concreto.	73
Tabela 4.1 – Resultados experimentais.	81
Tabela 4.2 – Dados e resultados das solicitações experimentais.	124
Tabela 4.3 – Tensões normais na ponta e na outra extremidade da emenda das barras: valores para a força de ruptura por aderência.	139
Tabela 4.4 – Tensão de aderência na emenda: valores para a força de ruptura por aderência.	140
Tabela B.1 – Descrição dos modelos usados na análise numérica.	165
Tabela B.2 – Localização das linhas usadas para extração dos resultados da análise para os modelos do grupo <i>MODELO 1</i> .	171
Tabela B.3 – Localização das linhas usadas para extração dos resultados da análise para os modelos dos grupos <i>MODELO 2</i> e <i>MODELO 3</i> .	172

## Lista de símbolos e nomenclaturas

<b><i>a</i></b>	Altura das nervuras da barra
<b><i>A<sub>c</sub></i></b>	Área de concreto
<b><i>A<sub>s</sub></i></b>	Área da seção transversal da barra de aço longitudinal
<b><i>b</i></b>	Largura da seção transversal do pilar
<b><i>B<sub>i</sub></i></b>	Betonadas (i de 1 a 6)
<b><i>c</i></b>	Cobrimento livre da armadura longitudinal
<b><i>c<sub>0</sub></i></b>	Distância livre entre as nervuras da barra
<b><i>c<sub>1</sub></i></b>	Cobrimento na face menos comprimida do pilar
<b><i>d</i></b>	Distância do bordo mais comprimido da seção ao aço menos comprimido
<b><i>e</i></b>	Excentricidade da força em relação ao eixo do pilar
<b><i>e<sub>s</sub></i></b>	Excentricidade da força em com relação ao aço menos comprimido
<b><i>E<sub>c</sub></i></b>	Módulo de elasticidade do concreto
<b><i>E<sub>s</sub></i></b>	Módulo de elasticidade do aço
<b><i>f<sub>b</sub></i></b>	Resistência de aderência
<b><i>f<sub>c</sub></i></b>	Resistência à compressão do concreto
<b><i>f<sub>cm</sub></i></b>	Resistência à compressão média do concreto obtida nos ensaios de compressão simples
<b><i>f<sub>ct</sub></i></b>	Resistência à tração direta do concreto
<b><i>f<sub>ctd</sub></i></b>	Resistência à tração de cálculo do concreto
<b><i>f<sub>ctk,inf</sub></i></b>	Resistência característica do concreto à tração na flexão
<b><i>f<sub>ct,sp</sub></i></b>	Resistência à tração indireta do concreto
<b><i>F<sub>M</sub></i></b>	Superfície do cilindro de concreto formado entre duas nervuras subseqüentes
<b><i>F<sub>R</sub></i></b>	Superfície das nervuras
<b><i>f<sub>R</sub></i></b>	$f_R = F_R / F_M$
<b><i>f<sub>y</sub></i></b>	Tensão de escoamento do aço
<b><i>h</i></b>	Altura da seção transversal do pilar
<b><i>l<sub>b</sub></i></b>	Comprimento da emenda por traspasse
<b><i>L</i></b>	Comprimento do pilar
<b><i>N</i></b>	Força normal
<b><i>N<sub>u</sub></i></b>	Força de ruptura observada no ensaio
<b><i>N<sub>y</sub></i></b>	Força correspondente à deformação específica de escoamento $\epsilon_{sy}$ da

	armadura
$R_{b1}$	Resistência de adesão
$R_{b2}$	Resistência de arrancamento de atrito
$R_{b3}$	Resistência de arrancamento de aderência mecânica
$S_f$	Distância entre fissuras
$u$	Perímetro de contato entre a barra e o concreto
$x$	Distância entre os extensômetros instalados ao logo da emenda por traspasse
$\delta$	Deslocamento transversal na metade do comprimento do pilar
$\delta_2$	Deslocamento transversal no topo do pilar
$\varepsilon_c$	Deformação longitudinal específica do concreto
$\varepsilon_s$	Deformação longitudinal específica da barra de aço
$\varepsilon_{sy}$	Deformação de escoamento da armadura longitudinal
$\phi$	Diâmetro da barra da armadura longitudinal
$\eta_1$	Coeficiente que leva em conta a condição superficial da barra
$\eta_2$	Coeficiente que leva em conta se a barra está em zona de boa ou má aderência
$\eta_3$	Coeficiente que leva em conta o diâmetro da barra
$\nu$	$N/dbf_c$
$\mu$	$Ne/bd^2f_c$
$\sigma_c$	Tensão no concreto
$\sigma_s$	Tensão normal na armadura longitudinal
$\tau$	Tensão de aderência
$\tau_{bm}$	Valor médio dos ensaios de arrancamento
$\tau_{bu}$	Resistência de aderência efetiva
$\tau_m$	Tensão de aderência média
$\tau_{m\acute{a}x}$	Valor máximo da tensão de aderência
<b>Série 1</b>	Série de pilares com armadura contínua
<b>Série 2</b>	Série de pilares com armadura emendada por traspasse, com o comprimento da emenda igual a 470 mm
<b>Série 3</b>	Série de pilares com armadura emendada por traspasse, com o comprimento da emenda igual a 435 mm
<b>Face A</b>	Face mais comprimida do pilar
<b>Face B</b>	Face menos comprimida do pilar
<b>Face D</b>	Face lateral direita para um observador de frente a Face A do pilar
<b>Face E</b>	Face lateral Esquerda para um observador de frente a Face A do

pilar

- ExtC-A** Extensômetro para concreto instalado no centro geométrico da *Face A* do pilar
- ExtC-B** Extensômetro para concreto instalado no centro geométrico da *Face B* do pilar
- Ext1D** Extensômetros para aço instalados na emenda por traspasse localizada próxima da *Face D* do pilar, sendo o extensômetro *Ext1D* instalado na ponta da barra e *Ext6D E* na extremidade oposta da emenda (Pilares das *Séries 2 e 3*)
- Ext2D**
- Ext3D**
- Ext4D**
- Ext5D**
- Ext6D**
- Ext1E** Extensômetros para aço instalados na emenda por traspasse localizada próxima da *Face E* do pilar, sendo o extensômetro *Ext1E* instalado na ponta da barra e *Ext6E* na extremidade oposta da emenda (Pilares das *Séries 2 e 3*)
- Ext2E**
- Ext3E**
- Ext4E**
- Ext5E**
- Ext6E**
- Ext-A** Extensômetros para aço instalados numa das barras próxima a *Face A* dos pilares da *Serie 1* na altura de  $L/2$
- Ext-B** Extensômetros para aço instalados numa das barras próxima a *Face B* dos pilares da *Serie 1* na altura de  $L/2$
- P1-25** Pilar da *Série 1* com espessura de cobertura na face mais comprimida igual a 25 mm
- P1-20** Pilar da *Série 1* com espessura de cobertura na face mais comprimida igual a 20 mm
- P1-10** Pilar da *Série 1* com espessura de cobertura na face mais comprimida igual a 10 mm
- P1-05** Pilar da *Série 1* com espessura de cobertura na face mais comprimida igual a 05 mm
- P1-00** Pilar da *Série 1* sem cobertura
- P1-AE** Pilar da *Série 1* com metade do diâmetro da barra longitudinal exposta
- P2-25** Pilar da *Série 2* com espessura de cobertura na face mais comprimida igual a 25 mm
- P2-20** Pilar da *Série 2* com espessura de cobertura na face mais comprimida igual a 20 mm
- P2-10** Pilar da *Série 2* com espessura de cobertura na face mais comprimida igual a 10 mm
- P2-05** Pilar da *Série 2* com espessura de cobertura na face mais comprimida igual a 05 mm

- P2-00** Pilar da Série 2 sem cobrimento
- P2-AE** Pilar da Série 2 com metade do diâmetro da barra longitudinal exposta
- P3-25** Pilar da Série 3 com espessura de cobrimento na face mais comprimida igual a 25 mm
- P3-20** Pilar da Série 3 com espessura de cobrimento na face mais comprimida igual a 20 mm
- P3-10** Pilar da Série 3 com espessura de cobrimento na face mais comprimida igual a 10 mm
- P3-05** Pilar da Série 3 com espessura de cobrimento na face mais comprimida igual a 05 mm
- P3-00** Pilar da Série 3 sem cobrimento
- P3-AE** Pilar da Série 3 com metade do diâmetro da barra longitudinal exposta