



Juliana da Cruz Vianna

Avaliação do comportamento estrutural de conectores Perfobond e T-Perfobond para vigas mistas

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.

Orientadores: Sebastião A. L. de Andrade
Pedro C. G. da S. Vellasco
Luis F. da C. Neves

Rio de Janeiro
Agosto de 2009



Juliana da Cruz Vianna

**Avaliação do comportamento estrutural de
conectores Perfobond e T-Perfobond em vigas
mistas**

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. Sebastião Arthur Lopes de Andrade

Presidente / Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Co-Orientador

Departamento de Estruturas e Fundações - UERJ

Prof. Luis Filipe da Costa Neves

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil - FCTUC - Portugal

Profa. Marta de Souza Lima Velasco

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Departamento de Estruturas e Fundações - UERJ

Profa. Arlene Maria Sarmanho Freitas

Departamento de Engenharia Civil - UFOP

Prof. José Guilherme Santos da Silva

Departamento de Estruturas e Fundações - UERJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de agosto de 2009

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

Juliana da Cruz Vianna

Graduou-se em Engenharia Civil pela Unifoa-Centro Universitário de Volta Redonda em 2001. Obteve o título de Mestre em Ciência pela Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2005. Possui vários trabalhos publicados em atas de conferência e revistas internacionais na área de construção mista de aço e concreto.

Ficha catalográfica

Vianna, Juliana da Cruz

Avaliação do comportamento estrutural de conectores Perfobond e T-Perfobond para vigas mistas. / Juliana da Cruz Vianna ; orientadores: Sebastião A. L. de Andrade, Pedro C. G. da S. Vellasco, Luis F. da C. Neves. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2009.

300 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Viga mista. 3. Conector de cisalhamento. 4. Perfobond. 5. Sistemas construtivos mistos. 6. Construção mista. I. Andrade, Sebastião A. L. de. II. Vellasco, Pedro C. G. da S. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

A Deus pela vida. Aos meus queridos pais, Ivan e Mariinha, pelo suporte, carinho e incentivo durante toda a minha vida. A toda minha família pelo apoio e incentivo, e em especial aos meus irmãos, Rodrigo e Janaina, pelo carinho e amizade.

Aos professores e orientadores Sebastião Arthur Lopes de Andrade e Pedro Colmar G. da S. Vellasco, pelos relevantes conhecimentos transmitidos e orientação durante o trabalho.

Ao orientador português Luis F. da C. Neves, por ter possibilitado a realização da maior parte da campanha experimental da tese no Laboratório de Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Pela orientação, apoio, acolhimento em Portugal, pela paciência, amizade e carinho.

A Teresa Cordeiro, que juntamente com Luis F.C.N., me acolheram como uma filha em Portugal. Agradeço a amizade, o carinho, o apoio, a companhia e a dedicação. Obrigada por tudo. Agradeço também aos seus pais pelo acolhimento em Portugal.

Ao Patrício, pelo amor, carinho, compreensão, companhia e apoio durante toda a fase deste trabalho. “A nossa história está apenas começando”, (Pires, 2009).

A minha querida amiga Patrícia C. da Cunha, uma das grandes incentivadoras. Seu incentivo foi fundamental para realização deste trabalho.

Ao prof. Luciano Lima, pelo incentivo e apoio na realização do programa Sandwich em Coimbra, e pela amizade e companhia.

Aos meus grandes e queridos amigos, Ângela Ávila, Gustavo Christani, ao meu primo Fabrício, que sempre me apoiaram e incentivaram.

As amigas nascidas e fortalecidas na PUC-Rio, Gisele e Júlio, Diego, Alexandre e Alberto, pela companhia e pelo incentivo.

Em especial aos amigos Fernando Ramires, Ricardo Araújo, Magnos Freitas e Larissa que auxiliaram e motivaram o desenvolvimento deste trabalho. E aos amigos Arthur, João, Suellen, André, Lucas entre outros, que trabalharam no LEM-DEC e que de alguma forma colaboraram no meu trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, Euclides, Evandro, José Nilson e Haroldo, pela colaboração na montagem e execução dos ensaios.

Aos funcionários do Laboratório de Mecânica Estrutural da Universidade de Coimbra, João, Miguel, Zé, pela ajuda na execução dos ensaios. Em especial ao Luís Gaspar, pela sua dedicação para realizar os ensaios, pela amizade e pelo ótimo convívio.

Aos colegas portugueses da Universidade de Coimbra, Rui Simões, Sandra Jordão, Aldina Santiago, Eduardo Júlio, Luis Simões, Afonso Mesquita, e ao amigo João Veludo, por toda motivação no desenvolvimento deste trabalho. A todos os demais funcionários da Universidade de Coimbra e da PUC-Rio pela colaboração.

As amigas especiais nascidas em Coimbra, Thais, Aura e Raquel, pela amizade, apoio, companhia e carinho.

A empresa brasileira Metalfenas e a portuguesa J. Rascão, pelos serviços de fabricação dos perfis metálicos.

A empresa portuguesa Pascoal & Pascoal Ltda. pelo apoio e suporte financeiro para a realização deste projeto de pesquisa em Coimbra.

A colaboração do Engenheiro Tiago Pires Ferreira, da empresa SCA, Serralharia Central de Alvarelhos, Lda (Portugal) e do Engenheiro Ricardo Davi, da empresa Projetec (Brasil), na avaliação dos custos que permitiram suportar o estudo econômico apresentado neste trabalho.

Ao CNPq pela bolsa no Brasil, à Capes-Grices pela bolsa em Portugal.

Resumo

Vianna, Juliana da Cruz; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de (orientador); Vellasco, Pedro Colmar G. da Silva (co-orientador), Neves, Luís Filipe da Costa (co-orientador, Universidade de Coimbra, Portugal). **Avaliação do comportamento estrutural de conectores Perfobond e T-Perfobond para vigas mistas**. Rio de Janeiro, 2009. 307p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As vigas mistas são um exemplo das cada vez mais difundidas estruturas mistas, e resultam da associação de uma viga de aço com uma laje de concreto ou mista, ligadas por meio dos conectores de cisalhamento. Dentre os diversos tipos existentes pode-se citar os pernos com cabeça (stud bolts), perfis C e o Perfobond. Um conector alternativo foi proposto para estruturas mistas, o T-Perfobond, que deriva do conector Perfobond acrescentando a componente da mesa, que trabalha como um bloco. Combina portanto a alta resistência do conector tipo bloco com a ductilidade e resistência ao levantamento dos furos do Perfobond. Para determinação da sua capacidade resistente foi realizado um programa experimental envolvendo cinquenta e dois ensaios do tipo *push-out* com conectores Perfobond, T-Perfobond e T, um ensaio em escala real e uma modelagem numérica. Os ensaios *push-out* estabeleceram a carga máxima e a capacidade de deformação dos conectores. Procurou-se com o ensaio em escala real determinar a resistência última da estrutura, o modo de ruína, as deflexões e as deformações, e validar o comportamento do conector T-Perfobond em uma estrutura real. Os resultados indicaram que o modelo de plastificação total pode ser adotado para a determinação do momento fletor resistente em vigas mistas bi-apoiadas com conectores T-Perfobond. Os modelos numéricos auxiliaram no estudo da capacidade de deformação da mesa do conector T-Perfobond, e na investigação das vigas com interação total ou parcial ao cisalhamento. Sob o ponto de vista econômico, um estudo comparativo dos custos dos conectores Perfobond, T-Perfobond e Studs foi conduzido e concluiu-se que os conectores Perfobond e T-Perfobond são mais econômicos em até 33% que os conectores Studs. Dentre as vantagens estruturais e construtivas de utilizar os tipos de conectores alternativos destacam-se: a alta resistência, a fácil produção e instalação no perfil de aço através de solda corrente, e bom comportamento à fadiga.

Palavras-chave

Viga mista; Conector de cisalhamento; Perfobond; Sistemas construtivos mistos; Construção mista; Análise experimental de estruturas.

Abstract

Vianna, Juliana da Cruz; Andrade, Sebastião Arthur Lopes de; Vellasco, Pedro Colmar G. da Silva, Neves, Luís Filipe da Costa (advisors). **Assessment of Perfobond connector behaviour for composite beams**. Rio de Janeiro, 2005. 307p. DSc. Thesis – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Steel and composite beams have been extensively used in buildings and bridges. The component that assures the shear transfer between the steel profile and the concrete deck, enabling the composite action to develop, is the shear connector. Among the different types of connectors the headed studs, C sections and the Perfobond may be referred. An alternative connector has been proposed for composite structures, the T-Perfobond. The main difference between the studied Perfobond and T-Perfobond connectors is the presence of a flange, providing a further anchorage to the system. This connector combines the high strength of the block connector with ductility and resistance to uplift of the Perfobond holes. To evaluate their shear capacity an experimental programme that consisted of fifty-two push-out test and one full-size test, and some numerical analysis were performed. The push-out tests have established the maximum load capacity and deformation of the connectors. The full-size test has determined the composite beam load carrying capacity, typical failure modes, associated stresses and displacements, and has validated the behaviour of the T- Perfobond connector in an actual structure. The results indicated that the plastic distribution can be adopted for T- Perfobond connectors. The numerical analysis helped in the assessment of the deformation capacity of the T-Perfobond flange connector, and the investigation of the composite beam with total or partial connection. From the economic point of view, a comparative study of the cost of Perfobond, T-Perfobond and Studs connectors was conducted and it was concluded that the Perfobond and T-Perfobond connectors lead to an economy of up to 33% when comparing to the Studs connectors. Among the structural and constructive advantages of the use of alternative types of connectors, an high resistance, easy manufacturing and installation of steel beam by current welding and good performance to fatigue may be referred.

Keywords

Composite beams; shear connector; Perfobond; composite construction; experimental structural analysis.

Sumário

1 Introdução	28
1.1. Vigas mistas	29
1.1.1. Características das vigas mistas	29
1.1.2. Comportamento da viga mista em relação ao cisalhamento na interface	30
1.2. Motivação	35
1.3. Objetivos	36
1.4. Estrutura do documento	37
2 Revisão Bibliográfica	39
2.1. Conectores de Cisalhamento	39
2.1.1. Histórico	39
2.1.2. Classificação dos conectores	50
2.1.3. Ensaios de push-out segundo EUROCODE 4 (2005)	52
2.1.4. Ensaios de conectores em modelos experimentais não usuais	53
2.1.5. Equações para cálculo da resistência de conectores	55
2.2. Vigas Mistas	64
2.2.1. Histórico	64
2.2.2. Largura efetiva	68
2.2.3. Dimensionamento de vigas mistas biapoiadas	70
3 Concepção do conector e programa experimental dos ensaios tipo Push-out	71
3.1. Concepção do conector	71
3.2. Programa experimental dos ensaios tipo Push-out	72
3.3. Primeira etapa	74
3.3.1. Conectores de cisalhamento	74
3.3.1.1. Primeira série	77
3.3.1.2. Segunda série	78
3.3.1.3. Terceira série	79
3.3.1.4. Quarta série	80
3.3.2. Preparação do Ensaio tipo Push-out	81
3.3.2.1. Forma e Armadura	83
3.3.2.2. Concreto	84
3.3.2.3. Montagem do Ensaio	85

3.3.2.4. Instrumentação e aplicação do carregamento	86
3.3.3. Resultados	90
3.3.3.1. Primeira série	90
3.3.3.1.1. Concreto	90
3.3.3.1.2. Ensaios Push-out	91
3.3.3.1.3. Mecanismos de colapso	98
3.3.3.1.4. Conclusões	100
3.3.3.2. Segunda série	101
3.3.3.2.1. Concreto	101
3.3.3.2.2. Ensaios Push-out	102
3.3.3.2.3. Mecanismos de colapso	111
3.3.3.2.4. Conclusões	114
3.3.3.3. Terceira série	115
3.3.3.3.1. Concreto	115
3.3.3.3.2. Ensaios Push-out	115
3.3.3.3.3. Mecanismos de colapso	121
3.3.3.3.4. Conclusões	125
3.3.3.4. Quarta série	125
3.3.3.4.1. Concreto	125
3.3.3.4.2. Ensaios Push-out	126
3.3.3.4.3. Mecanismos de colapso	129
3.3.3.4.4. Conclusões	129
3.3.3.5. Comparação entre as séries iniciais	129
3.3.3.5.1. Influência do concreto	129
3.3.3.5.2. Influência do tipo de conector: Perfobond versus T-Perfobond	132
3.3.3.5.3. Influência das armaduras no conector T-Perfobond	135
3.3.4. Conclusões Gerais - Primeira Etapa	136
3.3.4.1. Influência da espessura da chapa do conector	137
3.3.4.2. Influência do número de furos e do espaçamento entre eles	138
3.3.4.3. Importância da altura do conector	138
3.3.4.4. Influência das armaduras	138
3.3.4.5. Influência da resistência à compressão do concreto	139
3.3.4.6. Ductilidade da ligação	140
3.3.4.7. Modo de ruptura	140
3.4. Segunda etapa	145
3.4.1. Conectores de cisalhamento	145
3.4.1.1. Quinta série	146

3.4.1.2. Sexta série	146
3.4.2. Preparação do Ensaio tipo Push-out	147
3.4.2.1. Forma e Armadura	148
3.4.2.2. Concreto	150
3.4.2.3. Montagem do Ensaio	151
3.4.2.4. Instrumentação e aplicação do carregamento	153
3.4.3. Resultados	158
3.4.3.1. Concreto	158
3.4.3.2. Quinta série	159
3.4.3.3. Sexta série	161
3.4.3.4. Comparação entre as séries da segunda etapa	166
3.4.3.5. Mecanismo de colapso	168
3.4.3.6. Conclusões	171
3.5. Comparação entre a primeira e a segunda etapa	172
3.6. Propriedades dos materiais	174
3.6.1. Concreto	174
3.7. Conclusões gerais	175
4 Programa experimental do ensaio em escala real	177
4.1. Introdução	177
4.1.1. Preparação do Ensaio em Escala Real	177
4.1.1.1. Apoios	179
4.1.1.2. Forma e Armadura	180
4.1.1.3. Concreto	183
4.1.1.4. Instrumentação e aplicação do carregamento	184
4.2. Resultados	191
4.2.1. Propriedades dos materiais	191
4.2.1.1. Concreto	191
4.2.2. Ensaio em escala real	191
4.2.2.1. Modo de colapso	191
4.2.2.2. Momento máximo e deslocamentos verticais	192
4.2.2.3. Deformações	195
4.2.2.4. Deslizamento relativo na interface	210
4.2.2.5. Avaliação teórica da resistência	211
4.3. Conclusões	215
5 Modelagem numérica	217

5.1. Conectores T-Perfobond	217
5.1.1. Elementos finitos utilizados	217
5.1.1.1. Elemento Shell 63	217
5.1.2. Malha, condições de contorno e aplicação da solicitação	218
5.1.3. Relações constitutivas utilizadas	219
5.1.4. Análise dos resultados	220
5.1.5. Conclusões	221
5.2. Ensaio em escala real	222
5.2.1. Elementos finitos utilizados	223
5.2.1.1. Elemento Solid 65	223
5.2.1.2. Elemento Shell 43	224
5.2.1.3. Combin 39	225
5.3. Modelagem Numérica	225
5.4. Validação da modelagem numérica	228
5.5. Conclusões	234
6 Discussão dos resultados	235
6.1. Introdução	235
6.2. Discussão dos resultados dos ensaios de push-out com Perfobond	235
6.2.1. Análise das equações de Oguejiofor & Hosain	239
6.2.2. Análise da equação de Medberry & Shahrooz	240
6.2.3. Análise da equação de Ushijima et al.	241
6.2.4. Análise da equação de Al-Darzi	242
6.2.5. Análise da equação de Veríssimo	243
6.2.6. Considerações iniciais	244
6.2.7. Modelo ajustado com análise de regressão múltipla	246
6.3. Discussão dos resultados dos ensaios de push-out com T-Perfobond	248
6.3.1. Modelo ajustado com análise de regressão múltipla	251
6.4. Comparação do ensaio em escala real com ensaio push-out	255
6.4.1. Força de cisalhamento por conector e deslizamento entre a seção de aço e concreto	255
6.4.2. Conclusões	259
6.5. Estudo econômico	259
6.5.1. Conclusões	264
6.6. Conclusões gerais	265

7 Considerações finais	267
7.1. Introdução	267
7.2. Principais conclusões	269
7.3. Principais contribuições do presente trabalho	271
7.4. Sugestões para trabalhos futuros	272
 Referências bibliográficas	 274
 Anexo A Dimensionamento da armadura transversal	 278
 Anexo B Dimensionamento da viga mista	 281
 Anexo C Verificação dos momentos e tensões	 291
 Anexo D Comparação push-out e ensaio escala real	 298

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Vigas mistas (a) Seção de aço em I. (b) Seção de aço em caixaão. (c) Sistema treliçado.	30
Figura 1.2 – (a) Pontes mistas. (b) e (c) Laje steel deck em sistema de piso	30
Figura 1.3 – Comparação de vigas fletidas sem ação mista e com ação mista, Queiroz et.al (2001)	31
Figura 1.4 – Transferência de forças de cisalhamento longitudinal por meio de conectores studs, David (2007).	32
Figura 1.5 – Tipos de fissuração na laje, Kotinda (2006)	33
Figura 1.6 – Superfície típica de falha ao cisalhamento, Cosenza & Zandonini (1999)	35
Figura 1.7 – Conector proposto: T-Perfobond.	36
Figura 2.1 – Desenvolvimento histórico dos conectores de cisalhamento. (a) Sistemas de abas. (b) Conectores espirais. (c) Perfil U. (d) Studs. Cosenza & Zandonini (1999)	40
Figura 2.2 – Visão geral da discretização para os modelos com conector perfil “U” formado a frio, Tristão (2005)	41
Figura 2.3 – Conector T, Cruz (2006)	41
Figura 2.4 - Exemplos de conectores disponíveis, Vianna et al. (2008a)	44
Figura 2.5 - Cisalhamento dos pinos virtuais de concreto, em dois planos de corte, nos furos do Perfobond, Veríssimo (2007)	44
Figura 2.6 – Conectores Perfobond para reforço de estrutura, Neves & Lima (2005)	47
Figura 2.7 - Conectores PSC, Chromiak & Studnicka (2008)	48
Figura 2.8 – Geometria do corpo de prova do ensaio do conector disposto em paralelo, Martins (2008)	49
Figura 2.9 – Curva carga versus deslizamento, Cosenza & Zandonini (1999).	50
Figura 2.10 – Classificação dos conectores e suas curvas características, David (2007).	51
Figura 2.11 – Ensaio de push-out, Eurocode (2005)	52
Figura 2.12 – Esquema do ensaio push-out, Topkaya et al. (2004)	54
Figura 2.13 – Single push-out test, Valente (2007)	55
Figura 2.14 – Conectores tipo bloco, EUROCODE 4 (2001).	58

Figura 2.15 – (a) Definição das áreas Af1 e Af2. (b) Definição dos ângulos α e β .	59
Figura 2.16 – Variação da excentricidade da força frontal, Veríssimo et al. (2007)	64
Figura 2.17 – Largura efetiva b, Queiroz et al.(2001)	69
Figura 2.18 – Incompatível deslocamento complementar em uma descontinuidade do cortante, Oelhlers & Bradford, 1999.	69
Figura 2.19 – Distribuição de tensões na laje, David 2007.	70
Figura 3.1 – Conector T-Perfobond rib proposto por Ferreira (2000)	71
Figura 3.2 – Concepção do conector T-Perfobond	72
Figura 3.3– Geometria dos conectores, Leite (2006)	74
Figura 3.4 – Configurações dos conectores Perfobond, Vianna et al. (2008d)	75
Figura 3.5 - Configurações dos conectores T-Perfobond, Vianna et al. (2008d)	76
Figura 3.6 – Conectores Perfobond e T-Perfobond primeira série	78
Figura 3.7 – Protótipos dos conectores Perfobond e T-Perfobond da primeira série	78
Figura 3.8 – Conectores Perfobond da segunda série	79
Figura 3.9 – Protótipos dos conectores Perfobond da segunda série	79
Figura 3.10 – Conectores T-Perfobond da terceira série	80
Figura 3.11 – Protótipos com conectores T-Perfobond da terceira série	80
Figura 3.12 – Conectores T-Perfobond da quarta série	81
Figura 3.13 – Protótipos com conectores T-Perfobond da quarta série	81
Figura 3.14 – Configuração do perfil com conector T-Perfobond – Portugal	82
Figura 3.15 – Configuração detalhada do protótipo TP-2F-120.	82
Figura 3.16 – Montagem das armaduras e formas no DEC, Coimbra.	83
Figura 3.17 – Concretagem dos protótipos no DEC, UC – Portugal	85
Figura 3.18- – Estrutura de reação e instrumentação para o ensaio tipo push-out, DEC.	86
Figura 3.19 – Instrumentação dos protótipos, DEC – Coimbra.	87
Figura 3.20 – Instrumentação dos extensômetros dos protótipos da primeira série.	87
Figura 3.21 – Instrumentação dos extensômetros do protótipo P-2F-AR-120-A, da segunda série.	88
Figura 3.22 – Instrumentação dos extensômetros do protótipo P-2F-AR-200-A, da segunda série.	88

Figura 3.23 – Instrumentação dos extensômetros do protótipo P-4F-AR-200-A, da segunda série.	89
Figura 3.24 – Instrumentação dos extensômetros do protótipo TP-2F-AR-120-A, da terceira série.	89
Figura 3.25 – Esquema de carregamento para o controle do ensaio de push-out	90
Figura 3.26 – Conectores Perfobond com dois furos com 120 e 200mm de espessura de laje.	92
Figura 3.27 – Conectores Perfobond, primeira série	92
Figura 3.28 – Histórico da tensão no conector Perfobond, Vianna et al. (2008b).	93
Figura 3.29 – Conectores T-Perfobond com dois furos com 120 e 200mm de espessura de laje.	94
Figura 3.30 – Conectores T-Perfobond, primeira série	94
Figura 3.31 – Histórico da tensão no conector T-Perfobond, Vianna et al. (2008b).	95
Figura 3.32 – Comparação do Perfobond com T-Perfobond com dois furos e laje de 120mm.	96
Figura 3.33 – Comparação do Perfobond com T-Perfobond com dois furos e laje de 200mm.	97
Figura 3.34 – Comparação do Perfobond com T-Perfobond com quatro furos e laje de 200mm.	97
Figura 3.35– Demolição dos protótipos.	98
Figura 3.36– Modos de ruína dos Perfobond, Vianna et al.(2007)	99
Figura 3.37– Modos de ruína dos T-Perfobond.	99
Figura 3.38– Plastificação dos conectores, primeira série.	100
Figura 3.39 – Conectores Perfobond para laje com 120mm, segunda série	102
Figura 3.40 – Conectores Perfobond para laje com 200mm, segunda série	102
Figura 3.41 – Detalhe das armaduras nos furos	103
Figura 3.42 – Conectores Perfobond para laje com 120mm e 200mm, segunda série	103
Figura 3.43 – Separação horizontal do conector Perfobond sem furos, P-SF-120-A.	104
Figura 3.44 – Conectores Perfobond para laje com 200mm e presença das armaduras.	105
Figura 3.45 – Deformações no ensaio do conector P-2F-AR-120-A.	107

Figura 3.46 – Extensômetros no conector e na barra no protótipo P-2F-AR-120-A.	107
Figura 3.47 – Extensômetros no conector e na barra no protótipo P-2F-AR-200-A.	108
Figura 3.48 – Deformações no ensaio do conector P-2F-AR-200-A.	108
Figura 3.49 – Extensômetros no conector e na barra no protótipo P-4F-AR-200-A.	109
Figura 3.50 – Deformações no ensaio do conector P-4F-AR-200-A.	110
Figura 3.51 – Deformações no conector P-4F-AR-200-A.	111
Figura 3.52 – Deformações no conector P-4F-AR-200-A, para carga de 350kN.	111
Figura 3.53– Protótipo P-SF-120-A após ensaio, segunda série.	112
Figura 3.54– Protótipo P-2F-120-A após ensaio, segunda série.	112
Figura 3.55– Modos de ruína dos conectores Perfobond, P-2F-AR-120-A, segunda série.	113
Figura 3.56– Protótipo P-2F-AR-120-A após ensaio, segunda série.	113
Figura 3.57– Protótipo P-SF-200-A após ensaio, segunda série.	113
Figura 3.58– Protótipo P-2F-200-A após ensaio, segunda série.	114
Figura 3.59– Protótipo P-4F-200-A após ensaio, segunda série.	114
Figura 3.60 – Conectores para laje de 120mm, terceira série	116
Figura 3.61 – Conectores Perfobond para laje com 120mm, segunda série	116
Figura 3.62 – Conectores Perfobond para laje com 120mm, segunda série	117
Figura 3.63 – Conectores T-Perfobond para laje com 120mm, terceira série	117
Figura 3.64 – Conectores T-Perfobond para laje com 120mm e 200mm, terceira série	118
Figura 3.65 – Histórico da tensão no conector T-Perfobond, terceira série.	120
Figura 3.66 – Deformações no ensaio do conector TP-2F-AR-120-A	120
Figura 3.67– Protótipo TP-2F-120-B após ensaio, terceira série.	121
Figura 3.68– Protótipo TP-2F-120-B-IN após ensaio, terceira série.	122
Figura 3.69– Protótipo T-2F-120-A após ensaio, terceira série.	123
Figura 3.70– Protótipo TP-2F-200-A após ensaio, terceira série.	124
Figura 3.71– Protótipo TP-4F-200-B após ensaio, terceira série.	124
Figura 3.72 – Conectores T e T-Perfobond, quarta série.	126
Figura 3.73 – Protótipos com armaduras de 10mm, quarta série.	127
Figura 3.74 – Protótipos com armaduras de 12,5mm, quarta série.	127
Figura 3.75 – Influência das armaduras nos conectores da quarta série.	128
Figura 3.76 – Configuração dos protótipos após ensaios, quarta série.	129

Figura 3.77 – Influência do concreto nos Perfobond com dois furos	130
Figura 3.78 – Influência do concreto nos Perfobond com quatro furos	130
Figura 3.79 – Influência do concreto nos T-Perfobond com dois furos	131
Figura 3.80 – Influência do concreto nos T-Perfobond com quatro furos	132
Figura 3.81 – Perfobond versus T-Perfobond – laje de 120mm	133
Figura 3.82 – Perfobond versus T-Perfobond- Conectores com armadura nos dois furos	133
Figura 3.83 – Perfobond versus T-Perfobond – laje de 200mm	134
Figura 3.84 – Influência das armaduras nos conectores T-Perfobond e T.	136
Figura 3.85 – Condições de ruptura do concreto em função da espessura, Veríssimo (2007).	137
Figura 3.86– (a) Distribuição da tensão de tração abaixo do conector. (b) Bloco de tensão idealizado, Medberry & Shahrooz (2002)	142
Figura 3.87 – Carregamento num pino de concreto, Kraus & Wurzer (1997)	144
Figura 3.88 - Configurações dos conectores T-Perfobond, segunda etapa	145
Figura 3.89 – T-Perfobond invertido, segunda etapa	146
Figura 3.90 – Configuração do perfil com conector T-Perfobond - Brasil	147
Figura 3.91 – Detalhamento da armadura e configuração do push-out, segunda etapa.	148
Figura 3.92 – Montagem das formas e armaduras no LEM, PUC-Rio.	149
Figura 3.93 – Concretagem dos protótipos no LEM, PUC-Rio.	150
Figura 3.94 – Separação horizontal	151
Figura 3.95 – Configuração dos ensaios com e sem neoprene.	152
Figura 3.96– Estrutura de reação e instrumentação para o ensaio tipo push-out, LEM.	152
Figura 3.97– Rótula para o ensaio tipo push-out, LEM.	153
Figura 3.98 – Instrumentação dos protótipos, LEM – PUC-Rio.	154
Figura 3.99 - Instrumentação global dos protótipos, LEM – PUC-Rio.	154
Figura 3.100 – RDL´s verticais no perfil / laje e RDL´s na viga de transição, LEM.	155
Figura 3.101 – Extensômetros no protótipo TP-2F-AR-IN-10-12-C.	155
Figura 3.102 – Identificação das barras instrumentadas com extensômetros.	156
Figura 3.103 –Extensômetros rosetas no conector.	156
Figura 3.104 –Extensômetros lineares da alma do conector.	156
Figura 3.105 – Identificação dos extensômetros lineares nas barras.	157
Figura 3.106 – Extensômetros lineares nas barras passantes nos furos e no estribo.	157

Figura 3.107 – Extensômetros no protótipo TP-2F-AR-IN-10-12-C protegidos	157
Figura 3.108 – Sistema de aplicação e controle de carga, segunda etapa	158
Figura 3.109 – Conectores T-Perfobond da quinta série.	160
Figura 3.110 – Conectores T-Perfobond da sexta série.	161
Figura 3.111 – Deformação nas mesas dos conectores.	162
Figura 3.112 – Deformação na alma do conector da Laje 1	163
Figura 3.113 – Deformação na alma do conector da Laje 2	163
Figura 3.114 – Deformação das barras passantes nos furos dos conectores da laje 1	164
Figura 3.115 – Deformação das barras da laje 1.	164
Figura 3.116 – Deformação das barras passantes nos furos dos conectores da laje 2.	165
Figura 3.117 – Deformação das barras da laje 2.	165
Figura 3.118 – Deformação dos estribos.	166
Figura 3.119 – Conectores T-Perfobond da quinta série e sexta série.	167
Figura 3.120 – Conectores T-Perfobond, segunda etapa de ensaios	168
Figura 3.121 – Modos de ruína, segunda etapa de ensaios	169
Figura 3.122 – Modos de ruína, TP-2F-AR-IN-10-16-B.	170
Figura 3.123 – Modos de ruína, TP-2F-AR-IN-10-12-C.	170
Figura 3.124 – Comparação do T-Perfobond IPN 340 versus HP 200x53.	173
Figura 3.125 – Conectores T-Perfobond: IPN 340 e HP 200x53.	173
Figura 4.1 - Configurações dos conectores T-Perfobond, a partir do HP200x53	178
Figura 4.2 - Configurações do perfil da viga de 9,0m, W410x60	178
Figura 4.3 – Espaçamento entre os conectores	178
Figura 4.4 – Dimensões dos espaçadores	179
Figura 4.5 – Sistema de apoios: móvel e fixo.	179
Figura 4.6 – Sistema de apoios: móvel e fixo – vão de 8,8m.	180
Figura 4.7 – Montagem das armaduras e formas no LEM.	181
Figura 4.8 – Detalhamento das armaduras em torno do conector.	182
Figura 4.9 – Acabamentos finais na laje.	182
Figura 4.10 – Concretagem da laje, LEM – PUC-Rio.	183
Figura 4.11 – Extensômetros.	184
Figura 4.12 – Extensômetros.	184
Figura 4.13 – Instrumentação e aplicação do carregamento.	186

Figura 4.14 – Instrumentação da viga mista.	187
Figura 4.15 – Instrumentação e aplicação do carregamento.	188
Figura 4.16 – Célula de carga.	188
Figura 4.17 – Esquema de aplicação de carga.	190
Figura 4.18 – Falha por cisalhamento.	192
Figura 4.19 – Fissuras verticais na laje de concreto	192
Figura 4.20 – Momento máximo versus deslocamento vertical no meio do vão.	193
Figura 4.21 – Momento máximo versus deslocamento vertical do ensaio final.	194
Figura 4.22 – Fissura longitudinal no meio do vão.	195
Figura 4.23 – Identificação e posição dos extensômetros.	195
Figura 4.24 – Momento máximo versus deformação da mesa inferior da viga, seção AA.	196
Figura 4.25 – Momento máximo versus deformação da mesa superior da viga, seção AA.	196
Figura 4.26 – Momento máximo versus deformação da mesa inferior da viga, seção BB.	197
Figura 4.27 – Momento máximo versus deformação da mesa superior da viga, seção BB.	198
Figura 4.28 – Seção A-A, 1/5 do vão, $2P = 100\text{kN}$, $M_{\text{max}} = 345\text{kNm}$	199
Figura 4.29 – Seção A-A, 1/5 do vão, $2P = 155\text{kN}$, $M_{\text{max}} = 491\text{kNm}$	199
Figura 4.30 – Seção A-A, 1/5 do vão, $2P = 200\text{kN}$, $M_{\text{max}} = 613\text{kNm}$	200
Figura 4.31 – Seção A-A, 1/5 do vão, Ensaio final - $2P = 220\text{kN}$, $M_{\text{max}} = 665\text{kNm}$	200
Figura 4.32 – Meio do vão - Seção BB, $2P = 100\text{kN}$, $M_{\text{max}} = 345\text{kNm}$	201
Figura 4.33 – Meio do vão - Seção BB, $2P = 155\text{kN}$, $M_{\text{max}} = 491\text{kNm}$	201
Figura 4.34 – Meio do vão - Seção BB, $2P = 200\text{kN}$, $M_{\text{max}} = 613\text{kNm}$	202
Figura 4.35 – Meio do vão - Seção BB, Ensaio final - $2P = 220\text{kN}$, $M_{\text{max}} = 665\text{kNm}$	202
Figura 4.36 – Seção A-A, 1/5 do vão - $2P = 220\text{kN}$, $M_{\text{max}} = 665\text{kNm}$	203
Figura 4.37 – Meio do vão, Seção BB, Ensaio final - $2P = 220\text{kN}$, $M_{\text{max}} = 665\text{kNm}$	204
Figura 4.38 – $2P = 200\text{kN}$ – Deformações nos conectores das extremidades.	205
Figura 4.39 – $2P = 220\text{kN}$ – Deformações nos conectores das extremidades.	205
Figura 4.40 – Deformações nos conectores intermediários.	206
Figura 4.41 – Deformações nos conectores centrais.	206

Figura 4.42 – $2P = 200\text{kN}$ – Deformações das armaduras passantes do conector (1).	207
Figura 4.43 – $2P = 200\text{kN}$ – Deformações das armaduras passantes do conector (2).	207
Figura 4.44 – Ensaio final – Deformações das armaduras passantes do conector (1).	208
Figura 4.45 – Ensaio final – Deformações das armaduras passantes do conector (2).	208
Figura 4.46 – Extensômetros nas armaduras passantes	209
Figura 4.47 – Deformações das armaduras passantes dos conectores intermediários.	209
Figura 4.48 – Deformações das armaduras passantes dos conectores centrais.	210
Figura 4.49 – Momento máximo versus deslizamento no meio do vão.	210
Figura 4.50 – Flecha teórica e experimental	213
Figura 4.51 – Determinação da rigidez experimental	214
Figura 5.1 – Elemento Shell 63, Manual do Ansys	218
Figura 5.2 – Conector T-Perfobond	219
Figura 5.3 – Malha e restrições da mesa do conector	219
Figura 5.4 – Conector IPN340 – espessura 18,3mm.	220
Figura 5.5 – Chapa de 12mm.	220
Figura 5.6 – Conector HP200x53 – espessura 11,3mm.	221
Figura 5.7 – Força versus deslizamento dos conectores Perfobond e T-Perfobond	223
Figura 5.8 – Elemento SOLID65, fonte: Manual do Ansys	224
Figura 5.9 – Elemento SHELL43, fonte: Manual do Ansys	224
Figura 5.10 – Discretização típica da viga mista	225
Figura 5.11 – Modelagem dos conectores, Queiroz et al. (2007)	227
Figura 5.12 – Diagrama tensão-deformação idealizado do concreto, NBR 6118 (2002)	228
Figura 5.13 – Layout da viga simplesmente apoiada, Queiroz et al. (2007)	228
Figura 5.14 – Carga versus deslocamento vertical no meio do vão	230
Figura 5.15 – Carga versus deslocamento vertical no meio do vão	230
Figura 5.16 – Carga versus deslocamento vertical no meio do vão	231
Figura 5.17 – Deformação da laje de concreto – 3 Perfobonds.	232
Figura 5.18 – Deformação da laje de concreto – 9 Perfobonds.	232

Figura 5.19 – Deformação da laje de concreto – regiões sob maiores tensões dos modelos com Perfobond e T-perfobond.	232
Figura 5.20 – Deformação da laje de concreto - 3 T-Perfobonds (IPN 340).	233
Figura 5.21 – Deformação da laje de concreto – 3 T-Perfobonds (HP200x46,1).	233
Figura 5.22 – Deformação da laje de concreto – 50 Studs	234
Figura 6.1 – Experimental versus teórico da primeira série	237
Figura 6.2 – Experimental versus teórico da segunda série	237
Figura 6.3 – Experimental versus teórico da primeira série	238
Figura 6.4 – Experimental versus teórico da segunda série	239
Figura 6.5 – Experimental versus teórico da segunda série	245
Figura 6.6 – Experimental versus teórico da segunda série	245
Figura 6.7 – Experimental versus modelo proposto	248
Figura 6.8 – Conectores T-Perfobond	249
Figura 6.9 – Experimental versus teórico - conector T-Perfobond	250
Figura 6.10 – Experimental versus teórico - conector T-Perfobond invertido	250
Figura 6.11 – Experimental versus modelo proposto conector T-Perfobond.	254
Figura 6.12 – Experimental versus modelo proposto conector T-Perfobond Invertido.	254
Figura 6.13 – Seção transversal da viga mista	256
Figura 6.14 – Modelo esquemático para o cálculo da força de compressão	257
Figura 6.15 – Força por conector versus deslizamento	258
Figura 6.16 – Número de conectores por vão	261
Figura 6.17 – Conectores T-Perfobond mais econômicos	261
Figura 6.18 - Peso relativo (expresso em termos de custos) do material para as vigas, do material para os conectores, e da mão de obra de fabricação e instalação dos conectores.	262
Figura 6.19 - Economia no custo total de produção e instalação dos conectores, por vão e por tipo (expressa em valores percentuais, em relação ao conector tipo Stud)	264
Figura 6.20 - Custos do material dos conectores no Brasil e Portugal.	264

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Ensaios Push-out, primeira etapa	77
Tabela 3.2 – Resistência à compressão média do concreto da primeira série.	91
Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios da primeira série.	96
Tabela 3.4 – Resistência à compressão média do concreto da segunda série.	101
Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios da segunda série.	106
Tabela 3.6 – Resistência à compressão média do concreto da terceira série.	115
Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios da terceira série.	121
Tabela 3.8 – Resistência à compressão média do concreto da quarta série.	126
Tabela 3.9 – Resultados da quarta série	128
Tabela 3.10 – Influência do concreto nos conectores Perfobond	131
Tabela 3.11 – Perfobond versus T-Perfobond	134
Tabela 3.12 – Influência das armaduras nos conectores T e T-Perfobond	136
Tabela 3.13 – Ensaios Push-out, segunda etapa	146
Tabela 3.14 – Resistência à compressão dos cp's da quinta e sexta série, segunda etapa.	159
Tabela 3.15 – Resultados dos ensaios da quinta série	161
Tabela 3.16 - Resultados dos ensaios da segunda etapa	167
Tabela 3.17 – Comparação entre a primeira e segunda etapa	174
Tabela 3.18 – Resistência à compressão média do concreto	174
 Tabela 4.1 – Cargas consideradas	 189
Tabela 4.2 – Resistência à compressão média do concreto	191
Tabela 4.3 – Momentos e tensões experimentais	211
Tabela 4.4 – Rigidez e carga aplicada	214
 Tabela 5.1- Configurações dos modelos e resultados	 229
 Tabela 6.1 – Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond	 236
Tabela 6.2 – Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond	238
Tabela 6.3 – Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond – Oguejiofor & Hosain	240
Tabela 6.4 – Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond – Medberry e Shahrooz	241

Tabela 6.5 – Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond – Ushijima	242
Tabela 6.6 – Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond – Al-Darzi	243
Tabela 6.7 – Resultados experimentais versus teóricos do conector Perfobond – Veríssimo	244
Tabela 6.8 – Dados considerados na análise de regressão e resultados	246
Tabela 6.9 – Coeficientes de regressão	247
Tabela 6.10 – Resultados experimentais versus teóricos do conector T-Perfobond	249
Tabela 6.11 – Dados considerados na análise de regressão e resultados obtidos	251
Tabela 6.12 – Coeficientes de regressão	252
Tabela 6.13 - Quantidade de conectores para os vãos analisados	260

Lista de Quadros

Quadro 3.1 – Conectores Perfobond e T-Perfobond por etapas	73
--	----

Lista de Símbolos

Letras Romanas Maiúsculas

A_c	área efetiva de concreto da seção longitudinal da laje
A_{cc}	área de cisalhamento do concreto por conector
A_{cs}	área da seção transversal do conector
A_{f1}	área da superfície frontal
A_{f2}	área da superfície dianteira do conector
AR	presença de armaduras passantes nos furos
As	área da seção transversal da barra
A_{sc}	área de concreto nos furos do conector
A_{tr}	área das barras de armadura transversal
E	módulo de elasticidade do aço
E_c	módulo de elasticidade do concreto
E_{ci}	módulo de elasticidade
E_{cs}	módulo de elasticidade secante
I	inércia da viga de aço
Ie	inércia da seção mista considerando a interação parcial
Im	inércia da seção mista
IN	posição do conector invertida
L	vão da viga
L_c	comprimento de contato entre o concreto e a mesa do perfil
L_{cs}	comprimento do perfil "U" laminado
Mcc	momento atuante devido a carga concentrada
MDF	Medium-density fiberboard, placa de fibra de madeira de média densidade
Mpp	momento devido ao peso próprio
Mre	momento resistente experimental
Mt	momento total
P	Perfobond
P	carga concentrada
P_{rd}	resistência de cálculo do conector
P_{rk}	menor resistência encontrada dos três ensaios de modelos idênticos reduzida em 10%

P_{rk}	resistência característica do conector
$P_{rkNormaliz}$	resistência característica ao cisalhamento normalizada do conector
R_g	coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores
R_p	coeficiente para consideração da posição do conector
SF	sem furos
T	conector T
TP	T-Perfobond

Letras Romanas Minúsculas

a	distância entre o apoio e a carga concentrada
b	espessura da laje
b_{ef}	largura efetiva
b_f	largura da mesa
b_f	largura da mesa do perfil de aço
d	diâmetro do furo do conector
d_{st}	diâmetro das armaduras que passam pelos furos
$f'c$	resistência média do concreto à compressão
$f'y$	resistência nominal à tração do aço
f_{ck}	resistência característica do concreto à compressão
f_{ck}	resistência característica do concreto à compressão em corpos de prova cilíndricos
$f_{ckmedio}$	valor médio da resistência característica do concreto à compressão em corpos de prova cilíndricos
$f_{cmcubos}$	resistência do concreto à compressão em corpos de prova cúbicos
f_{max}	flecha devido ao peso próprio
f_{maxcc}	flecha devido a carga aplicada
f_u	resistência à ruptura especificada para o material do conector
f_u	limite de resistência
f_{ut}	resistência à ruptura do conector obtida no ensaio experimental
f_y	limite de escoamento do aço
f_{yd}	resistência ao escoamento da barra
h	altura da laje abaixo do conector
h_{sc}	altura do conector
n	número de furos do conector

n	grau de interação
q	peso próprio
q_u	resistência do conector ao cisalhamento
$q_{u\text{ barra}}$	resistência da barra ao cisalhamento
$q_{u\text{ bloco}}$	resistência do bloco ao cisalhamento
$q_{u,\text{test}}$	resistência do conector ao cisalhamento do ensaio
$q_{u\text{ total}}$	resistência total do conector
s	espaçamento entre conectores
t_c	espessura da laje
t_f	espessura da mesa
t_{fcs}	espessura da mesa do conector
t_{PL}	espessura da pré-laje
t_{sc}	espessura do conector
t_w	espessura da alma do conector

Letras Gregas

α	ângulo entre a barra e o plano da mesa
β	ângulo no plano horizontal entre a barra e o eixo longitudinal da viga
$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$	Coefficientes de regressão
δ	flecha devido a carga aplicada
δ_{max}	deslocamento vertical experimental
δ_{teor}	deslocamento vertical teórico durante a fase elástica do ensaio
δ_u	capacidade de deslizamento
δ_{uk}	capacidade de deslizamento característico
ϕ	diâmetro das armaduras
γ_a	fator de segurança do aço para o aço estrutural
γ_c	fator de segurança do concreto
γ_{cs}	coeficiente de ponderação da resistência do conector
γ_s	fator de segurança da armadura
γ_v	coeficiente de ponderação da resistência, igual a 1,25
σ_a	tensão no aço
σ_{ap}	tensão no aço com interação parcial

σ_c	tensão no concreto
σ_{max}	tensão máxima

Lista de Abreviaturas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DEC	Departamento de Engenharia Civil
LEM-DEC	Laboratório de Estruturas e Materiais – Departamento de Engenharia Civil
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
NBR	Norma Brasileira Registrada
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
RDL	Régua de deslocamento linear
UC	Universidade de Coimbra