



Magnus Thiago da Rocha Meira

**Estudo experimental de ligações pilares-vigas de
concretos de diferentes resistências**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães
Co-orientador: Prof. Ronaldo Barros Gomes

Rio de Janeiro
Setembro de 2009



Magnus Thiago da Rocha Meira

Estudo Experimental de Ligações Pilares-Vigas de Concretos de Diferentes Resistências

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

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães

Presidente/Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Ronaldo Barros Gomes

Co-Orientador
UFG

Prof. Raul Rosas e Silva

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Ricardo Leopoldo e Silva França

EPUSP-USP

Prof. Ibrahim Abd El Malik Shehata

COPPE/UFRJ

Prof. Gilson Natal Guimarães

UFG

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de setembro de 2009

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

Magnus Thiago da Rocha Meira

Graduou-se em Engenharia Civil na UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte) em 2003. Obteve o título de Mestre em Engenharia Civil na UFG (Universidade Federal de Goiás) em 2005.

Ficha Catalográfica

Meira, Magnus Thiago da Rocha

Estudo experimental de ligações pilares-vigas de concretos de diferentes resistências / Magnus Thiago da Rocha Meira ; orientador: Giuseppe Barbosa Guimarães ; co-orientador: Ronaldo Barros Gomes. – 2009.

267 f. : il. (color.) ; 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. Confinamento de pilares. 3. Nós de pórtico. 4. Resistência efetiva do concreto. I. Guimarães, Giuseppe Barbosa. II. Gomes, Ronaldo Barros. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Castro Meira e Eunice

Agradecimentos

Ao Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães, pela oportunidade de desenvolver esta tese sob sua orientação e pelo apoio e dedicação no decorrer do curso de doutorado.

Ao Prof. Ronaldo Barros Gomes por ter aceitado o convite para a co-orientação desta tese e pela participação efetiva no desenvolvimento da mesma.

Aos professores do curso de pós-graduação da PUC-Rio, pelo convívio e ensinamentos.

Ao Rodrigo Menegaz Muller, HOLCIN (Brasil) SA, que disponibilizou parte dos materiais utilizados na pesquisa.

Aos alunos do curso de pós-graduação da PUC-Rio das turmas de 2005 a 2009, com quem eu tive a oportunidade de conviver no decorrer do curso, pela amizade e companheirismo.

Aos técnicos do laboratório que ajudaram na realização dos ensaios.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e ao PROCAD – Programa Nacional de Cooperação Acadêmica, pelo apoio financeiro e por viabilizar entre outros aspectos o intercâmbio científico com outras instituições.

Resumo

Meira, Magnus Thiago da Rocha; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Gomes, Ronaldo Barros. **Estudo experimental de ligações pilares-vigas de concretos de diferentes resistências**. Rio de Janeiro, 2009. 267p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O emprego de concretos de diferentes resistências em pilares e nos demais elementos do edifício, sendo o concreto dos pilares o de maior resistência, tem sido uma opção adotada em algumas edificações. Nas construções em geral, o concreto do pavimento é colocado continuamente atravessando o nó pilar-pavimento. Como resultado, o concreto da parte do pilar na região de encontro entre o pavimento e o pilar tem uma resistência menor do que no resto do pilar. Como, em geral, esta região do pilar se encontra confinada pelo pavimento, surge então a dúvida sobre qual é a resistência à compressão que se deve utilizar no cálculo do pilar; se deve ser a do pilar, a do pavimento ou um valor intermediário. O objetivo do trabalho é estudar experimentalmente a influência do confinamento do nó em pilares interceptados por vigas. As variáveis adotadas foram a taxa de armadura e a deformação específica inicial na armadura longitudinal das vigas. Nesta tese foram estudados experimentalmente quatro espécimes com vigas nas duas direções e oito espécimes com vigas em uma direção. Também foram ensaiados dois pilares isolados e homogêneos, um com concreto de mesma resistência à compressão do concreto utilizado no pilar e outro com concreto com resistência igual à resistência do concreto das vigas. As resistências nominais dos concretos das vigas e dos pilares foram 30 MPa e 70 MPa respectivamente. Os resultados indicaram que o confinamento promovido por vigas nas duas direções resulta num aumento significativo na carga de ruptura. O aumento da taxa de armadura das vigas aumenta a capacidade final somente nos espécimes com vigas nas duas direções. A influência da deformação inicial na armadura das vigas é inexpressiva.

Palavras-chave

Confinamento de pilares; nós de pórtico; resistência efetiva do concreto.

Abstract

Meira, Magnus Thiago da Rocha; Guimarães, Giuseppe Barbosa; Gomes, Ronaldo Barros (Advisors). **Experimental study of beam-column joints with different concrete strengths**. Rio de Janeiro, 2009. 267p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of concretes with different strengths in columns and in the others elements of the floor, with the columns having the concrete with the highest strength, has been an option adopted in some buildings. In general, the concrete of the floor is poured continuously crossing the floor-column joint. As a result, the concrete strength in the joint region is lower than the concrete strength of the rest of the column. Since, in general, the joint region is confined by the floor, a doubt on the effective strength of the joint remains. The objective of the present work was to study experimentally the influence of the lateral confinement in the joint region of columns intercepted by beams. The variables were the reinforcement ratio and the initial strain in the tension reinforcement of the beams. In the present thesis, four specimens with beams in one direction and eight specimens with beams in two directions were studied experimentally. In addition, two isolated columns were also tested, one with concrete of same strength of the concrete of the columns and other with concrete of same strength of the concrete of the beams. The compressive concrete strength of the beams and columns were 30 MPa and 70 MPa respectively. The results indicated that the confinement provided by beams in two directions causes a significant increase of the failure load. The increase of the tension reinforcement ratio of the beams increases the failure load only in specimens with beams in two directions. The initial strain in the tension reinforcement of the beams has no effect on the ultimate capacity of the specimens.

Keywords

Confined columns; floor-column joint; effective concrete strength.

Sumário

| | |
|---|----|
| 1 – INTRODUÇÃO | 26 |
| 1.1. Generalidades | 26 |
| 1.2. Objetivo e justificativa | 27 |
| 1.3. Estrutura do trabalho | 27 |
| 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 29 |
| 2.1. Nós de pórtico | 29 |
| 2.1.1. Definição | 29 |
| 2.1.2. Tipos de nós de pórtico | 29 |
| 2.1.3. Comportamento de nós de pórtico | 31 |
| 2.1.4. Pilares com concreto de elevada resistência atravessados por vigas e/ou lajes com concretos de resistência normal | 31 |
| 2.1.5. Carga e modo de ruptura | 33 |
| 2.2. Concreto confinado | 34 |
| 2.3. Fatores que afetam a resistência efetiva | 35 |
| 2.3.1. Presença de laje e/ou vigas com ou sem cargas aplicadas | 36 |
| 2.3.2. Razão entre as resistências à compressão dos elementos | 39 |
| 2.3.3. Razão h/c entre a altura da viga e/ou laje e a menor dimensão do pilar | 40 |
| 2.3.4. Armadura longitudinal da viga e/ou laje | 41 |
| 2.3.5. Razão entre dimensões do pilar | 42 |
| 2.3.6. Excentricidade da carga aplicada no pilar | 43 |
| 2.3.7. Uso de armadura espiral, tirante ou estribo no nó | 43 |
| 2.3.8. Uso de concreto de elevada resistência no nó | 44 |
| 2.4. Comportamento de pilares com concreto de maior resistência atravessados por viga e/ou laje com concreto de menor resistência | 45 |
| 2.5. Normas e métodos de cálculo | 49 |
| 2.6. Avaliação de normas e métodos de cálculo | 53 |
| 2.7. Considerações finais | 57 |
| 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL | 60 |
| 3.1. Características dos modelos ensaiados | 60 |

| | |
|--|---------|
| 3.1.1. Parâmetros e variáveis | 60 |
| 3.1.2. Programa experimental | 61 |
| 3.2. Fôrmas | 62 |
| 3.3. Materiais | 63 |
| 3.3.1. Concreto | 63 |
| 3.3.2. Aço | 63 |
| 3.4. Detalhamento dos modelos | 64 |
| 3.5. Instrumentação | 65 |
| 3.6. Procedimento de preparação e realização dos ensaios | 69 |
| 4 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS | 73 |
| 4.1. Materiais | 73 |
| 4.1.1. Concreto | 73 |
| 4.1.2. Aço | 74 |
| 4.2. Modo de ruptura | 75 |
| 4.3. Carga de ruptura | 80 |
| 4.4. Deformação | 80 |
| 4.4.1. Concreto | 80 |
| 4.4.2. Aço | 86 |
| 4.5. Deslocamentos | 97 |
| 4.5.1. Pilar | 97 |
| 5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS | 102 |
| 5.1. Comportamento dos espécimes | 102 |
| 5.2. Carga e modo de ruptura | 106 |
| 5.2.1. Carga de ruptura | 106 |
| 5.2.2. Modo de ruptura | 111 |
| 5.3. Deformação | 112 |
| 5.3.1. Concreto | 112 |
| 5.3.2. Aço | 114 |
| 5.4. Deslocamentos | 125 |
| 5.5. Comparação entre as resistências efetivas experimentais e estimadas | 127 |
| 5.6. Considerações quanto ao estado limite último teórico | 131 |
| 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 134 |
| 6.1. Conclusões | 134 |

| | |
|--|-----|
| 6.2. Sugestões para trabalhos futuros | 137 |
| 6.2.1. Variáveis | 137 |
| 6.2.2. Aparato experimental | 137 |
| Referências Bibliográficas | 139 |
| Anexo A – Dados da literatura para avaliar as normas e os métodos de cálculo | 143 |
| Anexo B – Gráfico da avaliação das normas e dos métodos de cálculo | 146 |
| Anexo C – Detalhamento da armadura dos espécimes | 154 |
| Anexo D – Equipamentos para preparação e realização dos ensaios | 160 |
| Anexo E – Dados dos ensaios | 165 |
| Anexo F – Dados dos ensaios de caracterização do concreto e do aço | 250 |
| Anexo G – Cálculo das resistências efetivas dos espécimes na ruptura | 253 |
| Anexo H – Cálculo das resistências efetivas no estado limite último | 261 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Delimitação do nó. | 29 |
| Figura 2.2 – Exemplos de tipos de ligações (as lajes não estão desenhadas para facilitar a visualização) (ACI 352-02, 2002). | 30 |
| Figura 2.3 – Exemplos de tipos de ligações de concreto armado em edifícios. | 30 |
| Figura 2.4 – Estado triaxial no nó (Ospina e Alexander, 1997). | 31 |
| Figura 2.5 – Conexões viga-laje-pilar: interior (a), borda (b), canto (c) e pilar sanduíche (d) (Portella <i>et al.</i> , 1999). | 32 |
| Figura 2.6 – Conexões laje-pilar: (a) concreto do nó é o mesmo do pilar, (b) concreto do nó é o mesmo da laje. | 33 |
| Figura 2.7 – Curvas tensão – deformação e coeficiente de Poisson – deformação (Guimarães, 2003). | 34 |
| Figura 2.8 – Efeito do tipo de espécime, onde f_{ce} foi calculado com $\alpha_1=1,00$ (Bianchini <i>et al.</i> , 1960). | 36 |
| Figura 2.9 – Nó pilar-laje interno sem carga aplicada na laje (Ali Shah, 2003a). | 37 |
| Figura 2.10 – Nó pilar-laje interno com carga aplicada na laje (Ali Shah, 2003a). | 38 |
| Figura 2.11 – Deformação dos espécimes sem e com carga na laje Ospina e Alexander (1998). | 38 |
| Figura 2.12 – Razão f_{ce}/f_{cs} vs. f_{cc}/f_{cs} , onde f_{ce} foi calculado com $\alpha_1=1,00$. | 39 |
| Figura 2.13 – Razão f_{cc}/f_{cs} vs. f_{ce}/f_{cs} para diferentes valores de h/c , onde f_{ce} foi calculado com $\alpha_1=1,00$ (Shu e Hawkins, 1992). | 41 |
| Figura 2.14 – Efeito da distribuição da armadura superior da laje na resistência do nó (McHarg <i>et al.</i> , 2000a). | 42 |
| Figura 2.15 – Razão f_{cc}/f_{cs} versus f_{ce}/f_{cs} para pilares sanduíche (Lee e Mendis, 2004) e internos (Ospina e Alexander, 1997) com seção quadrada e retangular, onde f_{ce} foi calculado com $\alpha_1=1,00$. | 43 |
| Figura 2.16 – Efeito do núcleo de concreto de alta resistência na resistência do nó (Ospina e Alexander, 1997). | 44 |
| Figura 2.17 – Cilindro de aço usado por Schenck e Schneider (2005). | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.18 – Modelo de fissuração apresentado por Ospina e Alexander (1997) para o espécime D-SC1 com relação h/c igual a 1,0. | 46 |
| Figura 2.19 – Modelo de fissuração apresentado por Ospina e Alexander (1997) para o espécime B-4 sem carregamento na laje. | 47 |
| Figura 2.20 – Modelo de fissuração apresentado por Ospina e Alexander (1997) para o espécime B-2 com carregamento na laje. | 48 |
| Figura 2.21 – Tensão de tração (parte escura) e de compressão (parte clara) obtida por Lee <i>et al.</i> (2008) nos estágios de carga: (a) início do carregamento; (b) carga de escoamento; (c) após o escoamento; (d) carga de pico. | 49 |
| Figura 2.22 – Exemplo de nó pilar-viga, onde a seção transversal do pilar é retangular. | 57 |
| Figura 3.1 – Características geométricas dos espécimes. | 60 |
| Figura 3.2 – Significado da nomenclatura do espécime. | 61 |
| Figura 3.3 – Fotografias das fôrmas: (a) Pilar isolado, (b) Pilar com viga em uma direção e (c) Pilar com viga nas duas direções. | 62 |
| Figura 3.4 – Utilização de cantoneiras de aço na fôrma: (a) Pilar com viga em uma direção, (b) Pilar com viga nas duas direções. | 63 |
| Figura 3.5 – Seção transversal da viga: (a) 3 ϕ 8, (b) 6 ϕ 8, (c) 6 ϕ 10 e (d) 6 ϕ 12.5; distribuição da armadura transversal: (e) 3 ϕ 8, (f) 6 ϕ 8 e (g) 6 ϕ 10 e 6 ϕ 12.5 (medidas em mm). | 64 |
| Figura 3.6 – Armadura dos pilares: (a) cabeça do pilar, (b) região central do pilar e (c) distribuição da armadura transversal (medidas em mm). | 65 |
| Figura 3.7 – Distribuição dos extensômetros no concreto na posição de ensaio (medidas em mm): (a) pilar isolado, (b) pilar com viga em uma direção, (c) pilar com vigas nas duas direções. | 66 |
| Figura 3.8 – Posição dos extensômetros na armadura da viga dos pilares com vigas nas duas direções na posição de concretagem: (a) armadura negativa; (b) armadura positiva. | 67 |
| Figura 3.9 – Distribuição dos extensômetros nas armaduras dos espécimes na posição de concretagem: (a) Pilar isolado, (b) Pilar com viga em uma ou duas direções. | 67 |
| Figura 3.10 – Posicionamento dos transdutores de deslocamentos (medidas em mm): (a) Pilar isolado, (b) Pilar com viga em uma direção, (c) Pilar com viga nas duas direções. | 68 |
| Figura 3.11 – Posicionamento dos transdutores de deslocamentos | |

| | |
|---|----|
| nos espécimes da terceira série de ensaios (medidas em mm). | 69 |
| Figura 3.12 – Desenho da montagem do ensaio do espécime com viga em uma direção. | 70 |
| Figura 3.13 – Desenho da montagem do ensaio do espécime com viga nas duas direções. | 71 |
| Figura 3.14 – Sequência de carregamento nos espécimes com viga em uma ou nas duas direções. | 72 |
| Figura 4.1 – Fotografia dos ensaios de: (a) resistência à tração, (b) módulo de elasticidade. | 73 |
| Figura 4.2 – Sequência da concretagem: (a) PVxy; (b) PVx. | 74 |
| Figura 4.3 – Fotografias: (a) amostras das barras, (b) barra após o ensaio. | 75 |
| Figura 4.4 – Fotografias de frente e de perfil dos espécimes: (a) PI-30, (b) PI-70. | 76 |
| Figura 4.5 – Fotografias dos espécimes: (a) PVxy-1,0-1, (b) PVxy-1,0-2. | 76 |
| Figura 4.6 – Fotografia do espécime PVxy-0,5-1, após a retirada da viga do lado em que o concreto está esmagado. | 77 |
| Figura 4.7 – Fotografia do espécime PVxy-0,5-2 antes e depois da ruptura. | 77 |
| Figura 4.8 – Fotografia dos espécimes após a ruptura: (a) PVx-0,5-1, (b) PVx-1,0-1, (c) PVx-1,6-1, (d) PVx-2,5-1, (e) PVx-0,5-2, (f) PVx-1,0-2, (g) PVx-1,6-2, (h) PVx-2,5-2. | 78 |
| Figura 4.9 – Curvas força-deformação do concreto e distribuição dessas deformações em seções dos espécimes: (a) PI-30; (b) PI-70. | 81 |
| Figura 4.10 – Curvas força-deformação do concreto e distribuição dessas deformações em seções dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (d) PVx-1,0-2. | 82 |
| Figura 4.11 – Curvas força-deformação do concreto e distribuição dessas deformações em seções dos espécimes: (a) PVx-1,6-1; (b) PVx-1,6-2; (c) PVx-2,5-1; (d) PVx-2,5-2. | 83 |
| Figura 4.12 – Curvas força-deformação do concreto e distribuição dessas deformações em seções dos espécimes: (a) PVxy-0,5-1; (b) PVxy-0,5-2. | 84 |
| Figura 4.13 – Curvas força-deformação do concreto e distribuição dessas deformações em seções dos espécimes: (a) PVxy-1,0-1; (b) PVxy-1,0-2. | 85 |
| Figura 4.14 – Posição dos extensômetros na armadura da viga: (a) negativa; (b) positiva. | 86 |
| Figura 4.15 – Curvas força-deformação da armadura longitudinal negativa da viga dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; | |

| | |
|---|-----|
| (d) PVx-1,0-2; (e) PVx-1,6-1; (f) PVx-1,6-2; (g) PVx-2,5-1; (h) PVx-2,5-2. | 87 |
| Figura 4.16 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal negativa da viga dos espécimes: (a) PVxy-0,5-1; (b) PVxy-0,5-2; (c) PVxy-1,0-1; (d) PVxy-1,0-2. | 88 |
| Figura 4.17 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal positiva da viga dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (d) PVx-1,0-2; (e) PVx-1,6-1; (f) PVx-1,6-2; (g) PVx-2,5-1; (h) PVx-2,5-2. | 90 |
| Figura 4.18 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal positiva da viga dos espécimes: (a) PVxy-0,5-1; (b) PVxy-0,5-2; (c) PVxy-1,0-1; (d) PVxy-1,0-2. | 91 |
| Figura 4.19 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal do pilar dos espécimes: (a) PI-30; (b) PI-70. | 92 |
| Figura 4.20 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal do pilar dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (d) PVx-1,0-2; (e) PVx-1,6-1; (f) PVx-1,6-2; (g) PVx-2,5-1; (h) PVx-2,5-2. | 93 |
| Figura 4.21 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal do pilar dos espécimes: (a) PVxy-0,5-1; (b) PVxy-0,5-2; (c) PVxy-1,0-1; (d) PVxy-1,0-2. | 94 |
| Figura 4.22 – Curvas força–deformação dos estribos do nó dos espécimes: (a) PI-30; (b) PI-70. | 94 |
| Figura 4.23 – Curvas força–deformação dos estribos do nó dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (d) PVx-1,0-2; (e) PVx-1,6-1; (f) PVx-1,6-2; (g) PVx-2,5-1; (h) PVx-2,5-2. | 95 |
| Figura 4.24 – Curvas força–deformação dos estribos do nó dos espécimes: (a) PVxy-0,5-1; (b) PVxy-0,5-2; (c) PVxy-1,0-1; (d) PVxy-1,0-2. | 96 |
| Figura 4.25 – Curvas força–deslocamento lateral e figura com o deslocamento lateral do espécime ao longo do ensaio: (a) PI-30; (b) PI-70. | 97 |
| Figura 4.26 – Curvas força–deslocamento lateral e figura com o deslocamento lateral do espécime ao longo do ensaio: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (b) PVx-1,0-2. | 99 |
| Figura 4.27 – Curvas força–deslocamento lateral e figura com o deslocamento lateral do espécime ao longo do ensaio: (a) PVx-1,6-1; (b) PVx-1,6-2; (c) PVx-2,5-1; (d) PVx-2,5-2. | 100 |
| Figura 4.28 – Curvas força–deslocamento lateral e figura com o deslocamento lateral do espécime ao longo do ensaio: (a) PVxy-0,5-1; (b) PVxy-0,5-2; (c) PVxy-1,0-1; (d) PVxy-1,0-2. | 101 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.1 – Deformação da armadura longitudinal da viga dos espécimes: (a) PVx-0,5-1; (b) PVx-0,5-2; (c) PVx-1,0-1; (d) PVx-1,0-2. | 104 |
| Figura 5.2 – Deformação da armadura longitudinal da viga dos espécimes: (a) PVx-1,6-1; (b) PVx-1,6-2; (c) PVx-2,5-1; (d) PVx-2,5-2. | 105 |
| Figura 5.3 – Deformação da armadura longitudinal da viga dos espécimes: (a) PVxy-0,5-2; (b) PVxy-1,0-1; (c) PVxy-1,0-2. | 106 |
| Figura 5.4 – Posição dos extensômetros do concreto: (a) PVx; (b) PVxy (valores em mm). | 112 |
| Figura 5.5 – Curva força–deformação do concreto após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVx: (a) SG-01; (b) SG-02. | 113 |
| Figura 5.6 – Curva força–deformação do concreto após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVxy: (a) SG-01; (b) SG-02; (c) SG-03; (d) SG-04. | 113 |
| Figura 5.7 – Posição dos extensômetros na armadura da viga: (a) armadura negativa; (b) armadura positiva. | 115 |
| Figura 5.8 – Curvas força aplicada no pilar – força $F_{s,viga}$ da armadura negativa da viga nos espécimes PVx: (a) SG-05; (b) SG-09; (c) SG-06; (d) SG-10. | 116 |
| Figura 5.9 – Curvas força aplicada no pilar – força $F_{s,viga}$ da armadura negativa da viga nos espécimes PVxy: (a) SG-05; (b) SG-09; (c) SG-06; (d) SG-10; (e) SG-22 e (f) SG-26. | 117 |
| Figura 5.10 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal positiva da viga após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVx: (a) SG-07; (b) SG-11; (c) SG-08; (d) SG-12. | 119 |
| Figura 5.11 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal positiva da viga após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVxy: (a) SG-07; (b) SG-11; (c) SG-08; (d) SG-12; (e) SG-24 e (f) SG-28. | 120 |
| Figura 5.12 – Posição dos extensômetros na armadura longitudinal do pilar. | 121 |
| Figura 5.13 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal do pilar após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVx: (a) SG-13; (b) SG-14. | 122 |
| Figura 5.14 – Curvas força–deformação da armadura longitudinal do pilar após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVxy: (a) SG-13; (b) SG-14. | 122 |
| Figura 5.15 – Posição dos extensômetros dos estribos no nó. | 123 |
| Figura 5.16 – Curvas força–deformação dos estribos após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVx: (a) SG-15; (b) SG-16; (c) SG-17; (d) SG-18. | 124 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.17 – Curvas força–deformação dos estribos após a aplicação de carga na viga dos espécimes PVxy: (a) SG-15; (b) SG-16; (c) SG-17; (d) SG-18. | 124 |
| Figura 5.18 – Posicionamento dos transdutores de deslocamentos (medidas em mm): (a) Pilar com viga em uma direção, (b) Pilar com viga nas duas direções. | 125 |
| Figura 5.19 – Curvas força–deslocamento lateral das régua lineares de deslocamento nos espécimes com vigas em uma direção: (a) TD 1; (b) TD 8. | 126 |
| Figura 5.20 – Curvas força–deslocamento lateral das régua lineares de deslocamento nos espécimes com vigas nas duas direções: (a) TD 1; (b) TD 3. | 126 |
| Figura 5.21 – Gráfico dos valores de $f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$ considerando a carga de ruptura igual a $F_{u,pil.sup.}$. | 130 |
| Figura 5.22 – Gráfico dos valores de $f_{ce,Teste}/f_{ce,mét.cálc}$ considerando a carga de ruptura igual a $F_{u,pil.inf.}$. | 131 |
| Figura 5.23 – Gráfico comparativo entre as resistências efetivas no estado limite último e na ruptura dos espécimes PVx. | 132 |
| Figura 5.24 – Gráfico comparativo entre as resistências efetivas no estado limite último e na ruptura dos espécimes PVxy. | 132 |
| Figura 5.25 – Gráfico dos valores de $f_{ce,ELU}/f_{ce,mét.cálc.}$ | 133 |
| Figura B.1 – Métodos de cálculo para pilares de canto interceptados por laje. | 146 |
| Figura B.2 – Métodos de cálculo para pilares de canto interceptados por laje, cont.. | 147 |
| Figura B.3 – Métodos de cálculo para pilares de borda interceptados por viga e/ou laje. | 148 |
| Figura B.4 – Métodos de cálculo para pilares de borda interceptados por viga e/ou laje, continuação. | 149 |
| Figura B.5 – Métodos de cálculo para pilares de borda interceptados por laje. | 150 |
| Figura B.6 – Métodos de cálculo para pilares internos interceptados por viga e/ou laje. | 151 |
| Figura B.7 – Métodos de cálculo para pilares internos interceptados por laje. | 152 |
| Figura B.8 – Métodos de cálculo para pilares internos interceptados por laje. | 153 |

| | |
|--|-----|
| Figura C.1 – Detalhamento das armaduras dos espécimes PVx-0,5-1 e PVx-0,5-2. | 154 |
| Figura C.2 – Detalhamento das armaduras dos espécimes PVx-1,0-1 e PVx-1,0-2. | 155 |
| Figura C.3 – Detalhamento das armaduras dos espécimes PVx-1,6-1 e PVx-1,6-2. | 156 |
| Figura C.4 – Detalhamento das armaduras dos espécimes PVx-2,5-1 e PVx-2,5-2. | 157 |
| Figura C.5 – Detalhamento das armaduras dos espécimes PVxy-0,5-1 e PVxy-0,5-2. | 158 |
| Figura C.6 – Detalhamento das armaduras dos espécimes PVxy-1,0-1 e PVxy-1,0-2. | 159 |
| Figura D.1 – Atuador hidráulico. | 160 |
| Figura D.2 – Bomba hidráulica de pressão controlada. | 160 |
| Figura D.3 – Transdutor de pressão. | 160 |
| Figura D.4 – Régua lineares de deslocamentos. | 161 |
| Figura D.5 – Sistema de aquisição de dados (combo). | 161 |
| Figura D.6 – Pórtico de reação. | 161 |
| Figura D.7 – Viga metálica. | 161 |
| Figura D.8 – Perfil metálico fechado. | 162 |
| Figura D.9 – Barra rosqueada. | 162 |
| Figura D.10 – Vigas de madeira. | 162 |
| Figura D.11 – Perfil C metálico. | 162 |
| Figura D.12 – Chapas metálicas. | 162 |
| Figura D.13 – Detalhe da 1ª etapa de concretagem do espécime PVx. | 163 |
| Figura D.14 – Detalhe da 1ª etapa de concretagem do espécime PVxy. | 163 |
| Figura D.15 – Detalhe da ancoragem mecânica da armadura das vigas. | 163 |
| Figura D.16 – Exemplo do espécime PVx antes do ensaio. | 164 |
| Figura D.17 – Exemplo do espécime PVx durante o ensaio. | 164 |
| Figura D.18 – Exemplo do espécime PVxy durante o ensaio. | 164 |
| Figura F.1 – Curva tensão-deformação específica do concreto dos pilares no ensaio do módulo de elasticidade. | 250 |
| Figura F.2 – Curva tensão-deformação específica do concreto das vigas no ensaio do módulo de elasticidade. | 251 |
| Figura F.3 – Curva tensão-deformação específica do aço. | 252 |

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 – Métodos de cálculo para pilares internos. | 50 |
| Tabela 2.2 – Métodos de cálculo para pilares de borda e/ou canto. | 51 |
| Tabela 2.3 – Valor crítico da razão f_{cc}/f_{cs} de acordo com o valor de h/c (Lee e Mendis, 2004). | 52 |
| Tabela 2.4 – Testes encontrados na literatura. | 54 |
| Tabela 2.5 – Valores médios de $f_{ce,exp.}/f_{ce,mét.cálc.}$ dos métodos de cálculo para pilares internos. | 55 |
| Tabela 2.6 – Valores médios de $f_{ce,exp.}/f_{ce,mét.cálc.}$ dos métodos de cálculo para pilares de borda e de canto. | 56 |
| Tabela 2.7 – Valores médios de $f_{ce,exp.}/f_{ce,mét.cálc.}$ dos métodos de cálculo para pilares internos, onde $f_{ce,exp.}$ é calculada com $\alpha_1=1,00$. | 58 |
| Tabela 2.8 – Valores médios de $f_{ce,exp.}/f_{ce,mét.cálc.}$ dos métodos de cálculo para pilares de borda e de canto, onde $f_{ce,exp.}$ é calculada com $\alpha_1=1,00$. | 59 |
| Tabela 3.1 – Características dos espécimes. | 61 |
| Tabela 3.2 – Traços dos concretos – Quantidade para $1m^3$. | 63 |
| Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização do concreto. | 74 |
| Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de caracterização das barras de aço. | 75 |
| Tabela 4.3 – Fissuras nos espécimes e suas respectivas cargas no pilar e na viga. | 79 |
| Tabela 4.4 – Carga e modo de ruptura. | 80 |
| Tabela 5.1 – Cargas de ruptura F_u igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.sup.}$ e de escoamento dos espécimes com viga em uma direção. | 107 |
| Tabela 5.2 – Cargas de ruptura F_u igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.sup.}$ e de escoamento dos espécimes com viga nas duas direções. | 109 |
| Tabela 5.3 – Cargas de ruptura F_u igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.inf.}$ e de escoamento dos espécimes com viga em uma direção. | 110 |
| Tabela 5.4 – Cargas de ruptura F_u igual à carga aplicada no pilar superior $F_{u,pil.inf.}$ e de escoamento dos espécimes com viga nas duas direções. | 111 |
| Tabela 5.5 – Dados da resistência efetiva obtida nos testes. | 128 |
| Tabela 5.6 – Dados obtidos dos métodos de cálculo para pilar com viga | |

| | |
|--|-----|
| em uma direção. | 129 |
| Tabela 5.7 – Dados da resistência efetiva obtida nos testes considerando a carga de ruptura igual a $F_{u,pil.inf.}$. | 130 |
| Tabela A.1 – Pilares de canto interceptados por lajes. | 143 |
| Tabela A.2 – Pilares de borda interceptados por vigas e lajes. | 143 |
| Tabela A.3 – Pilares de borda interceptados por lajes. | 144 |
| Tabela A.4 – Pilares internos interceptados por vigas e lajes. | 144 |
| Tabela A.5 – Pilares internos interceptados por lajes. | 145 |
| Tabela E.1 – Espécime PI-30. | 165 |
| Tabela E.2 – Espécime PI-30, continuação. | 166 |
| Tabela E.3 – Espécime PI-70. | 167 |
| Tabela E.4 – Espécime PI-70, continuação. | 168 |
| Tabela E.13 – Espécime PVx-0,5-2 parte 1. | 177 |
| Tabela E.14 – Espécime PVx-0,5-2 parte 2. | 178 |
| Tabela E.15 – Espécime PVx-0,5-2 parte 3. | 179 |
| Tabela E.16 – Espécime PVx-0,5-2 parte 4. | 180 |
| Tabela E.17 – Espécime PVx-1,0-1 parte 1. | 181 |
| Tabela E.18 – Espécime PVx-1,0-1 parte 1, continuação. | 182 |
| Tabela E.19 – Espécime PVx-1,0-1 parte 2. | 183 |
| Tabela E.20 – Espécime PVx-1,0-1 parte 2, continuação. | 184 |
| Tabela E.21 – Espécime PVx-1,0-1 parte 3. | 185 |
| Tabela E.22 – Espécime PVx-1,0-1 parte 3, continuação. | 186 |
| Tabela E.23 – Espécime PVx-1,0-1 parte 4. | 187 |
| Tabela E.24 – Espécime PVx-1,0-1 parte 4, continuação. | 188 |
| Tabela E.25 – Espécime PVx-1,0-2 parte 1. | 189 |
| Tabela E.26 – Espécime PVx-1,0-2 parte 1, continuação. | 190 |
| Tabela E.27 – Espécime PVx-1,0-2 parte 2. | 191 |
| Tabela E.28 – Espécime PVx-1,0-2 parte 2, continuação. | 192 |
| Tabela E.29 – Espécime PVx-1,0-2 parte 3. | 193 |
| Tabela E.30 – Espécime PVx-1,0-2 parte 3, continuação. | 194 |
| Tabela E.31 – Espécime PVx-1,0-2 parte 4. | 195 |
| Tabela E.32 – Espécime PVx-1,0-2 parte 4, continuação. | 196 |
| Tabela E.33 – Espécime PVx-1,6-1 parte 1. | 197 |
| Tabela E.34 – Espécime PVx-1,6-1 parte 2. | 198 |
| Tabela E.35 – Espécime PVx-1,6-1 parte 3. | 199 |
| Tabela E.36 – Espécime PVx-1,6-1 parte 4. | 200 |

| | |
|---|-----|
| Tabela E.37 – Espécime PVx-1,6-2 parte 1. | 201 |
| Tabela E.38 – Espécime PVx-1,6-2 parte 1, continuação. | 202 |
| Tabela E.39 – Espécime PVx-1,6-2 parte 2. | 203 |
| Tabela E.40 – Espécime PVx-1,6-2 parte 2, continuação. | 204 |
| Tabela E.41 – Espécime PVx-1,6-2 parte 3. | 205 |
| Tabela E.42 – Espécime PVx-1,6-2 parte 3, continuação. | 206 |
| Tabela E.43 – Espécime PVx-1,6-2 parte 4. | 207 |
| Tabela E.44 – Espécime PVx-1,6-2 parte 4, continuação. | 208 |
| Tabela E.45 – Espécime PVx-2,5-1 parte 1. | 209 |
| Tabela E.46 – Espécime PVx-2,5-1 parte 1, continuação. | 210 |
| Tabela E.47 – Espécime PVx-2,5-1 parte 2. | 211 |
| Tabela E.48 – Espécime PVx-2,5-1 parte 2, continuação. | 212 |
| Tabela E.49 – Espécime PVx-2,5-1 parte 3. | 213 |
| Tabela E.50 – Espécime PVx-2,5-1 parte 3, continuação. | 214 |
| Tabela E.51 – Espécime PVx-2,5-1 parte 4. | 215 |
| Tabela E.52 – Espécime PVx-2,5-1 parte 4, continuação. | 216 |
| Tabela E.53 – Espécime PVx-2,5-2 parte 1. | 217 |
| Tabela E.54 – Espécime PVx-2,5-2 parte 1, continuação. | 218 |
| Tabela E.55 – Espécime PVx-2,5-2 parte 2. | 219 |
| Tabela E.56 – Espécime PVx-2,5-2 parte 2, continuação. | 220 |
| Tabela E.57 – Espécime PVx-2,5-2 parte 3. | 221 |
| Tabela E.58 – Espécime PVx-2,5-2 parte 3, continuação. | 222 |
| Tabela E.59 – Espécime PVx-2,5-2 parte 4. | 223 |
| Tabela E.60 – Espécime PVx-2,5-2 parte 4, continuação. | 224 |
| Tabela E.61 – Espécime PVxy-0,5-1 parte 1. | 225 |
| Tabela E.62 – Espécime PVxy-0,5-1 parte 2. | 226 |
| Tabela E.63 – Espécime PVxy-0,5-1 parte 3. | 227 |
| Tabela E.64 – Espécime PVxy-0,5-1 parte 4. | 228 |
| Tabela E.65 – Espécime PVxy-0,5-2 parte 1. | 229 |
| Tabela E.66 – Espécime PVxy-0,5-2 parte 2. | 230 |
| Tabela E.67 – Espécime PVxy-0,5-2 parte 3. | 231 |
| Tabela E.68 – Espécime PVxy-0,5-2 parte 4. | 232 |
| Tabela E.69 – Espécime PVxy-0,5-2 parte 5. | 233 |
| Tabela E.70 – Espécime PVxy-1,0-1 parte 1. | 234 |
| Tabela E.71 – Espécime PVxy-1,0-1 parte 1, continuação. | 235 |
| Tabela E.72 – Espécime PVxy-1,0-1 parte 2. | 236 |

| | |
|---|-----|
| Tabela E.73 – Espécime PVxy-1,0-1 parte 2, continuação. | 237 |
| Tabela E.74 – Espécime PVxy-1,0-1 parte 3. | 238 |
| Tabela E.75 – Espécime PVxy-1,0-1 parte 3, continuação. | 239 |
| Tabela E.76 – Espécime PVxy-1,0-1 parte 4. | 240 |
| Tabela E.77 – Espécime PVxy-1,0-1 parte 4, continuação. | 241 |
| Tabela E.78 – Espécime PVxy-1,0-2 parte 1. | 242 |
| Tabela E.79 – Espécime PVxy-1,0-2 parte 1, continuação. | 243 |
| Tabela E.80 – Espécime PVxy-1,0-2 parte 2. | 244 |
| Tabela E.81 – Espécime PVxy-1,0-2 parte 2, continuação. | 245 |
| Tabela E.82 – Espécime PVxy-1,0-2 parte 3. | 246 |
| Tabela E.83 – Espécime PVxy-1,0-2 parte 3, continuação. | 247 |
| Tabela E.84 – Espécime PVxy-1,0-2 parte 4. | 248 |
| Tabela E.85 – Espécime PVxy-1,0-2 parte 4, continuação. | 249 |

Lista de símbolos

Símbolos Romanos

| | |
|------------------------|---|
| a | Coefficiente utilizado por Lee e Mendis (2004) na equação do cálculo da resistência efetiva |
| A_c | Área de concreto da seção transversal de um pilar |
| A_s | Armadura da viga ou laje |
| b | Base da viga |
| c | Menor dimensão do pilar |
| C_c | Força resistente do concreto em uma seção a flexo-compressão |
| $C_{s1 \text{ ou } 2}$ | Força resistente do aço em uma seção a flexo-compressão |
| e | Excentricidade da carga em relação ao eixo do pilar |
| e_{total} | Excentricidade total da carga em relação ao eixo do pilar (incluído efeito de 2ª) |
| E_s | Módulo de Elasticidade do aço |
| f_c | Resistência à compressão do concreto |
| f_{cc} | Resistência à compressão do concreto do pilar |
| $f_{cc(t)}$ | Resistência à tração do concreto do pilar |
| f_{ce} | Resistência efetiva do nó |
| $f_{ce,ELU}$ | Resistência efetiva do nó para uma seção no estado limite último de deformação |
| $f_{ce,mét.cálc.}$ | Resistência efetiva do nó estimada por um método de cálculo |
| $f_{ce,teste}$ | Resistência efetiva do nó obtida no ensaio |
| f_{ck} | Resistência à compressão característica do concreto |
| $f_{c,pil.sup.}$ | Resistência à compressão do concreto do pilar superior |
| $f_{c,pil.inf.}$ | Resistência à compressão do concreto do pilar inferior |
| f_{cs} | Resistência à compressão do concreto da viga e/ou laje |
| $f_{c,viga}$ | Resistência à compressão do concreto da viga |
| f_{equ} | Resistência à compressão do concreto equivalente utilizado por Lee e Mendis (2004) na equação do cálculo da resistência efetiva |
| f_y | Tensão de escoamento do aço |
| f_{y1} | Tensão de escoamento do aço do estribo da viga |
| f_{y2} | Tensão de escoamento do aço da armadura longitudinal da viga |
| f_1 | Tensão de confinamento gerada pela armadura que atravessa o nó |

| | |
|---------------------------|--|
| F_{pilar} | Força aplicada no pilar |
| $F_{\text{s,viga}}$ | Força na armadura longitudinal da viga |
| $F_{\text{u,pilar}}$ | Força última no pilar |
| $F_{\text{u,pil.inf.}}$ | Força última no pilar inferior |
| $F_{\text{u,pil.sup.}}$ | Força última no pilar superior |
| $F_{\text{u,viga}}$ | Força última na viga |
| F_{viga} | Força aplicada na viga |
| h | Altura da viga ou laje |
| H | Altura do espécime |
| K_{mod} | Coefficiente proposto por Rüsç (1960) para estimar a redução no valor da resistência à compressão do concreto em espécimes |
| $K_{\text{mod},1}$ | Coefficiente que representa o acréscimo da resistência do concreto após os 28 dias de idade |
| $k_{\text{mod},2}$ | Coefficiente que representa a relação entre a resistência à compressão obtida na estrutura e a resistência medida em um corpo-de-prova cilíndrico de dimensões 150 mm x 300 mm |
| $k_{\text{mod},3}$ | Coefficiente que representa o efeito de cargas de longa duração |
| l_p | Comprimento do pilar |
| l_v | Comprimento da viga |
| L_1 | Comprimento do estribo da viga |
| L_2 | Comprimento da armadura da viga |
| M | Momento fletor que atua na seção transversal de um pilar |
| N | Força normal que atua na seção transversal de um pilar |
| P_{yn} | Carga no pilar superior quando um extensômetro n atinge a deformação de escoamento |
| P_u | Capacidade última da seção transversal de um pilar sob carga centrada |
| $P_{u30 \text{ ou } u70}$ | Capacidade última do espécime de pilar isolado com resistência à compressão de 30 MPa ou 70 MPa |
| t | Tempo decorrido de ensaio |
| U_u | coeficiente de não uniformidade |
| x | Posição da linha neutra |

Símbolos Gregos

| | |
|------------------------|--|
| α_1 | Coefficiente utilizado para estimar a redução no valor da resistência à compressão do concreto em espécimes |
| $\Delta \varepsilon_c$ | Acréscimo de deformação do concreto |
| $\Delta \varepsilon_s$ | Acréscimo de deformação do aço |
| ε_c | Deformação do concreto |
| ε_{inc} | Deformação inicial na armadura longitudinal da viga |
| ε_s | Deformação do aço |
| ε_s | Deformação de escoamento do aço |
| ϕ | Diâmetro de uma barra de aço |
| ϕ_1 | Diâmetro de uma barra de aço do estribo |
| ϕ_2 | Diâmetro de uma barra de aço da armadura longitudinal da viga ou laje |
| λ_G | Coefficiente utilizado por Kayani (1992) no método de cálculo para estimar a resistência efetiva de concreto |
| ρ | Taxa de armadura |
| σ_c | Tensão de compressão em uma seção transversal do pilar |
| σ_y | Valor da tensão local máxima na ruptura em uma seção transversal do pilar |

Lista de abreviaturas

| | |
|------------|---|
| ACI | American Concrete Institute |
| CAA | Concreto Auto-adensável |
| CAD | Concreto de Alto Desempenho |
| CAR | Concreto de Alta Resistência |
| CEB | Euro-International Committe for Concrete |
| CONAD | Concreto de Altíssimo Desempenho |
| COPPE-UFRJ | Instituto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia |
| CSA | Canadian Standards Association |
| FIP | International Federation for Prestressing |
| LEM-DEC | Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil |
| M.R. | Modo de Ruptura |
| NBR | Norma Brasileira |
| PROCAD | Programa Nacional de Cooperação Acadêmica |
| PUC-RJ | Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro |
| PVdx | Pilar com viga na direção x |
| PVdxy | Pilar com vigas na direção x e y |
| SG | Strain Gage |
| TD | Transdutor de Deslocamento |
| UFG | Universidade Federal de Goiás |
| UnB | Universidade de Brasília |