



Fernando Busato Ramires

**Contribuição das componentes
mistas em ligações semi-rígidas**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil como requisitos parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Sebastião A. L. de Andrade
Co-orientador: Pedro C. G. da S. Vellasco

Rio de Janeiro
Junho de 2010



Fernando Busato Ramires

**Contribuição das componentes
mistas em ligações semi-rígidas**

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

Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade

Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC - Rio

Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Co- Orientador
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães

Departamento de Engenharia Civil – PUC - Rio

Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial
do Centro Técnico Científico – PUC - Rio

Rio de Janeiro, 18 de Junho de 2010.

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

Fernando Busato Ramires

Graduou-se em Engenharia Civil, ênfase em Estruturas, pela UPF - Universidade de Passo Fundo em 1996. Obteve o título de Mestre em Ciências pela Universidade Católica do Rio de Janeiro em Fevereiro de 2004. Possui vários trabalhos publicados em atas de conferências internacionais na área de Ligações Estruturais em Aço e Concreto.

Ficha catalográfica

Ramires, Fernando Busato

Contribuição das componentes mistas em ligações semi-rígidas / Fernando Busato Ramires ; orientador: Sebastião Arthur Lopes de Andrade ; co-orientador: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco. – 2010.

300 f. il. (color.) ; 29.7 cm

Tese(Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Ligações viga-pilar. 3. Ligações semi-rígidas mistas. 4. Método das componentes. 5. Normas européias. 6. Resistência à flexão. 7. Otimização de ligações semi-rígidas. I. Andrade, Sebastião Arthur Lopes de. II. Vellasco, Pedro Colmar Gonçalves da Silva. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Ao professor e orientador Sebastião Arthur Lopes de Andrade, pelos relevantes conhecimentos transmitidos e pelo convívio e amizade desenvolvida ao longo deste trabalho.

Ao co-orientador Pedro Colmar G. da S. Vellasco, pelos conhecimentos transmitidos na área de estruturas e pela paciência, amizade, apoio e o incentivo constante durante todo curso e principalmente na parte final da tese.

Aos professores que participaram da banca examinadora.

A minha família pelo incentivo durante toda a minha vida, em especial pela minha mãe, por sempre estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos colegas Magnus, Larissa, Paul, Zé, Euclides, Evandro e Aroldo pelo estímulo à realização deste trabalho, pela longas horas no laboratório e principalmente pelo companheirismo.

Em especial aos amigos e também colegas Alexandre Almeida Del Sávio, Juliana da Cruz Vianna e Ricardo Rodrigues Araujo (“Rick”) que auxiliaram e motivaram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu amor, Eliane, por estar sempre ao meu lado, incentivando, e sendo um exemplo motivador para continuidade deste trabalho e da minha vida.

Às secretárias Ana Roxo e Rita, pelo apoio e atenção ao longo do curso.

Ao professor Emil pela presteza em conseguir material para a concretagem junto a OLCIN que forneceu o concreto para realização dos ensaios.

Ao CNPq, CAPES, TEC-GRAF e a PUC - Rio pelo apoio financeiro.

A Deus, por permitir tudo isso.

Resumo

Ramires, Fernando Busato; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de (Orientador); Vellasco, Pedro Colmar G. da Silva (co-orientador). **Contribuição das componentes mistas em ligações semi-rígidas**. Rio de Janeiro, 2010. 300p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As ligações viga-pilar desempenham uma função fundamental para a determinação do comportamento real de estruturas de aço e mistas. Portanto torna-se necessária uma avaliação muito criteriosa das reais características geométricas e mecânicas destas ligações, substituindo as tradicionais considerações idealizadas, rígida e flexível, pela modelagem semi-rígida em aço ou mista. Com a intenção de dar continuidade do estudo sobre ligações semi-rígidas em aço e desenvolver um estudo sobre as ligações semi-rígidas mistas, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica destes assuntos apresentando os parâmetros a serem desenvolvidos nesta pesquisa. Foi implementado computacionalmente um sistema de análise e dimensionamento capaz de avaliar o comportamento estrutural destas ligações a partir da informação das propriedades geométricas de ligações viga-pilar executadas com placa de extremidade em aço e mistas, produzindo uma base de dados para um projeto estrutural mais seguro. Um projeto experimental foi desenvolvido para avaliar o caminho de transmissão de esforços, através de modelos experimentais de laboratório, na forma de ensaios pull-out modificados, adaptando-se este ensaio para regiões de momento negativo, onde a laje de concreto se encontra fissurada, obtendo um ensaio capaz de produzir resultados que contribuam com o desenvolvimento da pesquisa de ligações semi-rígidas em aço e mistas.

Palavras-chave

Ligações Viga-Pilar; Ligações Semi-Rígidas Mistas; Método das Componentes; Normas Européias; Resistência à Flexão; Otimização de Ligações Semi-Rígidas.

Abstract

Ramires, Fernando Busato; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de; Vellasco, Pedro Colmar G. da Silva (advisors). **Composite Componente Contribution on Semi-rigid Joint Response**. Rio de Janeiro, 2010. 300p. Dsc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The beam-column connections play a key role in determining the actual behavior of steel and composite structures. Therefore it is necessary a very careful assessment of the real geometrical and mechanical characteristics of these joints, replacing the traditional idealized considerations, rigid and flexible for modeling semi-rigid steel or composite. With the intention of continuing the study of semi-rigid connections in steel and develop a study on the semi-rigid composite connections, was initially performed a revision of startled presenting the parameters to be developed in this research. We have implemented a computational system analysis and design capable of evaluating the structural behavior of these joints from the information of the geometric properties of beam-column connection with end plate executed in steel and composited, producing a database for a structural design safer. An experimental project was designed to evaluate the path transmittance of efforts, through experimental models of laboratory tests in the form of modified pull-out, adapting this test for regions of negative moment, where the concrete slab is cracked, obtaining a test that can produce results that contribute for the development of research of semi-rigid connections in steel and composite.

Keywords

Beam-to-column Connections; Semi-rigid connections; Component Method; European Standards; Bending Capacity; Optimization of Semi-rigid Connection; Composite Connections; Steel Connections.

Sumário

1 Introdução.....	34
1.1 Motivação	36
1.2 Objetivos.....	37
1.3 Contribuições.....	37
1.4 Descrição Global / Escopo	39
2 Ligações Semi-rígidas: Viga versus Pilar	41
2.1 Introdução às Ligações Semi-rígidas	41
2.2 Funcionamento Básico do Sistema Misto.....	46
2.3 Classificação das Ligações Segundo o Eurocode 3 [1] [2] [3]	58
2.3.1 Introdução.....	58
2.3.2 Dimensionamento das Ligações Semi-Rígidas	58
2.3.2.1 Modelo Mecânico.....	59
2.3.2.2 Procedimento para Análise da Rigidez Rotacional da Ligação.....	61
2.3.2.3 Procedimento para Análise da Resistência à Flexão da Ligação	63
2.3.2.4 Curva Momento versus Rotação	65
3 Análise e Dimensionamento de Ligações Semi-rígidas.....	70
3.1 Introdução a Análise do Comportamento Semi-rígido	70
3.2 Comportamento Estrutural de Ligações	72
3.2.1 Ligações em Aço	72
3.2.2 Ligações Mistas	75
3.3 Descrição das Componentes	77

3.3.1 Componentes do Aço.....	77
3.3.1.1 Alma do Pilar Submetida ao Esforço Cortante (cws).....	77
3.3.1.2 Alma do Pilar Submetida à Compressão (cwc)	82
3.3.1.3 Alma do Pilar Submetida à Tração (cwt)	84
3.3.1.4 Mesa do Pilar Submetida à Flexão (cfb).....	87
3.3.1.5 Placa de Extremidade Submetida à Flexão (epb)	90
3.3.1.6 Alma e Mesa da Viga Submetidos à Compressão (bfc).....	92
3.3.1.7 Alma da Viga Submetida à Tração (bwt).....	93
3.3.1.8 Parafusos Submetidos à Tração (bt).....	94
3.3.2 Componentes do Sistema Misto.....	95
3.3.2.1 Armadura Longitudinal Submetida à Tração (rbt).....	95
3.3.3 Componentes do Concreto Armado.....	97
3.3.3.1 Painel de Alma do Pilar Submetido ao Cisalhamento.....	97
3.3.3.2 Alma do Pilar Submetido a Compressão Transversal	97
3.4 Distribuição das Solicitações.....	98
3.5 Ligações Semi-rígidas Através do Programa SRJ Tool.....	100
3.5.1 Introdução ao uso do programa SRJ Tool.....	101
3.5.2 Exemplo de Ligação com Placa de Extremidade Estendida.....	101
3.5.3 Exemplo de Ligação com Placa de Extremidade Ajustada.....	111
4 Caracterização dos Ensaios Experimentais	120
4.1 Introdução.....	120
4.2 Escolha do Modelo Experimental.....	121
4.2.1 Caracterização das Principais Variáveis	122
4.2.2 Caracterização das Variáveis Avaliadas	124
4.3 Projeto dos Modelos Experimentais	127
4.3.1 Projeto dos Ensaios de Pull-out	128
4.3.1.1 Confinamento Total.....	129
4.3.1.2 Confinamento Parcial.....	130

4.3.1.3 Sem Confinamento	130
4.3.1.4 Ancoragem da Laje	131
5 Análise Experimental	133
5.1 Descrição dos Ensaios.....	133
5.1.1 Pré-Ensaios	135
5.1.1.1 Breve Descrição dos Pré-Ensaios.....	136
5.1.1.2 Caracterização dos Materiais	137
5.1.1.3 Montagem da Estrutura de Travamento do Pré-Ensaio.....	141
5.1.1.4 Configuração dos Ensaios Pull-out	145
5.1.1.4.1. Geometria	145
5.1.1.4.2. Concretagem.	148
5.1.1.4.3. Instrumentação	149
5.1.1.4.4. Montagem do Pull-out	152
5.1.1.4.5. Previsão dos Resultados.....	155
5.1.1.4.6. Descrição dos Pré-Ensaios	157
5.1.2 Ensaios	164
5.1.2.1 Breve Descrição dos Ensaios.....	164
5.1.2.2 Caracterização dos Materiais	165
5.1.2.2.1. Montagem da Estrutura do Ensaio Pull-out.....	166
5.1.2.2.2. Configuração dos Pull-out	166
5.1.2.2.3. Geometria	166
5.1.2.2.4. Concretagem	169
5.1.2.2.5. Instrumentação	171
5.1.2.2.6. Montagem do Pull-out	175
5.1.2.2.7. Previsão dos Resultados.....	176
5.1.2.2.8. Descrição dos Ensaios Definitivos e Modos de Ruptura.....	179

6 Resultados das Análises Experimentais	187
6.1 Ensaios da Série PO-1X	187
6.1.1 Ensaio PO-11.....	188
6.1.1.1 Extensômetros Elétricos.....	188
6.1.1.2 LVDT's.....	192
6.1.2 Ensaios PO-12.....	194
6.1.2.1 Extensômetros Elétricos.....	195
6.1.2.2 LVDT's.....	198
6.1.3 Ensaios PO-13.....	200
6.1.3.1 Extensômetros Elétricos.....	201
6.1.3.2 LVDT's.....	203
6.2 Ensaios da Série PO-2X	205
6.2.1 Ensaios PO-21.....	205
6.2.1.1 Extensômetros Elétricos.....	205
6.2.1.2 LVDT's.....	211
6.2.2 Ensaios PO-22.....	213
6.2.2.1 Extensômetros Elétricos.....	213
6.2.2.2 LVDT's.....	215
6.2.3 Ensaios PO-23.....	217
6.2.3.1 Extensômetros Elétricos.....	217
6.2.3.2 LVDT's.....	222
6.3 Ensaios da Série PO-7X	224
6.3.1 Ensaios PO-71.....	225
6.3.1.1 Extensômetros Elétricos.....	225
6.3.1.2 LVDT's.....	229
6.3.2 Ensaios PO-72.....	231
6.3.2.1 Extensômetros Elétricos.....	231
6.3.2.2 LVDT's.....	234
6.3.3 Ensaios PO-73.....	237

6.3.3.1	Extensômetros Elétricos.....	237
6.3.3.2	LVDT's.....	241
6.4	Ensaio da Série PO-8X	243
6.4.1	Ensaio PO-81.....	244
6.4.1.1	Extensômetros Elétricos.....	244
6.4.1.2	LVDT's.....	251
6.4.2	Ensaio PO-82.....	253
6.4.2.1	Extensômetros Elétricos.....	253
6.4.2.2	LVDT's.....	258
6.4.3	Ensaio PO-83.....	260
6.4.3.1	Extensômetros Elétricos.....	260
6.4.3.2	LVDT's.....	265
6.5	Ensaio da Série PO-0X	267
6.5.1	Ensaio PO-0.1.....	267
6.5.1.1	Extensômetros Elétricos.....	267
6.5.1.2	LVDT's.....	273
6.5.2	Ensaio PO-0.2.....	274
6.5.2.1	Gage's.....	274
6.5.2.2	LVDT's.....	279
7	Considerações Finais	281
7.1.1	Conclusões.....	281
7.1.2	Contribuições do Trabalho	294
7.1.3	Sugestão para Trabalhos Futuros	295
	Referências Bibliográficas.....	297

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Pórtico de ligações rígidas.....	41
Figura 2.2 - Pórtico de ligações flexíveis.....	42
Figura 2.3 - Pórtico de ligações semi-rígidas	42
Figura 2.4 - Viga bi-apoiada.....	43
Figura 2.5 - Viga bi-engastada.....	43
Figura 2.6 - Viga com ligações semi-rígidas.....	44
Figura 2.7 – Descrição do conjunto da ligação mista	45
Figura 2.8 – Funcionamento básico do sistema misto.....	46
Figura 2.9 – Conector de cisalhamento tipo pino com cabeça.....	47
Figura 2.10 – Gráficos dos modos de interação.....	47
Figura 2.11 – Transferência da força de cisalhamento do sistema misto.....	47
Figura 2.12 – Comportamento idealizado de um tirante de concreto armado [19].....	49
Figura 2.13 – Deformações ao longo do tirante de concreto armado: (a) formação da primeira fissura; (b) estado de fissuração estabilizado;	50
Figura 2.14 – Diagrama tensão versus deformação simplificada para armaduras envolvidas pelo concreto.	52
Figura 2.15 - Rotação da viga com relação ao pilar	54
Figura 2.16 - Comportamento M versus ϕ de alguns tipos de ligações	55

Figura 2.17 – Diagrama aproximado força-deslocamento representativo de uma componente genérica	55
Figura 2.18 – Gráfico momento versus rotação e curva bilinear de comportamento.....	58
Figura 2.19 - Zonas de verificação.....	59
Figura 2.20 - Modelo mecânico de ligações viga - pilar.....	60
Figura 2.21 - Componentes da ligação mista com placa de extremidade estendida.....	61
Figura 2.22 - Componentes identificadas no modelo mecânico	62
Figura 2.23 - Rigidez equivalente de cada linha de parafusos.....	62
Figura 2.24 - Representação do braço de alavanca das linhas de parafusos e da linha da armadura tracionada	63
Figura 2.25 - Resistência da linha 1.....	64
Figura 2.26 - Resistência das linhas 2 e 1	64
Figura 2.27 - Diferentes representações da curva: momento versus rotação.....	66
Figura 2.28 - Classificação da ligação viga-pilar	66
Figura 2.29 - Análise elástica da estrutura e da ligação	68
Figura 2.30 - Análise plástica da ligação.....	69
Figura 3.1 – Ligação com placa de extremidade estendida (“ <i>extended end plate em aço</i> ”).....	71
Figura 3.2 - Ligação com placa de extremidade não estendida (“ <i>flush end plate em aço</i> ”).....	71
Figura 3.3 – Ligação mista com placa de extremidade estendida (“ <i>composite extended end plate</i> ”)	71
Figura 3.4 - Ligação com placa de extremidade não estendida (“ <i>composite flush end plate</i> ”)	71
Figura 3.5 - Ligação com placa de extremidade com solitação bilateral.....	72
Figura 3.6 - Orientação do “T-stub”	72
Figura 3.7 - Mecanismos de colapso	73

Figura 3.8 - Formação das charneiras plásticas.....	74
Figura 3.9 – Algumas combinações das charneiras plásticas e notações geométricas	74
Figura 3.10 - Algumas combinações das charneiras plásticas e notações geométricas	75
Figura 3.11 – Sistema de forças atuantes no painel de alma, Faella [12]	77
Figura 3.12 – Mecanismo do painel de alma.....	79
Figura 3.13 – Enrijecedores transversais	80
Figura 3.14 - Enrijecedores em diagonal.....	80
Figura 3.15 - Placa de reforço no painel de alma.....	81
Figura 3.16 - Sistema de compressão na alma do pilar	82
Figura 3.17 - Ábaco e parâmetros geométricos para determinação de α	86
Figura 3.18 - Combinação das linhas de parafusos para a alma e mesa do pilar.....	86
Figura 3.19 – Definição do “T-stub” da alma do pilar.....	87
Figura 3.20 - Detalhamento do “T-stub”	88
Figura 3.21 - Placas de reforço da mesa do pilar.....	89
Figura 3.22 - Mecanismos de colapso da linha externa de parafusos acima da mesa superior da viga.....	90
Figura 3.23 - Parâmetros geométricos da mesa do pilar e da placa de extremidade.....	92
Figura 3.24 - Alma e mesa da viga submetidos à compressão	92
Figura 3.25 - Alma da viga submetida à tração.....	93
Figura 3.26 - Detalhamento do comprimento útil do parafuso.....	94
Figura 3.27 - Representação da armadura longitudinal na ligação	95
Figura 3.28 – Determinação do comprimento L, alongamento da armadura longitudinal	96
Figura 3.29 – Alma do pilar embutida no concreto	97

Figura 3.30 - Distribuição das solicitações nos parafusos.....	98
Figura 3.31 - Formas de distribuição das solicitações na ligação em aço.....	99
Figura 3.32 - Distribuição das solicitações na ligação mista.....	100
Figura 3.33 - Ligação com placa de extremidade estendida.....	101
Figura 3.34 - Informações gerais de projeto.....	102
Figura 3.35 - Características da estrutura.....	102
Figura 3.36 - Dados da ligação.....	103
Figura 3.37 - Determinação dos elementos usados.....	104
Figura 3.38 - Solda entre viga e placa de extremidade.....	104
Figura 3.39 - Dados das componentes da placa de extremidade.....	106
Figura 3.40 - Esforços atuantes.....	106
Figura 3.41 - Resultados da análise da ligação.....	107
Figura 3.42 - Verificação da consistência de dados da ligação.....	108
Figura 3.43 - Botões de cálculo da ligação e custos.....	108
Figura 3.44 - Liberação do botão do gerador de relatório.....	109
Figura 3.45 - Opções do relatório geral.....	109
Figura 3.46 - Editor do SRJ Tool.....	110
Figura 3.47 - Opções dos custos da ligação.....	110
Figura 3.48 - Cálculo dos custos e do material da ligação.....	110
Figura 3.49 - Ligação parafusada com placa de extremidade não estendida.....	111
Figura 3.50 – Elementos utilizados pelo exemplo misto.....	112
Figura 3.51 – Janela de resultados do exemplo misto.....	119
Figura 4.1 - Viga contínua.....	121
Figura 4.2 - Elementos de composição da região de momento negativo.....	121

Figura 4.3 - Componentes da região de momento negativo.....	122
Figura 4.4 – Padrão para espaçamento dos conectores (d1 e d2).....	125
Figura 4.5 – Principais elementos que compõem o ensaio inicial.....	127
Figura 4.6 – Modelo Pull-out posicionado para ensaio.....	128
Figura 4.7 – Sistema de contenção.....	129
Figura 4.8 – Modelo Pull-out – Confinamento Total.....	129
Figura 4.9 – Modelo Pull-out – Confinamento Parcial.....	130
Figura 4.10 – Modelo Pull-out – Sem Confinamento.....	131
Figura 4.11 – Modelo Pull-out – Sem Confinamento, ancoragem e tração.....	132
Figura 5.1 – Forma metálica.....	133
Figura 5.2 – Sistema de travamento com vigas metálicas.....	134
Figura 5.3 – Posicionamento dos extensômetros.....	135
Figura 5.4 – Material para montagem das estruturas pull-out.....	136
Figura 5.5 – Dosagem Experimental.....	137
Figura 5.6 – Armadura de 5 mm.....	137
Figura 5.7 – Armadura dos estribos.....	138
Figura 5.8 – Armadura Principal.....	139
Figura 5.9 – Perfil Metálico Principal.....	139
Figura 5.10 – Perfil de Travamento do Primeiro Nível.....	140
Figura 5.11 – Perfil de Travamento do Segundo Nível.....	140
Figura 5.12 – Conectores de Cisalhamento.....	141
Figura 5.13 – Mesinhas de apoio dos pull-out's.....	141
Figura 5.14 – Barras redondas posicionadas nos furos.....	142
Figura 5.15 – Pontos de apoio em neoprene.....	142
Figura 5.16 – Placa de distribuição de tensões.....	143
Figura 5.17 – Placas de apoio dos perfil de travamento.....	143

Figura 5.18 – Estrutura de fixação e travamento dos perfis.....	144
Figura 5.19 – Perfis de travamento do segundo nível	144
Figura 5.20 – Estrutura de travamento e pull-out prontos para a execução do teste	145
Figura 5.21 – Geometria dos perfis metálicos principais.....	145
Figura 5.22 – Perfil metálico de travamento do primeiro nível.....	146
Figura 5.23 – Perfil metálico de travamento do segundo nível.....	146
Figura 5.24 – Barra redonda	146
Figura 5.25 – Posicionamento dos conectores de cisalhamento.....	147
Figura 5.26 – Lajes de concreto.....	147
Figura 5.27 – Armaduras	148
Figura 5.28 – Extensômetros nas armaduras principais dos pull-out's	149
Figura 5.29 – Extensômetros nas armaduras principais.....	150
Figura 5.30 – Extensômetros nas armaduras de 5mm.....	151
Figura 5.31 – Posicionamento dos LVDT's	151
Figura 5.32 – Localização e identificação dos LVDT's	152
Figura 5.33 – Posicionamento do Perfil Metálico	153
Figura 5.34 – Montagem das armaduras	153
Figura 5.35 – Posicionamento de Concretagem do Pull-out	154
Figura 5.36 – Posicionamento do Pull-out Sobre a Mesa.....	155
Figura 5.37 –Pull-out 0.1.....	157
Figura 5.38 –Atuador Hidráulico Sem a Cabeça Rotulada	158
Figura 5.39 – Flambagem dos Perfis de Travamento do Primeiro Nível	158
Figura 5.40 – Perfil de Travamento Composto.....	159

Figura 5.41 – Amassamento das Mesas do Perfil de Travamento	160
Figura 5.42 – Arruela Para Distribuição das Solicitações.....	161
Figura 5.43 – Arruelas com Afundamento.....	161
Figura 5.44 – Arruelas de 25,4mm.....	162
Figura 5.45 – Ruptura do Pull-out PO 0.1	162
Figura 5.46 – Pull-out PO 0.2.....	163
Figura 5.47 – Ruptura do Pull-out PO 0.2	163
Figura 5.48 – Espécimes a serem concretados	165
Figura 5.49 – Geometria dos perfis metálicos principais.....	166
Figura 5.50 – Distribuição dos conectores do PO-11, PO-12 e PO-13	167
Figura 5.51 – Distribuição dos conectores do PO-21, PO-22 e PO-23	167
Figura 5.52 – Distribuição dos conectores do PO-71, PO-72 e PO-73	167
Figura 5.53 – Distribuição dos conectores do PO-81, PO-82 e PO-83	168
Figura 5.54 – Seção mista da segunda etapa dos ensaios	168
Figura 5.55 – Comprimento das armaduras principais	169
Figura 5.56 – Concretagem dos ensaios.....	170
Figura 5.57 – Corpos de prova	170
Figura 5.58 – Posicionamentos dos extensômetros na série de ensaios PO 1X	171
Figura 5.59 – Posicionamentos dos extensômetros na série de ensaios PO 8X	172
Figura 5.60 – Posicionamentos dos extensômetros na série de ensaios PO 2X	172
Figura 5.61 – Posicionamentos dos extensômetros na série de ensaios PO 7X	172
Figura 5.62 – Posicionamento dos LVDT's.....	173
Figura 5.63 – Locação e identificação dos LVDT's dos ensaios	174

Figura 5.64 – Montagem da Forma para a Concretagem do Pull-out	176
Figura 5.65 – Ruptura da solda dos conectores de cisalhamento.....	179
Figura 5.66 – Detalhe das rupturas das soldas dos conectores	180
Figura 5.67 – Padrão de ensaios da série PO-1X.....	180
Figura 5.68 – Modificação da estrutura do ensaios PO-13.....	181
Figura 5.69 – Ruptura na barra do ensaio PO-13	181
Figura 5.70 – Padrão de ensaios da série PO-2X.....	182
Figura 5.71 – Colapso na alma do perfil do ensaio PO-22	183
Figura 5.72 – Padrão de ensaios da série PO-7X.....	183
Figura 5.73 – Ruptura da ancoragem da barra de armadura do ensaio PO-72.....	184
Figura 5.74 – Padrão de ensaios da série PO-8X.....	184
Figura 5.75 – Modificação na estrutura do ensaio PO-82.....	185
Figura 5.76 – Modificação na estrutura do ensaio PO-83.....	185
Figura 5.77 – Ruptura da ancoragem da barra de armadura do ensaio PO-82.....	186
Figura 5.78 – Ruptura da ancoragem da barra de armadura do ensaio PO-83.....	186
Figura 6.1 – Posicionamento padrão dos extensômetros e barras de armadura	187
Figura 6.2 – Referência para análise de resultados	188
Figura 6.3 – Gráfico carga x deformação do grupo g1.	189
Figura 6.4 – Gráfico Carga x deformação do grupo g2.	189
Figura 6.5 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.	190
Figura 6.6 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.	191
Figura 6.7 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.	191
Figura 6.8 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.	192
Figura 6.9 – Posicionamento dos LVDT's.....	192

Figura 6.10 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	193
Figura 6.11 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	194
Figura 6.12 – Gráfico carga x deformação do grupo g1.	195
Figura 6.13 – Gráfico Carga x deformação do grupo g2.....	196
Figura 6.14 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.....	196
Figura 6.15 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.....	197
Figura 6.16 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	197
Figura 6.17 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	198
Figura 6.18 – Posicionamento dos LVDT's.....	198
Figura 6.19 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	199
Figura 6.20 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	200
Figura 6.21 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.....	201
Figura 6.22 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.....	201
Figura 6.23 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	202
Figura 6.24 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	202
Figura 6.25 – Posicionamento dos LVDT's.....	203
Figura 6.26 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	204
Figura 6.27 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	204
Figura 6.28 – Referência para análise de resultados	205
Figura 6.29 – Gráfico carga x deformação do grupo g1- lado 1.....	206
Figura 6.30 – Gráfico carga x deformação do grupo g1- lado 2.....	207
Figura 6.31 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.....	207
Figura 6.32 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.....	207
Figura 6.33 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	208

Figura 6.34 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	208
Figura 6.35 – Gráfico Carga x deformação do grupo g7.....	209
Figura 6.36 – Gráfico Carga x deformação do grupo g8.....	209
Figura 6.37 – Gráfico Carga x deformação do grupo g9.....	210
Figura 6.38 – Gráfico Carga x deformação do grupo g10.....	210
Figura 6.39 – Posicionamento dos LVDT's.....	211
Figura 6.40 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	212
Figura 6.41 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	212
Figura 6.42 – Gráfico carga x deformação do grupo g1- lado 1.....	213
Figura 6.43 – Gráfico carga x deformação do grupo g1- lado 2.....	214
Figura 6.44 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	214
Figura 6.45 – Posicionamento dos LVDT's.....	215
Figura 6.46 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	216
Figura 6.47 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	216
Figura 6.48 – Gráfico carga x deformação do grupo g1- lado 1.....	217
Figura 6.49 – Gráfico carga x deformação do grupo g1- lado 2.....	218
Figura 6.50 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.....	218
Figura 6.51 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.....	219
Figura 6.52 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	219
Figura 6.53 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	220
Figura 6.54 – Gráfico Carga x deformação do grupo g7.....	220
Figura 6.55 – Gráfico Carga x deformação do grupo g8.....	221
Figura 6.56 – Gráfico Carga x deformação do grupo g9.....	221
Figura 6.57 – Gráfico Carga x deformação do grupo g10.....	222

Figura 6.58 – Posicionamento dos LVDT's	222
Figura 6.59 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	223
Figura 6.60 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	224
Figura 6.61 – Referência para análise de resultados	224
Figura 6.62 – Gráfico carga x deformação do grupo g1.	225
Figura 6.63 – Gráfico Carga x deformação do grupo g2.....	226
Figura 6.64 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.....	227
Figura 6.65 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.....	227
Figura 6.66 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	228
Figura 6.67 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	228
Figura 6.68 – Posicionamento dos LVDT's	229
Figura 6.69 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	230
Figura 6.70 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	230
Figura 6.71 – Gráfico carga x deformação do grupo g1.	231
Figura 6.72 – Gráfico Carga x deformação do grupo g2.....	232
Figura 6.73 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.....	232
Figura 6.74 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.....	233
Figura 6.75 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	233
Figura 6.76 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	234
Figura 6.77 – Posicionamento dos LVDT's	235
Figura 6.78 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	236
Figura 6.79 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	236
Figura 6.80 – Gráfico carga x deformação do grupo g1.	237
Figura 6.81 – Gráfico Carga x deformação do grupo g2.....	238
Figura 6.82 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.....	239

Figura 6.83 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.....	239
Figura 6.84 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	240
Figura 6.85 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	240
Figura 6.86 – Posicionamento dos LVDT's.....	241
Figura 6.87 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	242
Figura 6.88 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	243
Figura 6.89 – Referência para análise de resultados	243
Figura 6.90 – Gráfico carga x deformação do grupo g1- lado 1.....	244
Figura 6.91 – Gráfico carga x deformação do grupo g1- lado 2.....	245
Figura 6.92 – Gráfico Carga x deformação do grupo g2- lado 1.....	245
Figura 6.93 – Gráfico Carga x deformação do grupo g2- lado 2.....	246
Figura 6.94 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.....	246
Figura 6.95 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.....	247
Figura 6.96 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	248
Figura 6.97 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	248
Figura 6.98 – Gráfico Carga x deformação do grupo g7.....	249
Figura 6.99 – Gráfico Carga x deformação do grupo g8.....	249
Figura 6.100 – Gráfico Carga x deformação do grupo g9.....	250
Figura 6.101 – Gráfico Carga x deformação do grupo g10.....	250
Figura 6.102 – Posicionamento dos LVDT's.....	251
Figura 6.103 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	252
Figura 6.104 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	252
Figura 6.105 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.....	254
Figura 6.106 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.....	254

Figura 6.107 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	255
Figura 6.108 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	255
Figura 6.109 – Gráfico Carga x deformação do grupo g7.....	256
Figura 6.110 – Gráfico Carga x deformação do grupo g8.....	256
Figura 6.111 – Gráfico Carga x deformação do grupo g9.....	257
Figura 6.112 – Gráfico Carga x deformação do grupo g10.....	257
Figura 6.113 – Posicionamento dos LVDT's.....	258
Figura 6.114 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	259
Figura 6.115 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	259
Figura 6.116 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.....	261
Figura 6.117 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.....	261
Figura 6.118 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	262
Figura 6.119 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	262
Figura 6.120 – Gráfico Carga x deformação do grupo g7.....	263
Figura 6.121 – Gráfico Carga x deformação do grupo g8.....	263
Figura 6.122 – Gráfico Carga x deformação do grupo g9.....	264
Figura 6.123 – Gráfico Carga x deformação do grupo g10.....	264
Figura 6.124 – Posicionamento dos LVDT's.....	265
Figura 6.125 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7 e 8.....	266
Figura 6.126 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .3, 4, 5 e 6.....	266
Figura 6.127 – Referência para análise de resultados	267
Figura 6.128 – Gráfico Carga x deformação do grupo g2B.....	268
Figura 6.129 – Gráfico Carga x deformação do grupo g3.....	269
Figura 6.130 – Gráfico Carga x deformação do grupo g4.....	269
Figura 6.131 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	270
Figura 6.132 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	270

Figura 6.133 – Gráfico Carga x deformação do grupo g7.....	271
Figura 6.134 – Gráfico Carga x deformação do grupo g8.....	271
Figura 6.135 – Gráfico Carga x deformação do grupo g9.....	272
Figura 6.136 – Gráfico Carga x deformação do grupo g10.....	272
Figura 6.137 – Posicionamento dos LVDT's.....	273
Figura 6.138 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 7, 8, 9 e 10.....	274
Figura 6.139 – Referência para análise de resultados	275
Figura 6.140 – Gráfico carga x deformação do grupo g1A.....	276
Figura 6.141 – Gráfico Carga x deformação do grupo g1B.....	276
Figura 6.142 – Gráfico Carga x deformação do grupo g2.....	277
Figura 6.143 – Gráfico Carga x deformação do grupo g5.....	277
Figura 6.144 – Gráfico Carga x deformação do grupo g6.....	278
Figura 6.145 – Gráfico Carga x deformação do grupo g7.....	278
Figura 6.146 – Gráfico Carga x deformação do grupo g9.....	279
Figura 6.147 – Posicionamento dos LVDT's.....	279
Figura 6.148 – Gráfico Carga x deslocamento dos LVDT's .1, 2, 3, 6 e 7.....	280

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Largura efetiva para elementos não enrijecidos	84
Tabela 3.2 - Largura efetiva para elementos enrijecidos	85
Tabela 3.3 – Larguras efetivas para a placa de extremidade	91
Tabela 3.4 - Momento resistente e rigidez rotacional inicial	108
Tabela 3.5 - Alma do pilar submetido ao cisalhamento	112
Tabela 3.6 - Alma do pilar submetido a compressão	113
Tabela 3.7 - Alma do pilar submetido a tração	113
Tabela 3.8 - Mesa do pilar submetido a flexão	114
Tabela 3.9 - Placa de extremidade submetida a flexão	114
Tabela 3.10 - Parafusos tracionados	115
Tabela 3.11 - Mesa da viga submetida a compressão	115
Tabela 3.12 - Alma da viga submetida a tração	116
Tabela 3.13 - Distribuição plástica das forças internas	116
Tabela 3.14 - Momento resistente e momento resistente elástico	117
Tabela 3.15 - Momento resistente e momento resistente elástico da ligação em aço e mista	117
Tabela 3.16 – Rigidez rotacional efetiva	117
Tabela 3.17 – Braço de alavanca e rigidez rotacional equivalente	117
Tabela 3.18 – Rigidez rotacional inicial e idealizada	118
Tabela 3.19 – Rigidez rotacional inicial e idealizada das ligações em aço e mistas	118
Tabela 3.20 - Resistência ao cisalhamento dos parafusos	118

Tabela 4.1 – Primeira descrição das componentes e as suas características mais comuns.....	124
Tabela 4.2 – Segunda descrição das componentes e suas características comuns.	125
Tabela 4.3 – Descrição final das componentes e as suas características mais comuns.....	125
Tabela 4.4 - Matriz de combinações do arranjo 2 ⁷ (L8).....	126
Tabela 4.5 – Matriz de combinações resultante com as variáveis e níveis.	126
Tabela 5.1 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 0.1	156
Tabela 5.2 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 0.2	156
Tabela 5.3 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 11, PO 12 e PO 13	177
Tabela 5.4 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 21, PO 22 e PO 23	177
Tabela 5.5 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 71, PO 72 e PO 73	178
Tabela 5.6 – Planilha de Previsão dos Resultados do PO 81, PO 82 e PO 83	178
Tabela 7.1 – Comparação entre extensômetro (GAGE 2) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 6) externo a laje de concreto. PO-11	283
Tabela 7.2 – Comparação entre extensômetro (GAGE 2) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 7) externo a laje de concreto. PO-12.....	284
Tabela 7.3 – Comparação entre extensômetro (GAGE 0) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 5) externo a laje de concreto. PO-13	284
Tabela 7.4 – Comparação entre extensômetro (GAGE 19) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 27) externo a laje de concreto. PO-21	285
Tabela 7.5 – Comparação entre extensômetro (GAGE 5) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 12) externo a laje de concreto. PO-22	286
Tabela 7.6 – Comparação entre extensômetro (GAGE 5) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 13) externo a laje de concreto. PO-23	286
Tabela 7.7 – Comparação entre extensômetro (GAGE 1) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 4) externo a laje de concreto. PO-71	287

Tabela 7.8 – Comparação entre extensômetro (GAGE 10) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 14) externo a laje de concreto. PO-72	288
Tabela 7.9 – Comparação entre extensômetro (GAGE 1) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 4) externo a laje de concreto. PO-73	288
Tabela 7.10 – Comparação entre extensômetro (GAGE 5) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 12) externo a laje de concreto. PO-81	289
Tabela 7.11 – Comparação entre extensômetro (GAGE 17) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 24) externo a laje de concreto. PO-82	289
Tabela 7.12 – Comparação entre extensômetro (GAGE 17) envolvido pelo concreto e extensômetro (GAGE 24) externo a laje de concreto. PO-83	290
Tabela 7.13 – Efeitos entre os ensaios PO-13 e PO-72, visando o comprimento de ancoragem.	291
Tabela 7.14 – Efeitos entre os ensaios PO-22 e PO-82, visando o comprimento de ancoragem.	292
Tabela 7.15 – Efeitos entre os ensaios PO-13, PO-22, PO-72 e PO-82, visando o volume de armadura na laje.....	293

Lista de Símbolos

A	área bruta da seção transversal do perfil da coluna
A_s	área do parafuso
A_{vc}	área de corte da alma da coluna
$b_{eff,c,wc}$	largura efetiva da alma da coluna submetida à compressão
$b_{eff,t,wb}$	largura efetiva da alma da coluna submetida à tração
b_f	largura da mesa da coluna
$B_{t,Rd}$	resistência de um parafuso submetido à tração
E	módulo de elasticidade longitudinal
f_{ur}	tensão limite última do parafuso
f_y	tensão limite de escoamento do material
$f_{y,wc}$	tensão limite de escoamento da alma da coluna
$F_{T,1,Rd}$	resistência do “T-stub” à flexão – modo 1
$F_{T,2,Rd}$	resistência do “T-stub” à flexão – modo 2
$F_{T,3,Rd}$	resistência do “T-stub” à flexão – modo 3
$F_{i,Rd}$	resistência de cada linha de parafusos em tração
$F_{c,wc,Rd}$	resistência da alma da coluna em compressão

$F_{t,wc,Rd}$	resistência da alma da coluna à tração
$F_{c,fb,Rd}$	resistência da mesa da viga à compressão
$F_{t,wb,Rd}$	resistência da alma da viga à tração
$F_{t,Rd}$	resistência de um parafuso à tração
h_i	distância da linha de parafusos ao centro de compressão
h_r	distância entre a linha de parafusos i ao centro de compressão
k_1	rigidez da alma da coluna ao corte – componente 1
k_2	coeficiente de rigidez da alma da coluna em compressão – componente 2
k_3	coeficiente de rigidez da alma da coluna à tração – componente 3
k_4	coeficiente de rigidez da alma da coluna à flexão – componente 4
k_5	coeficiente de rigidez da placa de extremidade à flexão – componente 5
k_7	coeficiente de rigidez da mesa da viga à compressão– componente 7
k_8	coeficiente de rigidez da alma da viga à tração – componente 8
k_{10}	coeficiente de rigidez de um parafuso à tração
k_{eq}	rigidez equivalente
$k_{eff,r}$	rigidez efetiva das molas associadas em série
$k_{i,r}$	valor de rigidez de cada uma das componentes
k_{wc}	fator de correção
$l_{eff,1}$	largura efetiva do “T-stub” – modo 1
$l_{eff,cp}$	formas circulares

$I_{eff,nc}$	formas não-circulares
$I_{eff,2}$	largura efetiva do “T-stub” – modo 2
L_b	comprimento de aperto
$M_{j,Rd}$	momento resistente
$M_{pl,1,Rd}$	momento resistente do “T-stub” à flexão – modo 1
$M_{pl,2,Rd}$	momento resistente do “T-stub” à flexão – modo 2
$M_{c,Rd}$	momento resistente da seção transversal
n_b	número de linhas de parafusos tracionadas
n_c	número de componentes ativas em cada linha de parafusos
R	raio de concordância
$S_{j,ini}$	rigidez rotacional
s_p	comprimento obtido pela dispersão à 45° através da placa de extremidade
t_f	espessura da mesa
t_f	espessura da mesa do “T-stub”
t_p	espessura da placa de extremidade
t_w	espessura da alma da coluna
t_{wc}	espessura da alma da coluna
$V_{wp,Rd}$	resistência da alma da coluna ao corte
W_{pl}	módulo plástico da seção transversal
Z_{eq}	braço de alavanca equivalente
β	parâmetro de transformação

ϕ_{cd}	capacidade de rotação
γ_{M0}	coeficiente de resistência
γ_{M1}	coeficiente de resistência
γ_{M2}	coeficiente de resistência
λ_1 e λ_2	Coefficientes
$\bar{\lambda}_p$	esbeltez da placa de extremidade
η	coeficiente de modificação de rigidez
ρ	fator de redução devido à flambagem da placa
σ_{comEd}	máxima tensão longitudinal de compressão
ω	fator de redução

Lista de Abreviaturas

PUC - Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
EUROCODE	European Committee for Standardisation
DEC	Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio