



**Raquel Alves Cabral Silva**

**Análise Teórica-Experimental de Ligação  
Viga-Pilar Semirrígida Mista com Conectores  
Tipo “Perfobond” nas Vigas**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Sebastião Arthur Lopes de Andrade

Rio de Janeiro  
Julho de 2015



**Raquel Alves Cabral Silva**

**Análise Teórica-Experimental de Ligação  
Viga-Pilar Semirrígida Mista com Conectores  
Tipo “Perfobond” nas Vigas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre 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. Sebastião Arthur Lopes de Andrade**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Raul Rosas e Silva**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Luciano R. Ornelas de Lima**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

**Prof. Pedro Colmar G. da Silva Vellasco**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de julho de 2015.

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

### **Raquel Alves Cabral Silva**

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Sergipe – UFS. Na PUC-Rio desenvolveu pesquisas na área de estruturas, atuando na linha de ligações semirrígidas.

Ficha Catalográfica

Silva, Raquel Alves Cabral

Análise teórica-experimental de ligação viga-pilar semirrígida mista com conectores tipo “perfobond” nas vigas / Raquel Alves Cabral Silva; orientador: Sebastião Arthur Lopes de Andrade. – 2015.

165 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Ligações mistas 3. Ligações semirrígidas. 4. Ligações viga-pilar. 5. Análise experimental. 6. Ligações com cantoneiras. I. Andrade, Sebastião Arthur Lopes de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

## **Agradecimentos**

A Deus, primeiramente, pela força nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Sebastião Andrade, por toda a ajuda, confiança e amizade na realização deste trabalho. Por me passar tantos conhecimentos novos durante este tempo, possibilitando um grande amadurecimento profissional.

Aos meus pais por serem tão presentes, por sempre me apoiarem e pela compreensão nos momentos de ausência.

As minhas irmãs, Juliane e Luiza, por serem companheiras mesmo de longe.

A Matheus, pelo carinho, por me apoiar e compreender o tempo em que estive distante.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas da PUC-Rio, Euclides, Rogério, Alex, José Nilson, Carlos, por toda a ajuda prestada e pelo bom convívio no período de realização dos ensaios.

A César por ser um companheiro na realização deste trabalho, auxiliando nas tarefas de laboratório e nos momentos difíceis do curso.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio e da UFS que de alguma forma contribuíram com vários conhecimentos para a minha formação.

Aos colegas de curso pelos grupos de estudo, pela boa convivência e pela amizade durante os dois anos de curso.

A CAPES pelo auxílio financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

A Metalfenas por fornecer os perfis metálicos para realização dos ensaios.

A PERIPLÁSTICOS por fornecerem os espaçadores utilizados nos ensaios

## Resumo

Silva, Raquel Alves Cabral; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de (Orientador). **Análise teórica-experimental de uma ligação viga-pilar mista semirrígida com conectores tipo "Perfobond" nas vigas.** Rio de Janeiro, 2015. 165p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nos projetos de engenharia é comum desconsiderar-se o comportamento semirrígido das ligações, ou seja, as ligações são assumidas com as condições ideais de rigidez. A primeira condição ideal é aquela na qual há transferência total de momento fletor, assumindo-se que não existe rotação relativa entre os elementos ligados, estas ligações são as chamadas rígidas. Na segunda opção, a transferência de momento fletor é desconsiderada e a ligação é definida como rotulada ou simples. Entretanto, sabe-se que a maioria das ligações comporta-se como semirrígida e o problema é que ao se fazer essas simplificações em projeto, dois aspectos podem ser comprometidos: segurança estrutural e custo do projeto. Neste trabalho, uma ligação semirrígida mista é proposta e estudada com o objetivo de obter-se as suas características principais e necessárias para utilizá-la em projeto: curva momento-rotação, rigidez de serviço e momento fletor resistente. Com a ligação mista proposta, busca-se uma nova maneira de transferência de forças na região de momento negativo em uma viga semicontínua. Adotou-se para a transferência dos esforços, entre a laje de concreto e a viga de aço, conectores de cisalhamento do tipo “*Perfobond Rib*”. Este conector foi inicialmente utilizado em pontes e depois alguns estudos o viabilizaram para o uso em edificações. Para atingir os objetivos do trabalho, foram realizados dois ensaios em escala real das ligações propostas. Os testes experimentais foram feitos em modelos cruciformes invertidos e realizados no laboratório de estruturas e materiais da PUC-Rio. Os resultados experimentais foram comparados com dois modelos analíticos: o método proposto por Leon et al. em 1996 e o método presente no Anexo R da NBR 8800:2008.

## Palavras-chave

Ligações mistas; ligações semirrígidas; ligações viga-pilar; análise experimental; ligações com cantoneiras.

## Abstract

Silva, Raquel Alves Cabral; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de (Advisor). **Theoretical and experimental analysis of a composite semi-rigid beam-to-column joint using Perfobond shear connectors.** Rio de Janeiro, 2015. 165p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In engineering design it is common to disregard the semi-rigid behavior of connections, i.e., connections are assumed to have the ideal conditions of rigidity. The first ideal condition is the one in which there is full transfer of bending moment, assuming that there is no relative rotation between the connected elements, this connection is defined rigid. In the second option, the transfer of bending moment is disregarded and the connection is defined simple. However, it is known that most connections have a semi-rigid behavior and the problem is that when making these simplifications in design, two aspects can be compromised: structural safety and project cost. In this work, a composite semi-rigid connection is studied in order to obtain its main and necessary features to use it in design: moment-rotation curve, service rigidity and bending moment capacity. With the proposed composite connection, a new way to transfer forces in the negative moment region on a semicontinuous beam. Shear connectors like the "*Perfobond Rib*" were adopted for the transfer of efforts between the concrete slab and the steel beam. This connector was first used on bridges and since then some studies have made possible its use in buildings, showing its advantages over the more usual connectors. To achieve this work's objectives, two real scale tests of the proposed connections were conducted. Experimental tests were done in inverted cruciform models and carried out in the laboratory of structures and materials at PUC-Rio. Information on these tests was obtained, such as displacements, strains, and cracking of the slab. The experimental results were compared to two analytical models: the method proposed by Leon et al. in 1996 and the present method in Annex R of NBR 8800: 2008.

## Keywords

Composite connections; semi-rigid connections; beam to column connections; experimental analysis; web and seat angle connections.

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	<b>24</b>
1.1. Considerações iniciais	24
1.2. Objetivos	25
1.3. Revisão Bibliográfica	26
1.4. Estrutura do documento	31
<b>2 Ligações mistas viga-pilar</b>	<b>33</b>
2.1. Considerações gerais	33
2.2. Classificação das construções segundo o AISC ( <i>American Institute of Steel Construction</i> )	35
2.3. Classificação das Ligações	36
2.3.1. Classificação das ligações segundo o AISC	36
2.3.2. Classificação das ligações segundo o Eurocode	39
2.3.3. Classificação das ligações segundo a NBR 8800:2008	41
2.4. Ligações semirrígidas mistas	41
2.4.1. Ligações semirrígidas mistas do Tipo I	43
2.4.2. Largura efetiva da laje para regiões de momento negativo (NBR 8800:2008)	44
2.4.3. Conectores de cisalhamento	45
2.4.3.1. Conectores de cisalhamento do tipo “ <i>Perfobond rib</i> ”	45
2.5. Curva momento-rotação das ligações	46
2.6. Método de análise proposto pelo AISC: “ <i>Steel Design Guide Series: 8</i> ”	49
2.6.1. Considerações iniciais	49
2.6.2. Comportamento das ligações	49
2.6.3. Condições para escolha inicial da ligação	51
2.6.4. Análise	52
2.6.4.1. Análise “ <i>Beam Line</i> ”	52
2.6.4.2. Momento resistente para cargas gravitacionais	53

2.6.5. Considerações de projeto	54
2.6.5.1. Deslocamentos de vigas com PR-CC	54
2.6.5.2. Rigidez da viga	55
2.6.6. Detalhamento da armadura	56
2.7. Método de análise proposto pela ABNT NBR 8800: 2008	56
2.7.1. Ligações mistas	56
2.7.2. Momento fletor resistente de cálculo em regiões de momento negativo para vigas mistas	59
2.7.3. Capacidade de rotação necessária	60
2.8. Método de análise proposto pelo Eurocode	62
<b>3 Procedimento para projeto de ligações do tipo PR-CC</b>	<b>63</b>
3.1. Considerações Iniciais	63
3.2. Dados de projeto	66
3.2.1. Escolha inicial do perfil de aço da viga	66
3.2.2. Características da laje	67
3.2.3. Cargas previstas	68
3.2.4. Solicitações de projeto	69
3.2.4.1. Momento fletor antes da cura ( $M_a$ )	69
3.2.4.2. Momento fletor depois da cura ( $M_d$ )	69
3.3. Verificações de resistência e rigidez	69
3.3.1. Escolha inicial do perfil	69
3.3.2. Deslocamento inicial	70
3.3.3. Momento resistente da viga mista	70
3.3.3.1. Necessidade de PR-CC quanto à resistência	72
3.3.4. Condições de serviço (rigidez)	73
3.3.4.1. Momento de inércia para o mínimo de interação ( $I_{LB,PNA7}$ )	73
3.3.4.2. Momento de inércia para viga biapoiada ( $I_{LB,ss}$ )	74
3.3.4.3. Momento de inércia para a viga parcialmente restringida ( $I_{LB,PR}$ )	74
3.3.4.4. Necessidade de PR-CC quanto à rigidez	75
3.4. Projeto de PR-CC para cargas gravitacionais	75
3.4.1. Resistência última	75
3.4.2. Rigidez	76

3.4.3. Verificação	78
3.5. Determinação da ligação metálica, parafusos e armadura transversal	78
3.5.1. Cantoneira de assento	78
3.5.1.1. Parafusos	79
3.5.2. Dupla cantoneira de alma	79
3.5.3. Armadura transversal	80
3.5.3.1. Distribuição das barras de aço	80
<b>4 Descrição do Programa Experimental</b>	<b>82</b>
4.1. Considerações Gerais	82
4.2. Parâmetros de Projeto	82
4.3. Características Geométricas dos Modelos	84
4.4. Fabricação das peças	89
4.5. Controle Dimensional das Peças	91
4.5.1. Especificação das Dimensões das Peças	91
4.5.2. Levantamento da geometria dos elementos utilizados no Ensaio	192
4.5.3. Levantamento da geometria dos elementos utilizados no Ensaio	293
4.6. Propriedades dos materiais	94
4.6.1. Concreto	94
4.6.2. Aço	96
4.7. Montagem dos ensaios	96
4.8. Instrumentação	101
4.8.1. Primeiro ensaio	101
4.8.1.1. Deformações	101
4.8.1.2. Deslocamentos	104
4.8.2. Segundo ensaio	104
4.9. Procedimento de Ensaio	105
4.9.1. Primeiro ensaio	105
4.9.2. Segundo ensaio	107
<b>5 Resultados experimentais</b>	<b>110</b>
5.1. Introdução	110
5.2. Resultados obtidos no primeiro ensaio	110

5.2.1. Deslocamentos	111
5.2.2. Tensões	113
5.2.2.1. Armadura	113
5.2.2.2. Vigas e cantoneiras	115
5.2.3. Fissuras na laje	118
5.2.4. Momento-rotação	119
5.3. Resultados obtidos no segundo ensaio	123
5.3.1. Deslocamentos	123
5.3.2. Tensões	125
5.3.2.1. Armadura	125
5.3.2.2. Vigas e cantoneiras	127
5.3.3. Tensões	129
5.3.4. Fissuras na laje	129
5.3.5. Momento-rotação	131
<b>6 Previsões teóricas</b>	<b>133</b>
6.1. Cálculo segundo procedimento de Leon et al. (1996)	133
6.1.1. Momento resistente da ligação	133
6.1.2. Rigidez de serviço	134
6.1.3. Curva momento-rotação	134
6.2. Cálculo segundo o Anexo R da NBR 8800:2008	136
6.2.1. Barras de armadura tracionadas	136
6.2.1.1. Rigidez inicial	136
6.2.1.2. Força resistente de cálculo	136
6.2.1.3. Capacidade de deformação	136
6.2.2. Conectores de cisalhamento	137
6.2.2.1. Rigidez inicial	137
6.2.2.2. Força resistente de cálculo	138
6.2.2.3. Capacidade de deformação	139
6.2.3. Ligação da mesa inferior da viga apoiada	139
6.2.3.1. Rigidez inicial	139
6.2.3.2. Força resistente de cálculo	140
6.2.3.3. Capacidade de deformação	141

6.2.4. Ligação de alma da viga apoiada	141
6.2.5. Rigidez inicial da ligação	142
6.2.6. Momento resistente da ligação	142
6.2.7. Capacidade de rotação	143
6.2.8. Curva momento-rotação (bilinear)	143
6.2.9. Resistência da viga mista a momento fletor negativo	144
6.3. Modelo no Ftool	144
<b>7 Análise dos resultados</b>	<b>146</b>
7.1. Considerações iniciais	146
7.2. Discussão dos resultados	146
<b>8 Considerações finais</b>	<b>156</b>
8.1. Conclusões	157
8.2. Sugestões para trabalhos futuros	159
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>161</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Gráfico comparativo entre uma ligação mista e uma somente metálica, Leon e Ammerman (1987) .....	27
Figura 2.1 - gráficos de momento fletor para ligações flexíveis, rígidas e semirrígidas.....	35
Figura 2.2 - Modelos cruciformes para análise experimental de ligações intermediárias.....	35
Figura 2.3 – Limites de classificação representados na curva momento-rotação, adaptada de Leon (1999) .....	37
Figura 2.4 - Definição da capacidade de rotação, $\theta_u$ , da ligação segundo a revisão do AISC/LRFD (2005).....	38
Figura 2.5 - Classificação do Eurocode segundo à rigidez .....	40
Figura 2.6 - Ligações semirrígidas dos tipos I, II, III e IV.....	42
Figura 2.7 - Ligação semirrígida mista proposta .....	43
Figura 2.8 – Distância simplificada entre os pontos de momento nulo em uma viga contínua e semicontínua, NBR 8800: 2008 .....	45
Figura 2.9 – Representação do conector tipo “ <i>Perfobond Rib</i> ” .....	46
Figura 2.10 - Tipos de curvas momento-rotação, CHEN et. al 2011 .....	47
Figura 2.11 - Definição das rigidezes de uma ligação, adaptada de Leon et al. (1996) .....	48
Figura 2.12 - Fases da curva M- $\theta$ de uma ligação mista, adaptada de Nethercot (1995) .....	48
Figura 2.13 - Ligação proposta por Leon et al, 1996.....	50
Figura 2.14 - Forças resistentes na ligação.....	51
Figura 2.15 - Classificação quanto à rigidez, AISC 2010 .....	51
Figura 2.16 - “ <i>Beam Line</i> ”, adaptada de Leon et al., 1996.....	53
Figura 2.17 - Componentes que contribuem para a rigidez sob momento negativo.....	55
Figura 2.18 - Recomendações para o detalhamento da armadura, segundo Leon et al. (1996) .....	56
Figura 2.19 - Ligação mista proposta pela NBR 8800:2008.....	57

Figura 2.20 - Posição da LNP para que a contribuição da ligação de alma seja desconsiderada, NBR 8800:2008 .....	59
Figura 2.21 - Distribuição de tensões para momento fletor negativo (NBR 8800:2008) .....	59
Figura 3.1 - Planta baixa de estudo.....	64
Figura 3.2 - Viga mista escolhida para o projeto .....	64
Figura 3.3 - Detalhes da <i>Steel Deck</i> .....	64
Figura 3.4 - Passo a passo de projeto utilizando-se o procedimento descrito no <i>Guide 8</i> do AISC.....	65
Figura 3.5 - Carga "ideal" para uma viga de comprimento igual a 10 metros .....	67
Figura 3.6 - Detalhes da laje tipo <i>Steel Deck</i> .....	68
Figura 3.7 - Representação das dimensões na viga mista.....	70
Figura 3.8 - Representação da seção resistente da viga mista em regiões de momento negativo .....	77
Figura 3.9 - Detalhe das dimensões da cantoneira de assento.....	79
Figura 3.10 - Detalhe das dimensões da cantoneira de alma .....	80
Figura 3.11 - Detalhamento da armadura .....	81
Figura 4.1 - Planta baixa do pavimento estrutural.....	83
Figura 4.2 - Vista lateral da ligação .....	83
Figura 4.3 – Configuração de teste .....	84
Figura 4.4- Detalhes do parafuso utilizado .....	85
Figura 4.5 - Detalhes da vista lateral da ligação.....	85
Figura 4.6 – CORTE A-A - Detalhes da vista frontal da ligação.....	86
Figura 4.7 - Detalhes do " <i>perfobond</i> " utilizado .....	86
Figura 4.8 - Nomenclatura utilizada para os " <i>perfobonds</i> " .....	87
Figura 4.9 - Detalhes da armação principal.....	87
Figura 4.10 - Projeto da armação principal e secundária .....	88
Figura 4.11 - Projeto de fabricação das cantoneiras de assento.....	89
Figura 4.12- Projeto de fabricação das cantoneiras de alma .....	89
Figura 4.13 - Projeto de fabricação das vigas .....	90
Figura 4.14 - Projeto de fabricação dos pilares .....	91
Figura 4.15 - Padronização das dimensões dos elementos da ligação: viga, cantoneira de assento e cantoneira de alma, respectivamente	92

Figura 4.16 – Detalhe da máquina utilizada para o ensaio de compressão.....	96
Figura 4.17 – Detalhe da ligação metálica .....	98
Figura 4.18 – Detalhe da fôrma de fechamento das lajes .....	98
Figura 4.19 - Solda dos “ <i>perfobonds</i> ” .....	98
Figura 4.20 – Detalhe da armadura principal .....	99
Figura 4.21 – Detalhe da armação completa .....	99
Figura 4.22 - Detalhe da armadura no “ <i>Perfobond</i> ” .....	99
Figura 4.23 – Concretagem.....	100
Figura 4.24 - Transporte e inversão do modelo experimental, respectivamente .....	100
Figura 4.25 - Instrumentação: “ <i>strain gauges</i> ” nos vergalhões .....	101
Figura 4.26 - Instrumentação: posição dos “ <i>strain gauges</i> ” nos vergalhões.....	102
Figura 4.27 - Instrumentação: representação das rosetas e extensômetros nas cantoneiras de alma, Ensaio 1 .....	102
Figura 4.28 – Instrumentação: detalhe da sequência para colagem das rosetas na cantoneira de alma .....	103
Figura 4.29 - Instrumentação pronta das cantoneiras de alma .....	103
Figura 4.30 – Instrumentação: representação dos extensômetros nas cantoneiras de assento .....	103
Figura 4.31 - Instrumentação pronta das cantoneiras de assento.....	103
Figura 4.32 – Instrumentação: representação dos extensômetros nas vigas.....	104
Figura 4.33 - Instrumentação: representação do posicionamento dos transdutores de deslocamento .....	104
Figura 4.34 - Instrumentação: representação das rosetas e extensômetros nas cantoneiras de alma, Ensaio 2.....	105
Figura 4.35 - Representação 3D do sistema de aplicação de carga utilizado .....	106
Figura 4.36 - Esquema de ensaio utilizado para o protótipo 1 .....	107
Figura 4.37 - Esquema do ensaio utilizado para o último carregamento do Ensaio 1 e todos os estágios do Ensaio 2.....	108

Figura 4.38 - Detalhe do sistema de aplicação de carga e da aquisição de dados, Ensaio 2 .....	108
Figura 4.39 - Detalhe do atuador fixado na laje de reação, Ensaio 2.....	109
Figura 5.1 - Gráfico “carga aplicada <i>versus</i> deslocamento”, para o último estágio de carregamento, dos transdutores pertencentes ao Ensaio 1 .....	111
Figura 5.2 - Gráfico “carga aplicada <i>versus</i> deslocamento” do transdutor 4, referente ao Ensaio 1 .....	112
Figura 5.3 - Deslocamento do modelo experimental para algumas cargas do Ensaio 1 .....	113
Figura 5.4 - Gráfico “carga aplicada x tensão” das barras de aço do Ensaio 1 .....	114
Figura 5.5 - Gráficos “carga aplicada x tensão” para as barras de aço..	115
Figura 5.6 - Gráfico “carga aplicada <i>versus</i> tensão” das vigas do Ensaio 1 .....	115
Figura 5.7 - Gráfico “carga aplicada <i>versus</i> tensão” das cantoneiras de assento do Ensaio 1 .....	116
Figura 5.8 - Gráfico “carga aplicada <i>versus</i> tensão” das cantoneiras de alma do Ensaio 1 – extensômetros horizontais.....	116
Figura 5.9 - Distribuição de tensões para a carga última nas vigas 1 e 2 do Ensaio 1 .....	117
Figura 5.10 - Gráfico “altura da Viga 2 <i>versus</i> tensão” para alguns estágios de carregamento do Ensaio 1 .....	117
Figura 5.11 - Representação das fissuras na laje do Ensaio 1 .....	118
Figura 5.12 – Detalhe da primeira fissura observada (40 kN) e da fissura na linha do pilar (60kN) .....	118
Figura 5.13 - Na foto superior o aparecimento da fissura na linha do Pe01; na foto inferior a mesma região ao término do Ensaio 1.....	119
Figura 5.14 - Detalhe das fissuras que limitaram o Ensaio 1 .....	119
Figura 5.15 - Representação da deformada da viga .....	120
Figura 5.16 - Representação do cálculo do momento na ligação.....	120
Figura 5.17 - Curvas M- $\theta$ para os lados direito e esquerdo da ligação – Ensaio 1 .....	121

Figura 5.18 - Curvas M- $\theta$ para alguns estágios de carregamento do Ensaio 1, lado direito.....	122
Figura 5.19 – Detalhe do modelo ao final do Ensaio 1 .....	122
Figura 5.20 - Detalhe da rotação da ligação ao final do Ensaio 1 .....	123
Figura 5.21 - Gráfico “carga aplicada <i>versus</i> deslocamento” dos transdutores pertencentes ao Ensaio 2.....	124
Figura 5.22 - Deslocamento do modelo experimental para alguns estágios de carga do Ensaio 2 .....	125
Figura 5.23 - Gráfico “carga aplicada x tensão” das barras de aço do Ensaio 2 .....	126
Figura 5.24 - Gráficos “carga aplicada x tensão” para as barras de aço - Ensaio 2 .....	127
Figura 5.25 - Gráfico “carga aplicada x tensão” das vigas do Ensaio 2 .	127
Figura 5.26 – Gráfico “carga aplicada <i>versus</i> tensão” das cantoneiras de assento do Ensaio 2.....	128
Figura 5.27 - Gráfico “carga aplicada <i>versus</i> tensão” das cantoneiras de alma do Ensaio 2 – extensômetros horizontais.....	128
Figura 5.28 - Distribuição de tensões para a carga última nas vigas 1 e 2 do Ensaio 2 .....	129
Figura 5.29 - Representação das fissuras na laje do Ensaio 2 .....	130
Figura 5.30 - Detalhe da fissura que determinou o final do Ensaio 2 .....	130
Figura 5.31 - Detalhe das fissuras nas proximidades do pilar do Ensaio 2 .....	130
Figura 5.32 - Curva momento-rotação correspondente ao Ensaio 2.....	131
Figura 5.33 – Detalhe da cantoneira de alma durante o Ensaio 2.....	132
Figura 5.34 - Cantoneira de assento após o término do Ensaio 2.....	132
Figura 5.35 - Detalhe da rotação da ligação (Ensaio 2) .....	132
Figura 6.1 - Curva momento-rotação teórica, pelo método proposto por Leon et al., 1996 .....	135
Figura 6.2 - Representação das forças resistentes e do momento máximo da ligação .....	142
Figura 6.3 - Curva momento-rotação teórica, pela NBR 8800:2008.....	143
Figura 6.4 - Representação das forças resistentes na viga mista na região de momento negativo.....	144

Figura 6.5 - Representação do modelo simplificado com o uso da ferramenta Ftool.....	145
Figura 7.1 - Comparação entre as curvas momento-rotação experimentais e a teórica .....	146
Figura 7.2 - Aproximação da curva M- $\theta$ para o Ensaio 1 .....	147
Figura 7.3 - Aproximação da curva M- $\theta$ para o Ensaio 2 .....	147
Figura 7.4 - comparação entre as curvas M- $\theta$ aproximadas e as obtidas analiticamente .....	148
Figura 7.5 - Gráfico comparativo, entre os modelos experimentais e o modelo do Ftool, dos deslocamentos na viga .....	152
Figura 7.6 - Classificação da ligação segundo à rigidez e à resistência de acordo com o AISC .....	154
Figura 7.7 - Inspeção dos modelos experimentais: Pe01, Ensaio 1.....	155
Figura 7.8 - Inspeção do modelos experimentais: região próxima ao Pe03, Ensaio 2.....	155
Figura 7.9 - Alongamento do furo na alma da Viga 2 e do furo na mesa da Viga 2, respectivamente - Ensaio 2.....	155

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1- Estudos experimentais sobre conectores do tipo <i>Perfobond</i> realizados na PUC-Rio.....	29
Tabela 1.2 – Estudos experimentais sobre ligações semirrígidas na PUC-Rio .....	30
Tabela 2.1 - Classificação das ligações segundo o AISC (adaptada de CHEN et al. 2011) .....	39
Tabela 2.2 - Classificação das ligações segundo o EC3.....	40
Tabela 2.3- Capacidade de rotação necessária (mrad) – $\beta_{vm} = 0,95$ .....	61
Tabela 2.4 - Capacidade de rotação necessária (mrad) – $\beta_{vm} = 0,90$ .....	61
Tabela 2.5 - Capacidade de rotação necessária (mrad) – $\beta_{vm} = 0,85$ .....	61
Tabela 3.1 - Estudo paramétrico: carga "q" encontrada através de uma distribuição de momentos fixa.....	66
Tabela 3.2 - Características da Laje utilizada.....	68
Tabela 3.3 - Cálculo do momento resistente variando-se o grau de interação .....	73
Tabela 3.4 - Valores dos momentos de inércia calculados .....	78
Tabela 4.1 - Perfis e tipos de aço utilizados nos ensaios.....	84
Tabela 4.2 - Dimensões medidas das cantoneiras de assento do ensaio 1 - valores médios .....	92
Tabela 4.3 - Dimensões medidas das cantoneiras de alma do ensaio 1 - valores médios .....	92
Tabela 4.4 - Dimensões medidas do pilar do ensaio 1 - valores médios ..	93
Tabela 4.5 - Dimensões medidas das vigas do ensaio 1 – valores médios.....	93
Tabela 4.6 - Dimensões medidas das cantoneiras de assento do ensaio 2 - valores médios .....	93
Tabela 4.7 - Dimensões medidas das cantoneiras de alma do ensaio 2 - valores médios .....	93
Tabela 4.8 - Dimensões medidas do pilar do ensaio 2 - valores médios ..	93
Tabela 4.9 - Dimensões medidas das vigas do ensaio 2 - valores médios.....	94

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios à compressão dos corpos de prova de concreto .....	95
Tabela 4.11 - Propriedades mecânicas médias das barras de aço.....	96
Tabela 4.12 - Estágios de carregamento do Ensaio 1 e principais observações.....	106
Tabela 6.1 - Valores correspondentes à curva M- $\theta$ da ligação estudada .....	135
Tabela 6.2 - Cálculo do momento fletor resistente de cálculo em regiões de momento negativo para o caso de estudo .....	144
Tabela 7.1 - Resumo dos resultados teóricos e experimentais para a ligação estudada .....	148
Tabela 7.2 - Comparação dos momentos fletores máximos obtidos.....	149
Tabela 7.3 - comparação entre os momentos fletores resistentes para uma rotação igual a 20 mrad.....	149
Tabela 7.4 - Comparação da rigidez de serviço .....	150
Tabela 7.5 - Comparação da capacidade de rotação.....	151
Tabela 7.6 - Tabela comparativa entre os ensaios 1 e 2.....	153

## Lista de Símbolos

### Letras Romanas

$A_{ac}$	área comprimida da seção do perfil de aço
$A_{at}$	área tracionada da seção do perfil de aço
$A_l$	área da cantoneira de assento
$A_{nL}$	área líquida das cantoneiras de alma
$A_s$	área de aço presente na largura efetiva da laje
$A_{wl}$	área da dupla cantoneira de alma
$b_c$	largura do pilar na direção transversal à viga
$b_{ef}$	largura efetiva da laje de concreto
$Cr$	força de compressão no perfil de aço
$Cr'$	força de compressão na laje de concreto
$d_b$	diâmetro dos parafusos
$E$	módulo de elasticidade da viga de aço
$F_{b,Rd}$	resistência de cálculo de um parafuso
$f_{ctm}$	resistência média do concreto à tração
$f_{u1}$	resistência à ruptura do aço estrutural da cantoneira
$f_{u2}$	resistência à ruptura do aço estrutural da mesa inferior do perfil de aço
$fc'$	resistência característica do concreto à compressão
$f_y$	resistência nominal ao escoamento do aço
$F_y$	tensão de escoamento do aço das cantoneiras
$F_{yrb}$	tensão de escoamento do aço da armadura
$h_{sc}$	altura do conector Perfobond
$I_b$	momento de inércia da viga
$I_{eq}$	momento de inércia equivalente da viga
$I_{LB}$	momento de inércia em regiões de momento positivo
$I_{LB,PNA1}$	momento de inércia da viga mista para um grau de interação de 100%
$I_{LB,PNA7}$	momento de inércia da viga mista para um grau de interação de 25%
$I_{LB,ss}$	momento de inércia para vigas biapoiadas
$I_{LB,ss}$	momento de inércia para vigas com ligação PR

$I_n$	momento de inércia em regiões de momento negativo
$K_{\text{conn}}$	rigidez da ligação
$K_{\text{desc}}$	rigidez de descarregamento da ligação
$K_i$	rigidez inicial da ligação
$K_{\text{serv.}}$	rigidez de serviço da ligação
$K_{\text{tan}}$	rigidez tangente da ligação
$K_{\text{tan}}$	rigidez tangente da ligação
$k_{\text{cs}}$	rigidez inicial dos conectores de cisalhamento
$k_i$	rigidez inicial da ligação inferior
$k_s$	rigidez inicial das barras de aço
$L$	comprimento da viga
$L_b$	comprimento da viga
$M_a$	momento fletor solicitante antes da cura do concreto
$M_d$	momento fletor solicitante depois da cura do concreto
$M_F$	momento fletor máximo para extremidade fixa
$M_{n,\text{PNA1}}$	momento fletor resistente da viga mista para um grau de interação de 100%
$M_{n,\text{PNA7}}$	momento fletor resistente da viga mista para um grau de interação de 25%
$M_{\text{Rd-}}$	momento fletor resistente da viga em regiões de momento negativo
$M_n$	momento fletor resistente da viga mista
$M_{n,\text{comp}}$	momento fletor resistente da viga mista
$M_1$	momento fletor da ligação para uma rotação igual a 2,5mrad
$M_{p,\text{viga}}$	momento de plastificação da viga de aço
$M_{\text{ser}}$	momento fletor da ligação para uma rotação igual a 2,5mrad
$M_{\text{serv}}$	momento fletor na ligação para cargas de serviço
$q$	carga distribuída
$q_u$	resistência nominal ao cisalhamento do conector Perfobond
$s^{(B)}$	capacidade de deformação dos conectores de cisalhamento
$S_{j,\text{ini}}$	rigidez inicial da ligação
$t_{\text{sc}}$	espessura do conector Perfobond
$Y_{\text{ENA}}$	posição da linha neutra elástica
$Y_{\text{LNP}}$	posição da linha neutra plástica

Y2	distância entre o topo do perfil de aço e o centroide do concreto em compressão
Y3	distância do topo do perfil de aço ao centroide do vergalhão
Z <sub>x</sub>	módulo de resistência plástica do perfil de aço

### Letras Gregas

$\beta_{vm}$	coeficiente de redução do momento fletor resistente positivo da viga
$\bar{\delta}_{fp}$	deslocamento para vigas com uma extremidade fixa e a outra apoiada
$\bar{\delta}_{sr}$	deslocamento para vigas com ligações semirrígidas
$\Delta_{ui}$	capacidade de deformação da ligação inferior
$\Delta_{us}$	capacidade de deformação das barras de aço
$\varepsilon$	deformação
$\varepsilon_{smu}$	deformação da armadura envolvida pelo concreto
$\varepsilon_{su}$	deformação correspondente à resistência máxima à tração da armadura isolada
$\varepsilon_{sy}$	deformação correspondente à resistência de escoamento da armadura isolada
$\theta_{ser}$	rotação de serviço da ligação
$\theta_{serv}$	rotação da ligação para cargas de serviço
$\varphi$	grau de interação entre a laje e o perfil
$\phi$	coeficiente de minoração da resistência

## Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
ASD	<i>Allowable Stress Design</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
EC3	Eurocode 3
FR	<i>Fully Restrained</i>
FS	<i>Fully Strength</i>
LN	Linha Neutra
LNP	Linha Neutra Plástica
LRFD	<i>Load and Resistance Factor Design</i>
NBR	Norma Brasileira
P.I.	Ponto de inflexão
PNA	<i>Plastic Neutral Axis</i>
PR	<i>Partially Restrained</i>
PRCC	<i>Partially Restrained Composite Connections</i>
PS	<i>Partially Strength</i>
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro