Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Bruno Costa Assunção

Análise Experimental de Conectores de Cisalhamento Tipo T-Perfobond Modificado

Rio de Janeiro
2018

Bruno Costa Assunção

Análise Experimental de Conectores de Cisalhamento Tipo T-Perfobond Modificado

Tese de doutorado apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco
Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima
Prof. Dr. Luis Filipe da Costa Neves

Rio de Janeiro
2018

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

A851 Assunção, Bruno Costa.
Análise experimental de conectores de cisalhamento tipo T-Perfobond modificado / Bruno Costa Assunção. – 2018.
184f.

Orientadores: Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco, Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, Luis Filipe da Costa Neves.
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Construção mista - Teses. 3. Aço - Teses. 4. Concreto - Teses. 5. Cisalhamento - Teses. I. Oliveira, Tiago Roux de. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 624.016:621.962

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Bruno Costa Assunção

Análise Experimental de Conectores de Cisalhamento T-Perfobond Modificado.

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 02 de maio de 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco – Presidente / Orientador
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima - Orientador
Faculdade de Engenharia – UERJ

Profa. Dra. Monique Cordeiro Rodrigues
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Sebastião Arthur Lopes de Andrade
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Prof. Dr Alexandre Landesmann
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Profa. Dra. Juliana da Cruz Vianna Pires
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Rio de Janeiro

2018

AGRADECIMENTOS

Aos professores Pedro Vellasco, Luciano Lima e Luis Costa Neves pelo tempo, dedicação, instrução e paciência que sempre me ofereceram. Tenho eterna gratidão por todo o tempo e atenção que me foram dedicados.

Aos professores Monique Cordeiro, André Tenchini e Maria Elizabeth pelas instruções práticas e conhecimento repassado.

Aos meus amigos, Alan e Juliano Lima, que sempre estiveram ao meu lado.

Aos meus amigos, Paulo Barreto, Deborah, Beatriz Nogueira, Beatriz e Pedro Fernandes pelos momentos no laboratório da UERJ.

A minha esposa Kátia e a nossa filha Laís que compartilharam comigo afeto, amor e carinho, compreendendo-me e me estimulando nos momentos de dificuldade.

Aos funcionários do laboratório de Engenharia Civil da UERJ, em especial ao Engenheiro Antônio Inácio, que sempre estiveram presentes e dispostos a ajudar.

Ao Professor Manuel Augusto do Departamento de Engenharia Mecânica por compartilhar seus conhecimentos de excelente soldador.

Aos demais professores do corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UERJ.

A Universidade do Estado do Rio de Janeiro, sem ela nada disso seria possível.

Às vezes é preciso dar um passo para trás, para dar dois para frente.

Pensador

RESUMO

ASSUNÇÃO, Bruno Costa. ***Análise experimental de conectores de cisalhamento tipo T-Perfobond modificado.*** 2018. 184f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

A utilização das estruturas mistas vem cada vez mais ganhando espaço na construção civil. A economia de tempo e redução do material de despejo são os principais motivadores desta nova tendência construtiva. Porém, a estrutura mista ideal faz-se presente na otimização da solicitação dos seus elementos ou seja, aço sob tração e concreto sob compressão. Adicionalmente para garantir o comportamento conjunto dos materiais, são utilizados conectores de cisalhamento. Estes conectores trabalham principalmente através da aderência mecânica existente entre o aço e o concreto, já que as contribuições das parcelas de aderência química e aderência por atrito são usualmente desprezadas. Desta forma o ensaio tipo push-out recomendado no Eurocode 4 para determinação da resistência dos conectores de cisalhamento apresenta uma fase cíclica justamente para eliminar as contribuições destas parcelas. O presente trabalho considera a realização de ensaios push-out de conectores de cisalhamento do tipo T-Perfobond modificados. Esta alteração tem como base a variação do angulo entre a mesa destes conectores e a mesa dos perfis base, que no presente trabalho considerou ângulos de 30º, 45º e 60º, além de ensaios de conectores Perfobond e T-Perfobond tradicionais para serem usados como referência. Todos os conectores foram confeccionados a partir de um mesmo perfil W200x26,6. A escolha do perfil foi baseada em trabalhos anteriores em que a mesa do conector deve possuir espessura tal que permita a formação de rótula plástica antes da ruína do concreto e para tal não deve ser soldada a mesa do perfil base. Além da capacidade de carga, os ensaios avaliaram a capacidade de deslizamento dos conectores sendo esta propriedade de fundamental importância na classificação do conector quanto a sua ductilidade, segundo o Eurocode 4. Para serem classificados como dúcteis, os conectores precisam apresentar deslizamento relativo superior a 6mm para um nível de carga aplicada de 90% da carga máxima, já na fase de descarga. Dentre os ensaios realizados o conector com angulo de 60º apresentou o comportamento mais promissor, por isto, levou que novos ensaios desta geometria fossem ensaiados considerando a presença de furos e a de furos com barra de aço passando pelos mesmos. Estas características representaram um ganho de ductilidade nos conectores com ângulo de 60º proporcionando a sua classificação como conectores dúcteis.

Palavras-chave: Estruturas mistas; Aço; Concreto; Conector de cisalhamento, Perfobond; T-Perfobond; T-Perfobond modificado.

ABSTRACT

ASSUNÇÃO, Bruno Costa. ***Experimental assessment of modified t-perfobond shear connectors.*** 2018. 184f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

The use of composite structures is continuously gaining space in construction. The timesaving's and waste reduction material are the primary motivators of this new trend. However, the ideal composite structure is based on the optimum performance of its composing elements namely, steel under tension and concrete under compression. In addition, shear connectors are used to ensure the desired composite action. These connectors ensure a mechanical force transfer between steel and concrete since the chemical and adhesion contributions are usually neglected. This is guaranteed in Eurocode 4 push-out tests recommendations, used for determining the shear connectors resistance, by the requirement of a cyclic phase to eliminate the chemical and adhesion contributions. The current investigation is centred on the development of a modified T-Perfobond based on a series of push-out tests. This novel shear connector is based on altering the angle between the connectors flange to the base profiles flanges, which in this study considered angles of 30°, 45° and 60°. Tests were also made with traditional Perfobond and T- Perfobond connectors to be used as reference. All shear connectors were made from the same profile W200x26.6. The selection of the adopted steel profile was based on earlier investigations that recommended that these shear connectors should have a flange thickness to enable the formation of plastic mechanisms before the concrete failure requiring that the shear connector flanges not to be welded to the base profiles flanges.In addition to the ultimate load capacity, the tests also evaluated their associated slip capacity since this characteristic plays a key part in classifying the connector´s ductility according to Eurocode 4. In this design code to be classified as ductile, the shear connectors must present relative slip greater than 6 mm at a load level corresponding to 90% of their ultimate load during the unloading phase. The shear connector with a 60º angle presented the most promising behaviour and led to new tests of this geometry be performed considering the presence of holes and holes with passing steel reinforcing bars. These characteristics represented a gain of ductility for the 60° angle modified T-Perfobond connectors that were classified as ductile according to Eurocode 4.

Keywords: Steel Framed; Steel; Concrete; Shear connector; Perfobond; T-Perfobond; Modified T-Perfobond.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aderência química, Fusco (1975) 20
Figura 2 - Ensaio de arranchamento (Fusco, 1975) 20
Figura 3 - Saliências na superfície da barra, Fusco (1975) 21
Figura 4 - Desenvolvimento Histórico dos Conectores de Cisalhamento, Cosenza e Zandonini (1999) apud Vianna (2009) 23
Figura 5 – Evolução do conector T-perfobond inclinado 24
Figura 6 - Classificação dos conectores e suas curvas características (David ,2007 apud Vianna, 2009). 27
Figura 7 – (a) Viga bi-apoiada; (b) Comportamento do grau de interação, notas de aula, Simões (2005) 28
Figura 8 – Diagrama tensão deformação de uma viga com interação parcial, simões (2005) 28
Figura 9 – Conector tipo perfil “U”. 29
Figura 10 - Força atuante no conector em uma laje de concreto, Rambo-Roddenberry (2000) 31
Figura 11 - Cisalhamento dos pinos virtuais de concreto, em dois planos de corte, nos furos (Vianna, 2009) 33
Figura 12 – Conector T-Perfobond (Vianna, 2009) 35
Figura 13 – Gráfico comparativo carga por conector x deslizamento, para um conector Perfobond e T-perfobond Conector (Vianna, 2009) 36
Figura 14 – Definição das áreas Af1 e Af2 (Vianna, 2009) 37
Figura 15 – Conectores T-perfobond, Vianna (2009) 37
Figura 16 – (a) 2T-Perfobond (b) I-perfobond (Costa Neves et al, 2013) 38
Figura 17 – Conectores do tipo “Hilti X-HVB” Hilti (2018) apud Duarte (2015) 39
Figura 18 – Conector tipo Crestbond (Veríssimo et al, 2006) apud Duarte (2015) 39
Figura 19 – Conector Y-Type Perfobond soldado no banzo do perfil metálico (Kim et al., 2013 apud Duarte, 2015) 41
Figura 20 - Ensaio Push Out, Eurocode 4 (2005) 42
Figura 21 – Esquema de carregamento para execução de ensaios push-out (Eurocode 4, 2005) 43
Figura 22 – Etapas dos ensaios PUSH-OUT realizados por Vianna (2009) 46

Figura 23 – Geometria dos conectores Leite (2006) apud Vianna (2009).....46
Figura 24 – Dimensões dos conectores utilizados por Vianna (2009).....47
Figura 25 – Configuração do perfil com conector T-Perfobond (Vianna, 2009).....47
Figura 26 – Configuração detalha do protótipo TP-2F-120 (Vianna, 2009).....48
Figura 27 – Posicionamento dos LVDTs (Vianna, 2009).....48
Figura 28 – Disposição dos extensômetros (Vianna, 2009).....49
Figura 29 – Comparativo do Perfobond e T-Perfobond com 4 furos laje de 200mm (Vianna, 2009).....49
Figura 30 – Influência da resistência do concreto nos ensaios de conectores T-Perfobond (Vianna, 2009).....50
Figura 31 – Condições de ruptura do concreto em função da espessura (Veríssimo, 2007 apud Vianna, 2009).....53
Figura 32 – (a) Distribuição da tensão de tração abaixo do conector; (b) bloco de tensão idealizado (Medberry & Shahrooz, 2002 apud Vianna, 2009).....54
Figura 33 –Carregamento em um pino de concreto (Kraus & Wurzer (1997) apud Vianna, 2009).....54
Figura 34 – Influência do diâmetro das armaduras - conectores T-Perfobond (Vianna, 2009).....55
Figura 35 – Conectores T-Perfobond - sexta série (Vianna, 2009).....56
Figura 36 – Resultados, Vianna (2009).....56
Figura 37 – Ensaios push-out (Cândido-Martins et al. ,2010).....58
Figura 38 – Conectores utilizados nos ensaios push-out (Cândido-Martins et al. ,2010).....59
Figura 39 – Carga x Deslocamento, Candido-Martins (2010).....60
Figura 40 – Ruptura da laje de concreto (Cândido-Martins et al. ,2010).....61
Figura 41 – Geometria dos ensaios (Costa-Neves et al., 2013).....61
Figura 42 – Geometria dos ensaios (Costa-Neves, 2013).....61
Figura 43 – Posicionamento dos LVDTs (Costa-Neves et al., 2013).....62
Figura 44 – Posicionamento dos extensômetros (Costa-Neves et al., 2013).....63
Figura 45 – Resultados Perfobond (Costa-Neves et al., 2013).....65
Figura 46 – Resultados T-Perfobond (Costa-Neves et al., 2013).....65
Figura 47 – Resultados I-Perfobond (Costa-Neves et al., 2013).....66
Figura 48 – Resultados 2T-Perfobond, Costa Neves (2013).....67
Figura 49 – Mecanismo de colapso (Costa-Neves et al., 2013).....68

Figura 50 – Características geométricas dos conectores em mm (Pessoa, 2015)....69
Figura 51 – Posição dos conectores no perfil metálico em mm (Pessoa, 2015) 69
Figura 52 – Conectores ensaidos por Pessoa (2015). 70
Figura 53 – Colocação dos LVDT's, Pessoa(2015).....71
Figura 54 – Posicionamento dos extensômetros e das rosetas (Pessoa, 2015).....71
Figura 55 – Distinção das lajes/conectores em cada ensaio.....72
Figura 56 – Curvas carga versus deslocamento para o conector T-Perfobond e T-Perfobond Unconnected (Pessoa, 2015). 73
Figura 57 – Modelo estrutural para avaliação da plastificação do banzo do conector 74
Figura 58 – Plastificação do banzo solicitado ao corte.....75
Figura 59 – Tipos de conectores estudados por Duarte (2015) 77
Figura 60 – Características geométricas dos conectores ensaiados (medidas em mm), Duarte (2015) 78
Figura 61 – Curvas carga versus deslocamento para o concreto 2 – C25/30 (Duarte, 2015) 79
Figura 62 – Resistência de ponta - 1º termo (Duarte, 2015) 80
Figura 63 – Resistência de ponta - 1º termo (Duarte, 2015) 81
Figura 64 – Resistência provocada pelos tarugos de concreto formados devido à existência dos espaços - 2º termo (Duarte, 2015).....81
Figura 65 – Proposta de geometria para o T-Perfobond 83
Figura 66 – zona de confinamento. 83
Figura 67 – Conector P-2F-120. 84
Figura 68 – Configuração detalhada do protótipo P-2F-120 (Vianna, 2009) 85
Figura 69 – Ensaios de tração das barras de aço 85
Figura 70 – Ensaio de dobramento da barras de aço 86
Figura 71 – Posicionamento correto do conector Perfobond 86
Figura 72 – Formas utilizadas nos protótipos dos ensaios push-out.....87
Figura 73 – Corpos de prova de concreto. 87
Figura 74 – *Slump* teste 88
Figura 75 – posição do extensômetros linear.....88
Figura 76 – Posicionamento dos LVDTs nos ensaios push-out 89
Figura 77 – Esquema de posicionamento dos LVDTs (dimensões em mm).....90
Figura 78 – Conector T-Perfobond com variação de ângulo 91

Figura 79 – Formas da concretagem – protótipos com conectores T-Perfobond inclinados 92
Figura 80 – Posição das rosetas – ensaios com conectores T-Perfobond inclinados 92
Figura 81 – Geometria do perfil do conector T-Perfobond inclinado, Portal Metalica93
Figura 82 – Fabricação dos corpos de prova para ensaios a tração.....93
Figura 83 – Corpos de prova após realização dos ensaios a tração.....94
Figura 84 – Curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios a tração 94
Figura 85 – conector com furo.....95
Figura 86 – conector normal.....95
Figura 87 – posicionamento das rosetas.....96
Figura 88 – Posicionamento da Barra de Reforço.....96
Figura 89 – Conector P-2F-120, Vianna(2009). 98
Figura 90 – Plastificação dos conectores.....100
Figura 91 – Fissura da laje.....100
Figura 92 – Carga *versus* deslizamento.....101
Figura 93 – Carga *versus* deslizamento.....102
Figura 94 – Conectores Perfobond 102
Figura 95 – Conectores T-Perfobond modificados.....103
Figura 96 – Carga *versus* deslizamento – ensaios TP30 105
Figura 97 – Deformações e tensões - ensaio TP30B.....105
Figura 98 – Ruptura da laje – ensaios TP30 106
Figura 99 – Plastificação da mesa do conector – ensaios TP30.....106
Figura 100 – Carga *versus* deslizamento – ensaios TP45 107
Figura 101 – Deformações e tensões - ensaio TP45A.....108
Figura 102 – Ruptura da laje de concreto - ensaios TP45 108
Figura 103 – Plastificação da mesa do conector – ensaios TP45.....109
Figura 104 – Plastificação da mesa do conector – ensaios TP45.....109
Figura 105 – Carga versus deslizamento TP60 110
Figura 106 – Deformações e tensões - ensaio TP60A.....110
Figura 107 – Ruptura da laje – ensaios TP60 111
Figura 108 – Plastificação da mesa do conector – ensaios TP60.....111
Figura 109 – Carga *versus* deslizamento - ensaios TP.....112
Figura 110 – Deformações e tensões - ensaio TPA.....112

Figura 111 – Ruptura da laje TP 113
Figura 112 – Plastificação da mesa do conector TP 113
Figura 114 – Conectores T-Perfobond 115
Figura 113 – Medidas dos Perfis (Portal Metálica) 115
Figura 115 – Mecanismos de falha 116
Figura 116 – Carga *versus* deslizamento 116
Figura 117 – Conectores T-Perfobond da presente tese e ensaiados por Pessoa (2015) 117
Figura 119 – Plastificação do Conector 118
Figura 120 – Fissuração da laje 119
Figura 121 – Carga *versus* deslizamento – comparação com Pessoa (2015) 119
Figura 122 – Plastificação dos conectores – T-Perfobond e Perfobond 120
Figura 123 – Carga *versus* deslizamento 121
Figura 124 – Carga *versus* deslizamento 123
Figura 125 – Efeito de *uplift* 123
Figura 125 – Efeito de *uplift* 124
Figura 125 – Carga *versus* tensão 124
Figura 127 – Conector TP60 com furo 125
Figura 128 – Carga versus deslizamento TP60F 126
Figura 128 – Deformações e tensões - ensaio TP60F2 127
Figura 130 – Modo de falha do conector TP60F 128
Figura 131 – Fissuras na laje TP60F 128
Figura 132 – Ângulo de ruptura da área líquida do conector 128
Figura 133 – Ruptura do conector, TP60F 129
Figura 134 – Carga versus deslizamento TP60FB 130
Figura 135 – Deformação e Tensões, TP60FB1 131
Figura 136 – Ruína do conector TP60FB 131
Figura 137 – fissura da laje TP60FB 132
Figura 138 – Efeito de *uplift* TP60 134
Figura 139 – Comparativo ângulo 60, TP60/TP60F/TP60FB 134
Figura 139 – Carga *versus* deslizamento 137
Figura 140 – Proposta de Conector, T-Perfobond modificado 151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo de ensaios push-out da literatura 44
Tabela 2 – Comparação da resistência do concreto nos conectores perfobond (Vianna, 2009) 50
Tabela 3 – Comparação da resistência do concreto nos conectores perfobond (Vianna, 2009) 52
Tabela 4 – Comparação da influência das armaduras, Vianna(2009) 52
Tabela 5 – Resultados quinta e sexta série, Vianna(2009) 56
Tabela 6 – Características geométricas do ensaio push-out (Cândido-Martins et al. ,2010) 57
Tabela 7 – Características geométricas dos ensaios push-out (Cândido-Martins et al. ,2010) 59
Tabela 8 – Características dos ensaios push-out (Costa-Neves et al., 2013) 62
Tabela 9 – Resultados obtidos (Costa-Neves et al., 2013) 64
Tabela 10 – Resumo de resultados obtidos por Costa-Neves et al. (2013) – sem barra 67
Tabela 11 – Resultados obtidos por Costa-Neves et al. (2013) - com barra de reforço 68
Tabela 12 - Resultados dos ensaios push-out (Pessoa, 2015) 73
Tabela 13 - Características geométricas dos ensaios, Duarte (2015) 76
Tabela 14 – Ensaios realizados 83
Tabela 15- Propriedades geométricas do perfil usado no conector T-Perfobond inclinado, Portal metalica 93
Tabela 16- Traço do concreto. 96
Tabela 17- Caracterização da areia. 97
Tabela 18- Caracterização da brita 1. 97
Tabela 19- Características dos ensaios push-out testes 99
Tabela 20 - Comparação de resultados com Vianna (2009) 99
Tabela 21 - Comparação de resultados com Duarte (2015) 101
Tabela 22 - Características dos ensaios *push-out* com conectores inclinados 104
Tabela 23 - Característica dos ensaios TP30 104
Tabela 24 – Síntese dos resultados - ensaios TP45 107

Tabela 25- Característica do ensaio TP60 110
Tabela 26- Característica do ensaio TP 112
Tabela 27- Comparação com Vianna (2009) – Conectores T-Perfobond 114
Tabela 28- Perfis Originários dos conectores T-Perfobond..... 115
Tabela 29- Comparação com Pessoa(2015) – Conectores T-Perfobond..... 117
Tabela 30 - Perfis usados na fabricação dos conectores T-Perfobond 118
Tabela 31- Comparativo dos resultados..... 118
Tabela 32- Comparativo TP/Perfobond 120
Tabela 33 – Comparação de resultados - Ensaios da Etapa 2 - Conectores T-Perfobond com inclinação 30º, 45º, 60º e 90º 121
Tabela 34 - Resistências normalizadas..... 122
Tabela 35- Geometria dos protótipos – avaliação da influência de furos e barras nos conectores T-Perfobond 125
Tabela 36- Característica do ensaio TP60F 126
Tabela 37 – Resultados obtidos – conectores TP60FB 129
Tabela 38- Característica do ensaio TP60 132
Tabela 39- TP/TP60F/TP60FB..... 135
Tabela 40- Comparação de resultados com Pessoa (2015) – Conectores com ângulo de 60º 136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EUROCODE	European Committee for Standardisation
LVDT	Linear variable differential transducer
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

A é a área da seção transversal

A_c – área efetiva de concreto da seção longitudinal da laje (mm²);

A_i^s - Área normal ao plano que corta a direção i

A_{tr}- área total da armadura transversal (mm²)

A_{f1} – é a área da superfície frontal;

A_{f2} – área da superfície dianteira do conector ampliado em uma inclinação de 1:5 à superfície traseira do conector adjacente. Somente as partes de A_{f2} que cai dentro da seção de concreto podem ser consideradas;

b_f – largura da mesa do perfil de aço;

d – Diâmetro do corpo do conector;

d_p – diâmetro do furo do conector *perfobond* (mm);

E_c - módulo de elasticidade do concreto.

E_x - é o módulo de Young no sentido de *x*

E_i^r - é o módulo de Young da barra de reforço i.

f_{ck} – Valor característico da tensão de ruptura do concreto à compressão.

$f_{ckmedio}$ – valor médio da resistência característica do concreto à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa);

f_y – Tensão limite de escoamento (MPa)

f_u – Tensão limite última;

G_{xy} - módulo cisalhante no plano xy

h - altura da laje abaixo do conector (in);

h_{sc}- altura do conector (mm);

I_i - momento de inércia no sentido i

J - momento de inércia a torção

L - comprimento do elemento

L_{cs} - comprimento do perfil U, em milímetro

L_c – comprimento de contato entre o concreto e a mesa do perfil (in);

ℓ_i^r - direção dos cossenos entre x_i^r e os eixos x, y, z.

n – número de furos do conector;

P_{RD} – Força Resistente ao corte do conector tipo Pino (stud);

$P_{rkNormaliz}$ – resistência característica ao cisalhamento normalizada do conector (kN);

q_u – resistência nominal ao cisalhamento do conector *perfobond* (N);

t_f - espessura da mesa do conector, em milímetros, tomada a meia distância entre a borda livre e a face adjacente da alma;

t_{sc}- espessura do conector (mm);

t_w - espessura da alma do conector, em milímetro;

γ_c – fator de segurança do concreto, 1,5.

γ_{cs} - coeficiente de ponderação de resistência do conector, igual a 1,25;

γ_v – coeficiente parcial de segurança relativo à conexão, cujo valor recomendado é 1,25;

ε_c - deformação no instante em estudo.

$\eta = \sqrt{A_{f2}/A_{f1}}$ – devendo ser menor que 2,5 para concreto normal e menor que 2,0 para concreto leve;

ν_{xy} - maior valor para o coeficiente de Poisson

ν_{yx} - menor valor para o coeficiente de Poisson

θ_i - é o ângulo entre a projeção de x_i^r no plano xy e o eixo x.

σ_c - Tensão no instante em estudo (GPa);

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO **19**
1. DIMENSIONAMENTO DE CONECTORES DE CISALHAMENTO **26**
1.1. Classificação De Conectores De Cisalhamento **26**
1.2. Conector tipo perfil U **29**
1.3. Conector Tipo Pino ou "Stud Bolt" **30**
1.4. Conector Tipo Perfobond Rib **32**
1.5. Conector Tipo T-Perfobond **35**
1.7. Ensaios Push-out **41**
2. ENSAIOS PUSH-OUT DE CONECTORES BASEADOS EM VARIAÇÕES DE PERFOBOND E T-PERFOBOND **44**
2.1. Vianna (2009) **45**
2.2. Cândido - Martins et al. (2010) **57**
2.3. Costa-Neves et al. (2013) **61**
2.4. Pessoa (2015) **69**
2.5. Duarte (2015) **76**
3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS **82**
3.1. Conectores Perfobond **84**
3.2. Conectores T-Perfobond **90**
3.3. Conectores T-Perfobond Com Furo, Furo e Barra e Ângulo Reto **94**
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS **98**
4.1. Etapa 1 – Conectores Tipo Perfobond (ensaios piloto) **98**
4.1.1. Comparação de resultados com Vianna (2009) – Conector Perfobond **99**
4.1.2. Comparação de resultados com Duarte (2015) – Conector Perfobond **101**
4.2. Etapa 2 – Conectores T-Perfobond **103**
4.2.1. Ângulo de 30º - TP30 ..... **104**
4.2.2. Ângulo de 45º - TP45 ..... **107**
4.2.3. Ângulo de 60º - TP60 ..... **109**
4.2.4. Ângulo de 90º - TP **111**
4.2.5. Comparativo com Vianna (2009) – Conector T-Perfobond **113**
4.2.6. Comparativo com Pessoa (2015) – Conectores T-Perfobond **117**
4.2.7. Comparação entre Conectores Perfobond e T-Perfobond **119**

4.2.8. Comparação de Conectores T-Perfobond com inclinação 30°, 45°, 60° e 90° **121**
4.3. Etapa 3 – Conector T-Perfobond de 60° com furo e com furo e barra . **125**
4.3.1. Conector T-Perfobond com 60° e furo - TP60F **125**
4.3.2. Conector T-Perfobond com 60° e furo e barra passante - TP60FB **129**
4.3.3. Influência do furo e do furo com barra - Conectores T-Perfobond **132**
4.3.4. Influência do ângulo – Conector T-Perfobond com furo e com furo e barra passante **135**
4.3.5. Comparativo com Pessoa (2015) – Conector T-Perfobond com ângulo de 60° - TP60, TP60F e TP60FB **135**
5. FORMULAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO PROPOSTA **138**
5.1. Introdução **138**
5.2. Modelo de dimensionamento para os conectores sem furo **138**
5.3. Modelo de dimensionamento para os conectores com furo **144**
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS **148**
6.1. Introdução **148**
6.2. Principais Contribuições do Presente Trabalho **149**
6.3. Principais Conclusões **150**
6.4. Sugestões para Trabalhos Futuros **151**
REFERÊNCIAS **153**
APENDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM PERFOBOND. **157**
APENDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM T-PERFOBOND. **159**
APENDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM T-PERFOBOND COM FURO. **176**

INTRODUÇÃO

As estruturas mistas vem ganhando cada vez mais espaço na construção civil devido a fatores como:

- redução no tempo de obra - pois a forma metálica pode ser utilizada como escoramento do concreto das lajes reduzindo assim o tempo de forma e desforma;
- redução do desperdício – visto que com a forma metálica, a compra de material para o escoramento é reduzido;
- melhora na logística da obra – por possuir alguns elementos em aço a entrega pode ser adequada a utilização reduzindo assim o espaço no canteiro para o estoque.

Ao adotar uma estrutura mista procura-se utilizar cada elemento, aço e concreto, onde o comportamento do mesmo seja o melhor possível, ou seja, o concreto a compressão e o aço a tração. Para que isto ocorra é necessário o comportamento solidário entre os elementos. Contudo, ao aplicar os carregamentos transversais na viga, surgem forças de cisalhamento longitudinais que se opõem a este comportamento provocando o deslizamento entre o concreto e o aço.

A ocorrência deste deslizamento ocasiona a mudança do comportamento estrutural, tendo-se uma interação nula a qual ocasiona tensões de tração e compressão em ambos os elementos, aço e concreto.

Visando um comportamento mais adequado para o conjunto estrutural, aço a tração e concreto a compressão, são adicionados ao sistema estrutural, os conectores de cisalhamento.

Conectores de cisalhamento

A força de cisalhamento longitudinal é oposta pela força de aderência dos materiais, aço e concreto e essa aderência possui três parcelas atuantes, segundo Fusco (1975);

- Aderência química - ocorre devido as ligações físico-químicas que se estabelecem na interface entre os elementos durante as reações de pega do cimento. Esta parcela pode ser observada ao se aplicar uma força F_{b1} em um bloco de concreto no sentido ortogonal a placa de aço, que se encontra aderido conforme pode ser visto na Figura 1. A limpeza da superfície onde se tem as ligações físico-químicas, interface aço-concreto, possui significativa interferência no valor de F_{b1}.

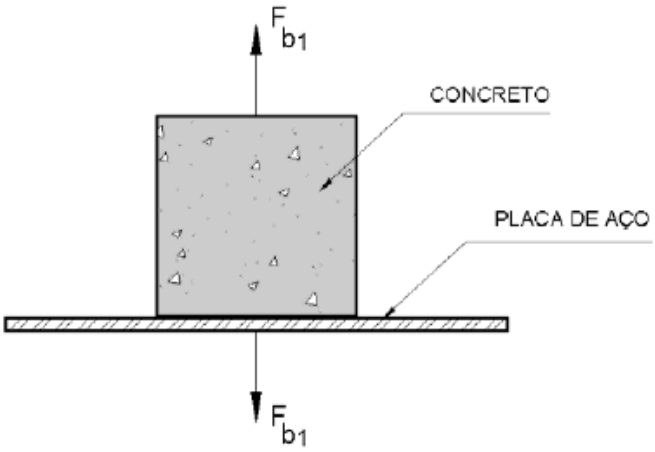


Figura 1 - Aderência química, Fusco (1975)

- A aderência por atrito - pode ser constatada ao se realizar um ensaio de arranchamento em uma barra de aço em um bloco de concreto pois, ao se aplicar uma força F_{b2} no sentido longitudinal na barra de aço, percebe-se que esta força é maior que a necessária no ensaio que constata-se a aderência química, F_{b1}, onde este acréscimo é devido a força de atrito. A Figura 2 apresenta de forma esquematizada um ensaio de arrancamento.

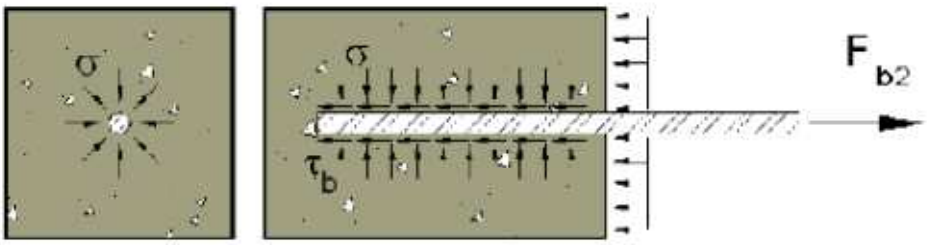


Figura 2 - Ensaio de arranchamento Fusco (1975)

- A aderência mecânica - decorrente da presença de saliências na superfície da barra. Essas saliências funcionam como peças de apoio, mobilizando tensões no concreto conforme mostrado na Figura 3. Além disto, alguns recursos como a utilização de barras curvas, bainhas e conectores de cisalhamento podem aumentar a aderência mecânica. Barras lisas também apresentam aderência mecânica devido as irregularidades superficiais inerentes ao processo de laminação.

Figura 3 - Saliências na superfície da barra, Fusco (1975)

A separação da aderência em três parcelas, química, atrito e mecânica é meramente esquemática não sendo possível determinar cada uma delas isoladamente.

Ensaios em estruturas mistas mostram que para reduzidos valores de carregamento, a aderência química entre os elementos, aço e concreto, é suficiente para o comportamento único dos materiais. Contudo, ao continuar a aplicação do carregamento, a força de aderência é superada pelo cisalhamento longitudinal e as parcelas de aderência química e atrito, mesmo após o descarregamento da estrutura, não retornaram ao seu valor inicial, sendo, reduzidas ou anuladas após serem superadas pela solicitação, segundo Vianna (2009).

Diversos fatores influenciam a aderência dos elementos, aço e concreto, sendo alguns deles: fator água cimento, presença de fissuras ou microfissuras, retração do concreto, tensões provocadas pela variação de temperatura, falhas locais de execução, posição do aço no concreto entre outros.

A norma ABNT NBR 6118 (2014) classifica as regiões do concreto entre zonas de boa aderência e má aderência. As zonas de boa aderência são:

- Quando a aderência dos trechos das barras que estejam com inclinação maior que 45º em relação ao eixo da viga;
- Quando as barras encontram-se na horizontal com inclinação inferior a 45º;
    - Para elementos estruturais com altura inferior a 60 centímetros, localizados no máximo a 30 centímetros da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;
    - Para elementos estruturais com altura superior a 60 centímetros, localizados no mínimo a 30 centímetros abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima.

A parcela por aderência mecânica representa a principal contribuição para a resistência ao esforço de cisalhamento longitudinal atuante, e como forma de aumentar esta resistência, diversos estudos podem ser realizados a respeito dos conectores de cisalhamento.

Tentativas de aprimoramentos no sistema de ligação vêm sendo realizados desde o início do século passado. A patente de Julius Kahn em 1903 do sistema de abas é uma demonstração disto, porém, o progresso no desenvolvimento de conectores mecânicos eficientes foi lento, apesar dos esforços notáveis na Europa (conectores espirais e rígidos) e na América do Norte (conectores flexíveis – perfil U). A inovação apresentada pelos conectores tipo pino (studs) em 1956 teve impacto significativo nas construções mistas e coincidentemente, estes conectores, foram utilizados no mesmo ano em dois diferentes tipos de construção, uma ponte e um edifício. Desde então, passaram a ser os conectores de uso mais popular em sistemas mistos. - Cosenza e Zandonini (1999) *apud* Vianna (2009)

Alguns sistemas utilizados para o aprimoramento da ligação em estruturas mistas são apresentados na Figura 4.

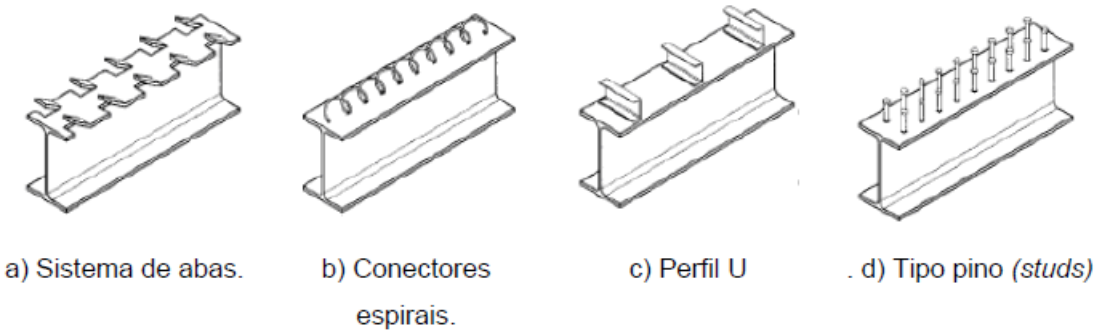


Figura 4 - Desenvolvimento Histórico dos Conectores de Cisalhamento, Cosenza e Zandonini (1999) apud Vianna (2009)

Motivação

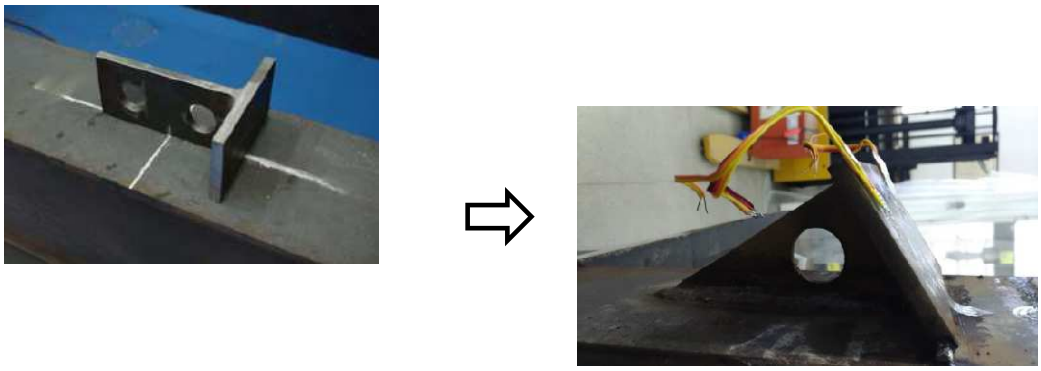
A estrutura mista tem sido cada vez mais utilizada nas construções. Os fatores que contribuem para este aumento são o ganho no tempo de execução e redução do entulho, o fato que a estrutura metálica também pode funcionar como forma e o comportamento estrutural aproveitando a melhor característica de cada um dos materiais envolvidos, ou seja, aço a tração e concreto a compressão proporcionando uma otimização do elemento estrutural.

Diante deste aumento da utilização das estruturas mistas e o fato de que o conector de cisalhamento representa parte fundamental no comportamento global dessas estruturas, torna-se fundamental o desenvolvimento de outros tipos de conectores, evidenciando assim, a aplicabilidade da presente tese.

Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver e caracterizar um novo conector de cisalhamento T-perfobond modificado, baseado em conectores tipo T-perfobond proposto por Vianna (2009), por meio da realização de ensaios *push-out* em laboratório conforme pode ser visualizado na Figura 5.

Diante dos dados experimentais obtidos neste trabalho será realizado um estudo comparativo entre os conectores já avaliados em outros trabalhos com o conector aqui proposto: T-Perfobond inclinado.



a) T-perfobond (Vianna, 2009) b) T-perfobond inclinado

Figura 5 – Evolução do conector T-perfobond inclinado

Estrutura da Tese

No presente capítulo são apresentadas uma pequena introdução, a motivação, os objetivos e a estrutura do trabalho.

O primeiro capítulo apresenta uma breve descrição dos principais tipos de conectores de cisalhamento além dos critérios de análise utilizados para a correta caracterização do comportamento destes conectores. Apresenta-se ainda o procedimento a ser adotado para a realização de ensaios push-out de acordo com as especificações do Eurocode 4 (1994).

No segundo capítulo são apresentados alguns ensaios já realizados de diversos tipos de conectores com as respectivas análises e principais conclusões obtidas de forma a servirem como parâmetro de comparação para os resultados obtidos no desenvolvimento da presente tese de doutorado.

O terceiro capítulo descreve o programa experimental realizado onde são apresentados os diversos tipos de conectores ensaiados, a sequência dos ensaios além da instrumentação adotada nestes ensaios.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos nos ensaios e o comparativo entre os conectores ensaiados além de comparações com os conectores já sugeridos na literatura.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões da presente tese de doutorado além de sugestões para trabalhos futuros.

1. DIMENSIONAMENTO DE CONECTORES DE CISALHAMENTO

O presente capitulo tem por objetivo apresentar os principais tipos de conectores de cisalhamento com as respectivas equações e os critérios de análise adotados para o correto entendimento do seu comportamento.

1.1. Classificação De Conectores De Cisalhamento

A principal característica no dimensionamento dos conectores de cisalhamento é a relação entre a força de cisalhamento transmitida e o deslizamento relativo entre as superfícies de contato dos elementos de um sistema misto, aço e concreto. Esta relação é expressa pela curva carga *versus* deslocamento por meio através de ensaios em escala real ou do tipo *push-out*.

Os conectores de cisalhamento podem ser flexíveis ou rígidos, sendo para isto, utilizada a relação força/deslizamento, rigidez. Um conector é dito flexível se possuir uma menor rigidez sendo, portanto deformável sob ação das cargas de serviço havendo assim, um deslizamento relativo entre o aço e o concreto. Este fato não ocorre com um conector classificado como rígido que, por se deformar pouco, possui deslizamento, entre o aço e o concreto, praticamente nulo.

Um conector flexível, pela sua deformação sob ação das cargas de serviço, torna-se uma solução não ideal em alguns casos onde estados limites de utilização controlam o dimensionamento. Porém, um conector classificado como rígido possui seu modo de falha caracterizado por uma ruptura frágil, com esmagamento ou cisalhamento do concreto, situação essa indesejável do ponto de vista da segurança estrutural.

O Eurocode 4 (2005) recomenda que um conector seja classificado como dúctil caso o valor característico da capacidade de deformação (δ_{uk}) seja igual ou superior a 6mm. Do contrário, será classificado como frágil, conforme apresentado na Figura 6.

A ductilidade dos conectores não afeta o comportamento da viga em regime de utilização, fase elástica, porém, na fase plástica, esta permite a redistribuição do

fluxo de cisalhamento longitudinal entre os conectores. Isto significa que sob carregamento crescente, um conector dúctil pode continuar a se deformar com solicitações próximas à sua ruptura e com isto, permitir que os conectores seguintes absorvam maior força de cisalhamento e atinjam sua resistência. Isso uniformiza o fluxo de cisalhamento permitindo espaçar igualmente os conectores, otimizando a execução da viga mista conforme citado por David (2007) *apud* Vianna (2009).

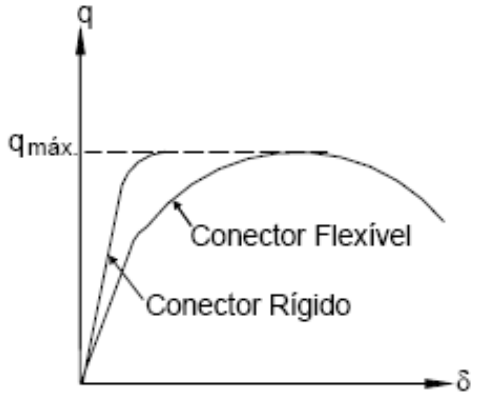


Figura 6 - Classificação dos conectores e suas curvas características (David ,2007 apud Vianna, 2009).

Ao definir o projeto de uma estrutura mista é necessário avaliar corretamente a interação entre seus elementos, aço e concreto, definindo assim, ainda na fase preliminar do projeto, o grau de interação desejado. Conforme já citado anteriormente, esta interação pode ser nula, parcial ou total.

O modelo de uma viga simplesmente apoiada constituída de duas partes ajuda a compreender o grau de interação. Na interação nula, tem-se o comportamento de duas peças em separado, isto é, uma peça encontra-se apenas apoiada na outra, assim a análise das tensões e deformações de cada peça é feita de forma independente. Já na interação total, o comportamento é solidário sendo a análise de tensões e deformações realizada por meio de um processo único. A Figura 7 ilustra os comportamentos citados acima.

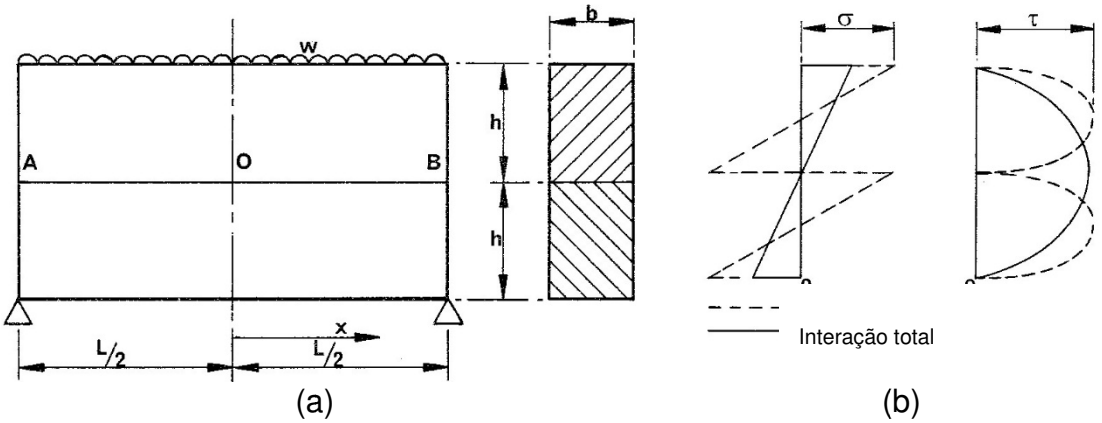


Figura 7 – (a) Viga bi-apoiada; (b) Comportamento do grau de interação, notas de aula, Simões (2005)

A interação parcial encontra-se na zona intermediária entre a interação nula e a total, conforme a Figura 8 exemplifica. O comportamento parcial pode ser desejado em termos econômicos, tendo em vista a redistribuição das tensões e a redução do número de conectores utilizados. Porém, para a sua utilização é necessário que o momento seja positivo e que a ligação seja dúctil.

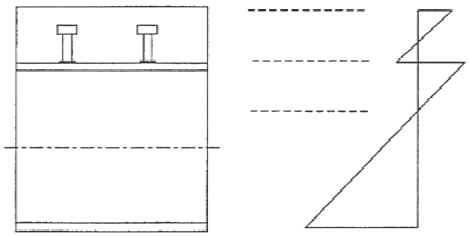
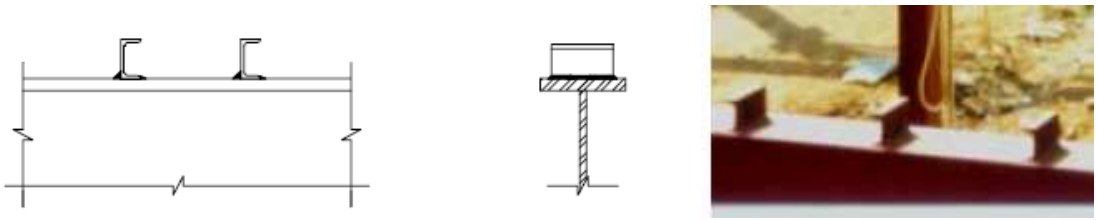


Figura 8 – Diagrama tensão deformação de uma viga com interação parcial, Simões (2005)

Um conector de cisalhamento ideal é aquele cujo comportamento é caracterizado por deslizamento nulo, ou quase nulo, para cargas de serviço e possuir ductilidade em estado limite último. Portanto, as características de um conector rígido são desejáveis em condições de serviço e as características de um conector flexível são desejáveis em estado limite último de acordo com o apresentado por Veríssimo (2007) *apud* Vianna (2009).

1.2. Conector tipo perfil U

O conector tipo perfil U é caracterizado pela realização de solda em um trecho de perfil U sobre a mesa do perfil da viga, conforme a Figura 9. A utilização do perfil U como conector tem base na fácil execução e na utilização de perfis, o que pode gerar a reutilização de perfis e como consequência, uma economia na obra. A norma brasileira NBR 8800 (2008) restringe que o perfil U deve ser assentado com a mesa sobre a viga de aço com o plano da alma perpendicular ao eixo longitudinal da viga.



(a) (b)

Figura 9 – Conector tipo perfil “U”.

A norma brasileira NBR 8800 (2008), para o cálculo da resistência do conector tipo perfil U, apresenta uma fórmula dimensional em kN, conforme equação (1).

$$q_{Rd} = \frac{0{,}3 \cdot (t_f + 0{,}5t_w) \cdot L_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck}E_c}}{\gamma_{cs}} \tag{1}$$

onde

γ_{cs} - coeficiente de ponderação de resistência do conector, igual a 1,25;

t_f - espessura da mesa do conector, em milímetros, tomada a meia distância entre a borda livre e a face adjacente da alma;

t_w - espessura da alma do conector, em milímetro;

L_{cs} - comprimento do perfil U, em milímetro

f_{ck} - resistência característica do concreto à compressão, em megapascal;

E_c - módulo de elasticidade do concreto.

1.3. Conector Tipo Pino ou "Stud Bolt"

Os conectores tipo pino (*studs*) representam os conectores com uso mais difundido e tiveram seus estudos iniciados na década de 50, conforme Weicehn et al. (2008). Tal conector consiste de um pino especialmente projetado para funcionar como um eletrodo de solda por arco elétrico e ao mesmo tempo, após a soldagem, como conector de corte possuindo uma cabeça com dimensões padronizadas para cada diâmetro.

O conector tipo pino difundiu-se mundialmente, em função da produtividade que proporciona, da velocidade de aplicação, a boa ancoragem no concreto e a facilidade de colocação de armaduras entre os conectores. Sua desvantagem está no fato de ser um conector flexível sendo deformável diante de cargas de serviço, o que limita sua utilização nos casos de ligações sujeitas à fadiga, e no fato de necessitar de um equipamento de solda especial, que inclui um gerador de grande potência conforme relatado por Vianna (2009).

Nos primeiros estudos utilizando conectores de cisalhamento do tipo pino , a capacidade do mesmo fora sugerida como o carregamento no qual a curva carga *versus* deslocamento inicia a sua fase não-linear ou ao carregamento correspondente a 0,762 mm de deslocamento residual (Viest, 1956 apud William et al. , 2004).

Rambo-Roddenberry et al. (2000) apresentaram um estudo das forças atuantes no conector tipo pino em uma laje de concreto, conforme representado na Figura 10. Nesta figura tem-se a força medida em um ensaio *push-out* como a soma de Q_s e Q_f, sendo grande parcela deste esforço, a existente pela resistência ao movimento do conector tipo pino sobre a laje de concreto. A resultante da força C atua a uma distância X_c, acima da base do conector tipo pino. O momento gerado sobre a base do conector é resistido por uma força normal N, a qual tem sua resultante atuando a uma distância X_n, a partir do eixo do conector de cisalhamento. Esta força normal N gera uma força de atrito ao longo da interface S (laje/viga) e é esta força de atrito que permite a ligação, uma resistência acima da permitida pelo conector isolado. A resistência do conector ao cisalhamento é a soma da força do fuste do conector, Q_s e da força de atrito, Q_f.

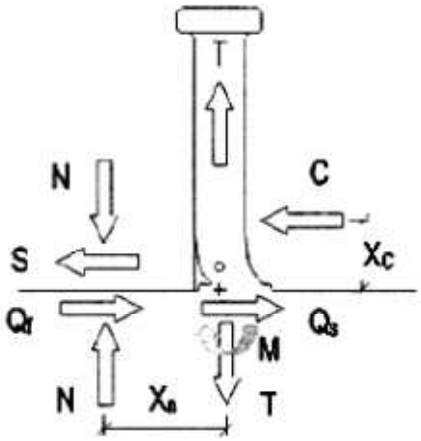


Figura 10 - Força atuante no conector em uma laje de concreto, Rambo-Roddenberry (2000)

Hanswille e Bergman (2006) sugerem que a transferência do esforço cortante entre o concreto e o conector tipo pino faz-se através da interface e envolve as contribuições das forças geradas pela flexão do conector, da inclinação do conector, devido ao atrito e do anel de solda. Este último, segundo Calado (2009), representa cerca de 70% do valor da força de resistência do conector.

Os ensaios de flexão de vigas mistas e os ensaios *push-out* apresentam algumas diferenças quanto ao comportamento dos conectores. Os resultados obtidos por meio de ensaios *push-out* levam a resultados geralmente menores que os obtidos com ensaios de vigas mistas, conforme Slutter & Driscoll (1965) apud William et al. (2004). Os métodos de cálculo atuais e os códigos utilizados para o cálculo da resistência ao cisalhamento do conector tipo pino são baseados em sua grande maioria, nos ensaios *push-out* (Nie *et al.*, 1996). Atualmente, o estudo dos conectores de cisalhamento tem influência de diversos parâmetros, conforme relatado por Oehlers & Johnson (1987) e An & Cederwall (1996). Dentre os diversos parâmetros tem-se maior destaque para: o diâmetro do corpo do conector, a altura e a tensão de ruptura do conector; a força de compressão; a resistência a compressão do concreto e o detalhamento da armadura.

O Eurocode 4 (2005) considera alguns destes parâmetros ao apresentar a fórmula de cálculo para o valor da força resistente do conector tipo pino conforme apresentado nas equação (2) a (4).

$$P_{RD} = \min\,(P_{RD}^{(1)}; P_{RD}^{(2)}) \tag{2}$$

$$P_{RD}^{(1)} = \frac{0{,}8 \cdot f_u \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4}}{\gamma_v} \tag{3}$$

$$P_{RD}^{(2)} = \frac{0{,}29 \cdot \alpha_s \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_v} \tag{4}$$

onde

P_{RD} – força resistente ao corte do conector tipo Pino (stud);

γ_v – coeficiente parcial de segurança relativo à conexão, cujo valor recomendado é 1,25;

d – diâmetro do corpo do conector;

f_u – valor da tensão limite de ruptura do conector;

f_{ck} – valor característico da tensão de ruptura do concreto à compressão.

α_s – calculado pelas expressões a seguir:

$$\alpha_s = 0{,}2 \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1\right) \quad \text{para} \quad 3 \leq \frac{h_{sc}}{d} \leq 4 \tag{5}$$

$$\alpha_s = 1 \quad \text{para} \quad \frac{h_{sc}}{d} > 4 \tag{6}$$

onde

h_{sc} – Altura do conector.

1.4. Conector Tipo Perfobond Rib

O conector tipo perfobond rib, foi inicialmente projetado pela empresa de engenharia alemã *Leonhardt, Andrä and Partners* para aumentar a resistência à fadiga em uma ponte mista de aço e concreto na Venezuela, como alternativa aos conectores tipo pino que apresentam baixo desempenho à fadiga (Zellner, 1987 *apud* Vianna, 2009).

Este tipo de conector é composto por uma chapa retangular de aço, com furos sendo esta posteriormente soldada na viga de aço. Durante a concretagem, os furos da chapa são preenchidos por concreto, formando cilindros que fornecem a

resistência ao cisalhamento longitudinal e previnem a separação vertical entre a viga de aço e a laje de concreto conforme apresentado na Figura 11. O desempenho estrutural pode ser melhorado pela colocação de barras passantes por meio dos furos como citado por Vianna (2009).

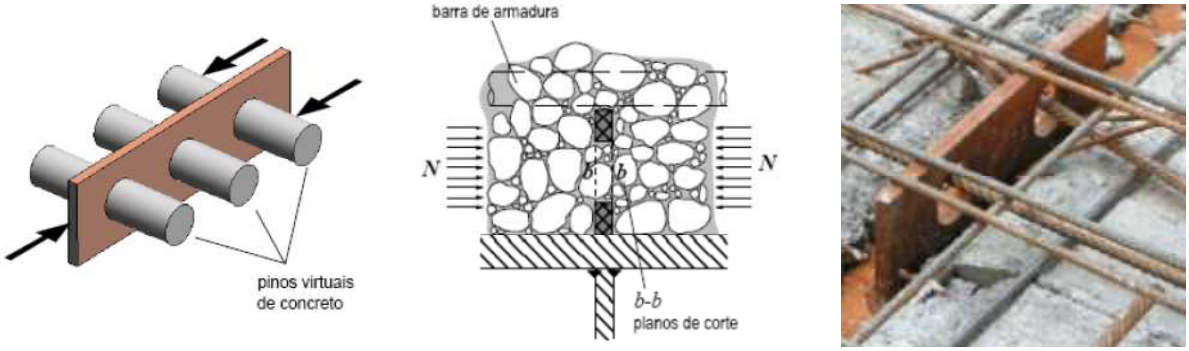


Figura 11 - Cisalhamento dos pinos virtuais de concreto, em dois planos de corte, nos furos (Vianna, 2009)

Diversos autores realizaram uma quantidade considerável de ensaios *push-out* para aferir a resistência dos conectores tipo *Perfobond* através dos quais foi possível identificar os principais parâmetros geométricos e de material que influenciam significativamente no comportamento estrutural do conector, tais como: a resistência à compressão do concreto, o número de furos, a espessura e dimensões da placa e a quantidade de armadura transversal utilizada (Vianna, 2009).

Oguejiofor & Hosain (1994) apud Vianna (2009), deram continuidade ao trabalho e realizaram quarenta ensaios do tipo *push-out* em conectores do tipo perfobond, variando nestes ensaios, a quantidade de furos, o espaçamento entre os furos, a armadura transversal e a resistência do concreto. Ao final dos estudos foi proposta a primeira equação para o cálculo da sua capacidade de carga conforme equação (7).

$$q_u = 0{,}590 \cdot A_c \cdot \sqrt{f_c'} + 1{,}233 \cdot A_{tr} \cdot f_y + 2{,}871 \cdot n \cdot d_p^2 \cdot \sqrt{f_c'} \qquad (7)$$

onde

q_u – resistência nominal ao cisalhamento do conector *perfobond* (N);

A_c – área efetiva de concreto da seção longitudinal da laje (mm²);

A_{tr} – área das barras de armadura transversal presente nos furos do conector (mm²);

d_p – diâmetro do furo do conector *perfobond* (mm);

n – número de furos do conector;

f_c' - é a resistência média do concreto à compressão (MPa);

f_y – é a resistência média à tração do aço (MPa)

Oguejiofor & Hosain (1997) realizaram algumas análises numéricas e estabeleceram uma nova equação, (8), que quantificaria melhor a capacidade de carga da ligação, *apud* Vianna (2009).

$$q_u = 4{,}5 \cdot h_{sc} \cdot t_{sc} \cdot f_c' + 0{,}91 \cdot A_{tr} \cdot f_y + 3{,}31 \cdot n \cdot d^2 \sqrt{f_c'} \tag{8}$$

onde

h_{sc}- altura do conector (mm);

t_{sc}- espessura do conector (mm);

A_{tr}- área total da armadura transversal (mm²)

Medberry & Shahrooz (2002) *apud* Vianna (2009) após realizarem trinta ensaios experimentais e compararem o resultado com alguns relatados por Oguejiofor & Hosain (1994), propuseram uma terceira equação, (9), para o cálculo da resistência do conector perfobond.

$$q_u = 9 \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{f_c'} + 60 \cdot b_f \cdot L_c + 0{,}9 \cdot A_{tr} \cdot f_y + 20 \cdot n \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \sqrt{f_c'} \tag{9}$$

onde

q_u - resistência nominal ao cisalhamento do conector *perfobond* (lbs);

h - altura da laje abaixo do conector (in);

f_c' - resistência média do concreto à compressão (psi);

b_f – largura da mesa do perfil de aço (in);

L_c – comprimento de contato entre o concreto e a mesa do perfil (in);

n – número de furos do conector;

d – diâmetro do furo do conector (in);

A_{tr} – área total de armadura transversal presente na laje (in²);

f_y – resistência nominal Pa tração do aço (psi).

A equação (9) tem no seu segundo termo, um fator que representa a aderência química entre o concreto e o aço, reconhecendo a importância da química e do atrito para a ligação. A equação (10) apresentada abaixo foi elaborada da conversão da equação (9) acima para unidades SI, tendo seu resultado em N (Newton) conforme proposto por Vianna (2009):

$$q_u = 0{,}747 \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{f_c'} + 0{,}413 \cdot b_f \cdot L_c + 0{,}9 \cdot A_{tr} \cdot f_y + 1{,}66 \cdot n \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \sqrt{f_c'} \qquad (10)$$

1.5. Conector Tipo T-Perfobond

O conector tipo T-Perfobond é composto por duas chapas perpendiculares em formato de T, conforme a Figura 12. A adição desta chapa perpendicular proporciona um ganho na resistência ao conector, contudo a ductilidade do conector fica comprometida conforme pode ser observado na Figura 13 onde são apresentadas curvas carga *versus* deslocamento obtidas em ensaios *push-out* de conectores Perfobond e T-Perfobond. O fato do conector tipo T-Perfobond poder ser fabricado a partir de um perfil I originou o nome mesa a esta chapa perpendicular evidenciando assim, a economia que pode ser gerada na fabricação dos mesmos.

Figura 12 – Conector T-Perfobond (Vianna, 2009)

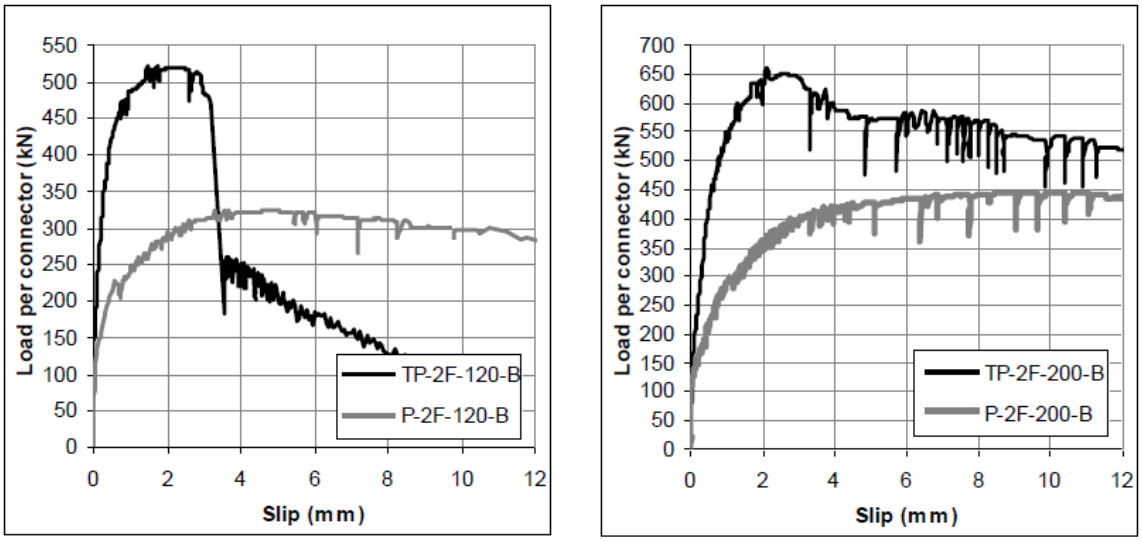


Figura 13 – Gráfico comparativo carga por conector x deslizamento, para um conector Perfobond e T-perfobond Conector (Vianna, 2009)

Vianna (2009) utiliza a equação (11) proposta pelo Eurocode 4 (2005), apresentada abaixo, para o cálculo com o T-perfobond, vide.

$$q_u = \eta \cdot A_{f1} \cdot f_{ck}/\gamma_c \tag{11}$$

onde

A_{f1} – é a área da superfície frontal, Figura 14;

$\eta = \sqrt{A_{f2}/A_{f1}}$ – devendo ser menor que 2,5 para concreto normal e menor que 2,0 para concreto leve;

A_{f2} – área da superfície dianteira do conector ampliado em uma inclinação de 1:5 à superfície traseira do conector adjacente Figura 14. Somente as partes de A_{f2} que caem dentro da seção de concreto podem ser consideradas;

γ_c – fator de segurança do concreto, 1,5.

Vianna (2009) ressalta a importância da posição do conector T-Perfobond em relação ao sentido do esforço, conforme Figura 15. Esta premissa pode ser visualizada nas equações propostas por Vianna (2009), ocorrendo esta variação em virtude do comportamento de bloco.

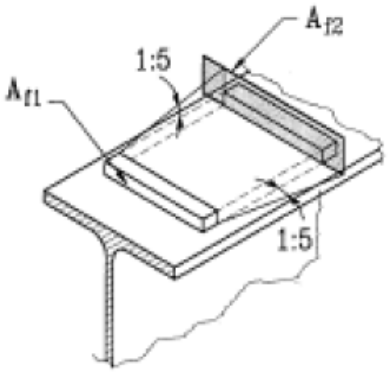


Figura 14 – Definição das áreas Af1 e Af2 (Vianna, 2009)

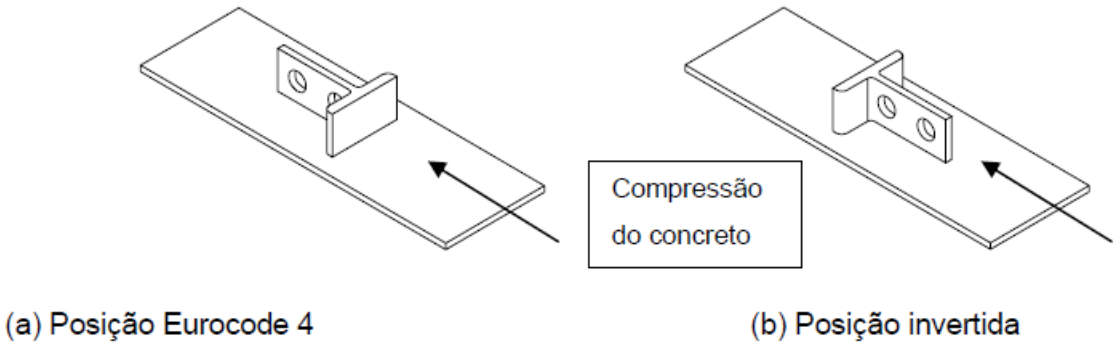


Figura 15 – Conectores T-perfobond, Vianna (2009)

Assim, Vianna (2009) propõe uma nova equação para o cálculo do conector T-perfobond para os modelos estudados na sua pesquisa. Esta equação possui três domínios, conforme apresentado a seguir:

- T-Perfobond;

$$q_u = 174 + 0{,}25 \cdot \left(\sqrt{\frac{A_{f2}}{A_{f1}}} \cdot A_{f1} \cdot f_{ck} \right) - 1{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot (h_{sc} \cdot t_{sc} \cdot f_{ck}) + 0{,}55 \cdot 10^{-3} \cdot (A_{tr} \cdot f_y) - 0{,}14 \cdot 10^{-3} \cdot \left(A_{sc} \cdot \sqrt{f_{ck}}\right) \quad (12)$$

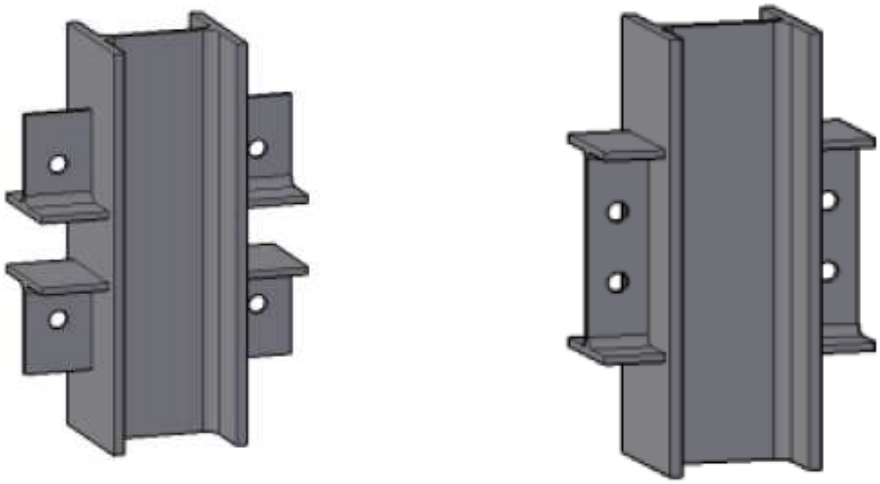
- T- perfobond invertido com fck < 30MPa;

$$q_u = -0{,}43 \cdot 10^6 - 16{,}7 \cdot (h_{sc} \cdot t_{sc} \cdot f_{ck}) + 84{,}5 \cdot \left(A_{sc} \cdot \sqrt{f_{ck}}\right) \quad (13)$$

- T-perfobond invertido com fck > 30 MPa;

$$q_u = 243{,}5 + 3{,}14 \cdot 10^{-3} \cdot (h_{sc} \cdot t_{sc} \cdot f_{ck}) + 0{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot \left(A_{tr} \cdot f_y\right) \quad (14)$$

A supressão da contribuição do bloco nos T-perfobond invertidos segue a recomendação dada pelo Eurocode 4 (2001). A influência da mesa tem demonstrado ser significante para o conector, sendo lógica a tentativa de outros tipos de conectores como o 2T-Perfobond e I-Perfobond conforme apresentado na Figura 16 cuja a configuração foi estudada por Costa Neves et al, 2013.



(a) (b)

Figura 16 – (a) 2T-Perfobond (b) I-perfobond (Costa Neves et al, 2013)

1.6. Outros tipos de Conectores

A Hilti Corporation® desenvolveu o conector tipo X-HVB, conforme apresentado na Figura 17. Este conector é uma alternativa aos conectores soldados visto que podem ser instalados com pistola e espoleta (Duarte, 2015). O autor ainda destaca que esta fixação apresenta a vantagem de eliminar as soldas, não necessitando de energia elétrica para a sua instalação, nem de mão-de-obra qualificada, permitindo ainda a possibilidade de ser aplicado através do *deck* metálico. Este tipo de conector satisfaz o critério de ductilidade exigido pelo Eurocode 4 (2005), permitindo assim, a colocação da hipótese de comportamento plástico ideal da conexão.

Outro conector apresentado na literatura é o *Crestbond* ou *CR* (Figura 18) sendo uma alternativa ao Perfobond tendo sido criado por Veríssimo *et al.* (2007). Este conector é formado por uma chapa dentada, de corte simétrico com saliências e reentrâncias trapezoidais, cuja função é a de garantir a resistência de corte longitudinal, bem como assegurar uma boa resposta ao efeito de *Uplift* (Duarte, 2015).

Figura 17 – Conectores do tipo “Hilti X-HVB” Hilti (2018) apud Duarte (2015)

As aberturas deste conector facilitam a disposição das armaduras podendo ser utilizadas para garantir o espaçamento e cobrimento das armaduras. Assim como no conector Perfobond, o Crestbond permite, durante a concretagem, o preenchimento dos dentes por concreto os quais permitem um comportamento similar aos cilindros de concreto do Perfobond conforme apresentado anteriormente na Figura 11, fornecendo resistência ao cisalhamento longitudinal e prevenindo a separação vertical entre a viga de aço.

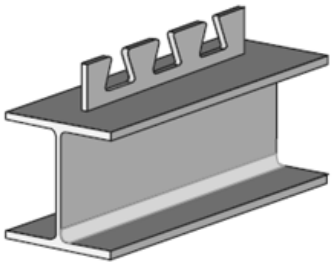


Figura 18 – Conector tipo Crestbond (Veríssimo et al, 2007) apud Duarte (2015)

Duarte (2015) cita que nos ensaios de Veríssimo *et al.* (2007) descreve diversos aspectos variados nos conectores dentre os quais pode-se: as suas dimensões; o tamanho das aberturas; o raio dos cantos dos dentes e a taxa de armadura. Tanto a capacidade de carga como a ductilidade destes conectores são influenciadas pela resistência do concreto envolvente e pela armadura que passa na proximidade do conector. Para o mesmo tipo de concreto, um único conector do tipo CR tem a resistência equivalente à de quatro conectores tipo pino. O deslizamento característico foi praticamente sempre superior a 6 mm, o que caracteriza um comportamento dúctil para estes conectores.

Os conectores *Y-Type Perfobond* propostos por Kim *et al.* (2013) são baseados no conector *Perfobond*, mas parte da chapa está alternadamente inclinada para cada um dos lados, tendo igualmente os furos para permitir passagem de armadura e a criação dos tarugos no interior da laje. Adicionalmente, permite a formação de novos tarugos nas zonas das dobras do Y, como se pode observar na Figura 19 (Duarte, 2015).

Duarte (2015) informa ainda que nos ensaios de *Y-Type Perfobond*, os parâmetros variáveis foram: a inclinação da chapa; a resistência do concreto; a existência ou não de armadura transversal; e a espessura da chapa. Os resultados dos ensaios *push-out* indicam que a resistência ao corte do conector *Y-Type Perfobond* é melhor do que a do conector *Perfobond*, bem como a sua ductilidade (o *Y-Type Perfobond* apresenta um comportamento dúctil). Ao aumentar a resistência do concreto ou a espessura do conector foi observado ganho de resistência ao corte e a perda do deslizamento com consequente perda de deslizamento. A armadura transversal nas aberturas também resultou em um ganho de resistência e na perda de deslizamento, considerando os conectores Y-Type.

Duarte (2015) apresenta também, como vantagem deste tipo de conector, para além de facilidade de colocação das armaduras transversais nas aberturas do Y comparativamente ao *Perfobond* convencional, o fato de apresentarem um comportamento mais dúctil e uma excelente resistência às forças transversais ao plano de corte, ou seja, uma excelente resposta ao efeito de *Uplift*.

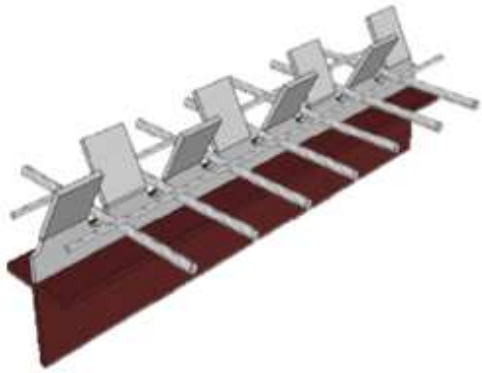


Figura 19 – Conector Y-Type Perfobond soldado no banzo do perfil metálico (Kim et al., 2013 apud Duarte, 2015)

1.7. Ensaios Push-out

O Eurocode 4 (2005) apresenta para a determinação da resistência do conector de cisalhamento, a realização de ensaios *push-out*, que consiste na utilização de um perfil de aço entre duas lajes de concreto sendo a ligação entre os elementos, aço e concreto, realizada pelos conectores de cisalhamento, conforme apresentado na Figura 20. O Eurocode 4 (2005) apresenta algumas recomendações quanto a preparação do ensaio:

- Cada uma das duas lajes de concreto deve ser confeccionada na posição horizontal, conforme o feito para vigas mistas na prática;
- A ligação química na interface entre as mesas da viga de aço e o concreto deve ser evitada por lubrificação das mesas ou por outro meio adequado;
- Os corpos de ensaio devem ter sua cura realizada ao ar;
- Cada mistura necessita de um mínimo de quatro amostras de concreto (cilindros ou cubos) para a determinação da resistência do concreto, devendo este ser preparado no momento do lançamento dos espécimes de ensaio. Estas amostras de concreto devem ser curadas ao lado dos espécimes push-out. A resistência do concreto f_{cm} deve ser tomada como o valor médio;
- A resistência à compressão do concreto f_{cm} no momento do teste deve ser de 70% ± 10% da força especificada do f_{ck} de concreto das vigas para o qual, o

teste foi projetado. Esta exigência pode ser satisfeita usando concreto de grau especificado, mas sendo realizado antes dos 28 dias;

- O limite de elasticidade, resistência à tração e alongamento máximo de uma amostra representativa do material do conector de cisalhamento deve ser determinada;
- Se chapas de aço perfilada forem utilizadas para as lajes, a resistência à tração e o limite de escoamento das chapas de aço perfilado devem ser obtidas a partir de ensaios, em espécimes retirados das folhas, usadas nos testes *push-out*.

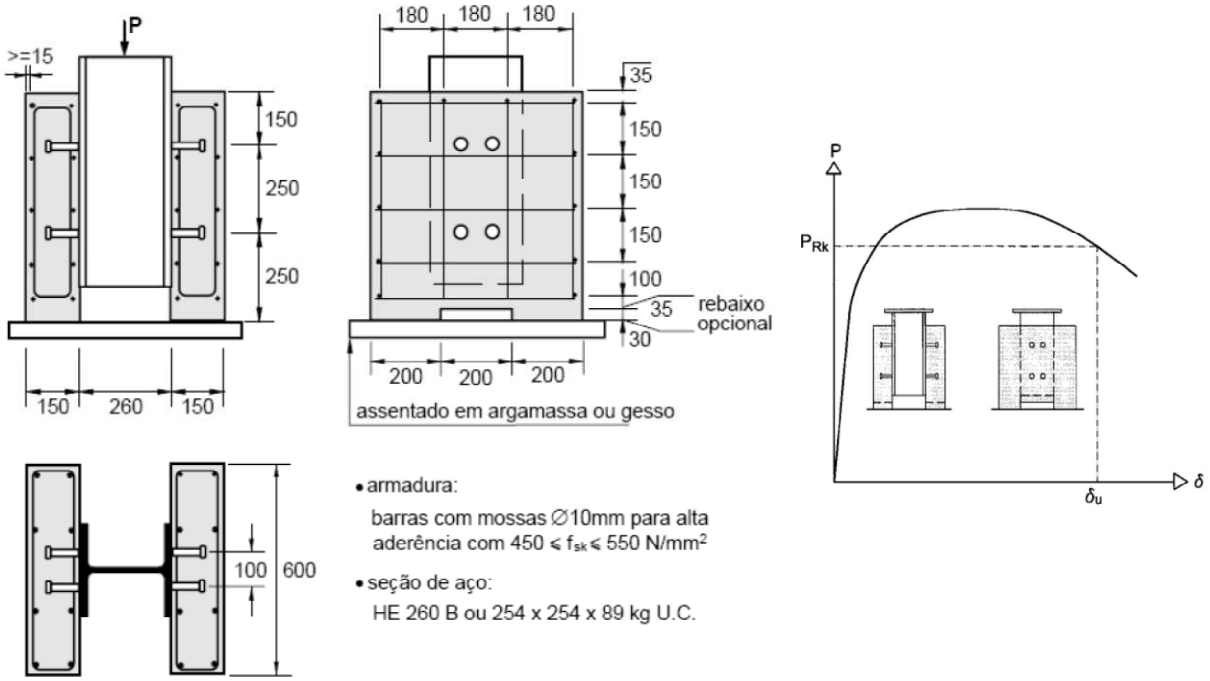


Figura 20 - Ensaio Push Out, Eurocode 4 (2005)

Além das recomendações para a preparação do ensaio, o Eurocode 4 (2005) apresenta recomendações para a execução do mesmo de acordo com a :

- Inicialmente, aplicam-se incrementos de carga até se atingir 40% da carga máxima esperada, e então são realizados 25 ciclos de carga/descarga entre as cargas correspondentes a 5% e 40% da carga de ruptura;
- Os incrementos de carga após a fase cíclica devem ser aplicados de modo a não provocar ruptura antes de um período de 15 minutos;
- O deslizamento relativo entre a laje de concreto e a viga de aço deve ser monitorado em todo ensaio, sendo este medido pelo menos até que a carga aplicada decresça em 20% do valor máximo;

- Deve-se medir também, próximo aos conectores, a separação transversal entre a mesa e a laje.

A Figura 21 apresenta o procedimento de ensaio adotado neste trabalho.

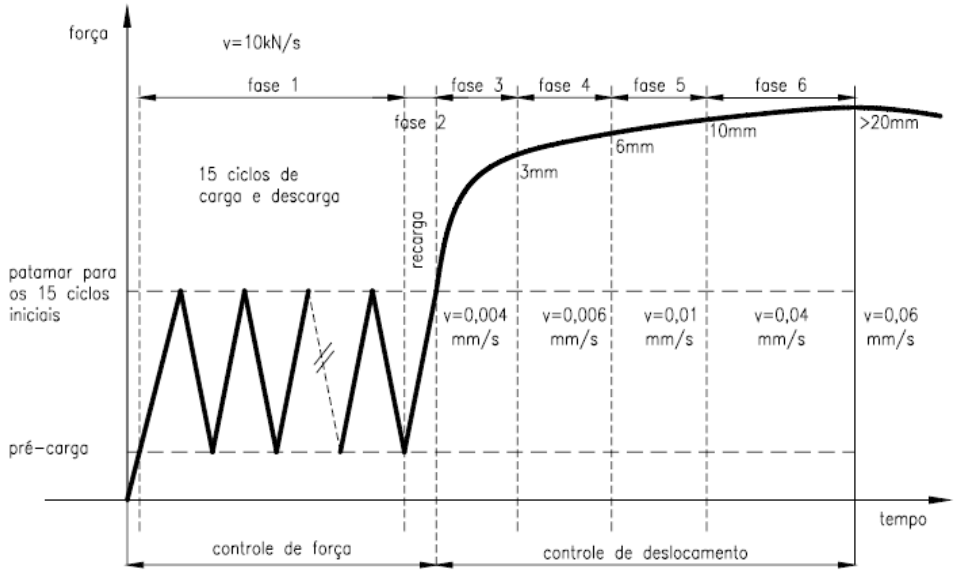


Figura 21 – Esquema de carregamento para execução de ensaios push-out (Eurocode 4, 2005)

Cabe destacar que ao indicar o procedimento de ensaio, o Eurocode 4 (2005) procura respeitar as condições reais de uma estrutura e, em alguns casos, com procedimentos a favor da segurança, como a cura ao tempo. Além disto, as parcelas de aderência química e por atrito são reduzidas com aplicação cíclica da carga inicial.

Recomenda-se que na fase cíclica seja feito o controle por carregamento e posteriormente o controle seja realizado por deslocamento.

A padronização do ensaio e sua recomendação por norma demonstra a importância dos conectores de cisalhamento para a aderência entre o aço e o concreto, sendo natural que diversas geometrias sejam propostas para este tipo de conector.

2. ENSAIOS PUSH-OUT DE CONECTORES BASEADOS EM VARIAÇÕES DE PERFOBOND E T-PERFOBOND

Compreender o real comportamento e possíveis trajetórias de transferências das forças de cisalhamento presentes na interface entre o aço e o concreto é fundamental para uma correta avaliação de sistemas estruturais mistos. Desta forma, o presente capítulo apresenta alguns dos programas de ensaios experimentais de *push-out* que servirão para comparação e validação do novo tipo de conector de cisalhamento T-perfobond inclinado proposto na presente tese. A Tabela 1 apresenta uma síntese dos trabalhos experimentais usados para efeitos de comparação.

Tabela 1 – Resumo de ensaios push-out da literatura

Autor	Tipo de conector	Nº de modelos	Principais conclusões
Vianna (2009)	Perfobond T- Perfobond	11 13	- Comportamento de bloco - Aumento da capacidade resistente do T-Perfobond - Importância da espessura da mesa dos conectores tipo T-Perfobond.
Cândido et al (2010)	Perfobond	8	- Influencia da quantidade de furos para o Perfobond
Costa Neves (2013)	Perfobond T-Perfobond	2 6	- Alteração da posição do T-Perfobond e o comportamento do mesmo
Pessoa (2015)	T-Perfobond	8	Apresentação do momento plástico da mesa do T-Perfobond.
Duarte (2015)	Perfobond	4	Influência da inclinação dos conectores tipo Perfobond.

A seguir, apresenta-se de forma detalhada, os programas experimentais citados na tabela anterior.

2.1. Vianna (2009)

Vianna (2009) realizou uma série de ensaios tipo *push-out* com conectores de cisalhamento tipo Perfobond e T-Perfobond. Os trabalhos realizados foram divididos em 5 etapas, conforme apresentado na Figura 22.

Ao verificar o trabalho de Leite (2006), no qual foi efetuada uma comparação dos custos entre conectores tipo pino e Perfobond, Vianna (2009) indica dois conectores Perfobond mais viáveis, do ponto de vista econômico, o tipo 6 e o tipo 8, ilustrados na Figura 23.

Os fatores que contribuíram para o menor custo final foram, segundo Leite (2006) apud Vianna (2009):

- O custo da chapa de aço, apesar de ter sido uma das opções que necessitava de maior número de conectores e solda;
- A quantidade de aço utilizada por conector foi inferior que a maioria dos outros tipos;
- Um diâmetro menor e um número menor de furos no conector.

Aliando estes fatores aos parâmetros construtivos definidos por Oguejiofor & Hosain (1994) que aconselham que a distância entre furos seja de no mínimo, 2,25d, a geometria dos conectores a serem adotados por Vianna estavam então, basicamente definidos. Com relação a definição das alturas dos conectores, foram utilizadas as dimensões usuais das lajes maciças, 120mm para lajes de até 4m de vãos e 200mm para lajes de até 7m de vão. Assim os conectores utilizados por Vianna apresentaram as dimensões conforme mostrado nas Figura 22 a Figura 24.

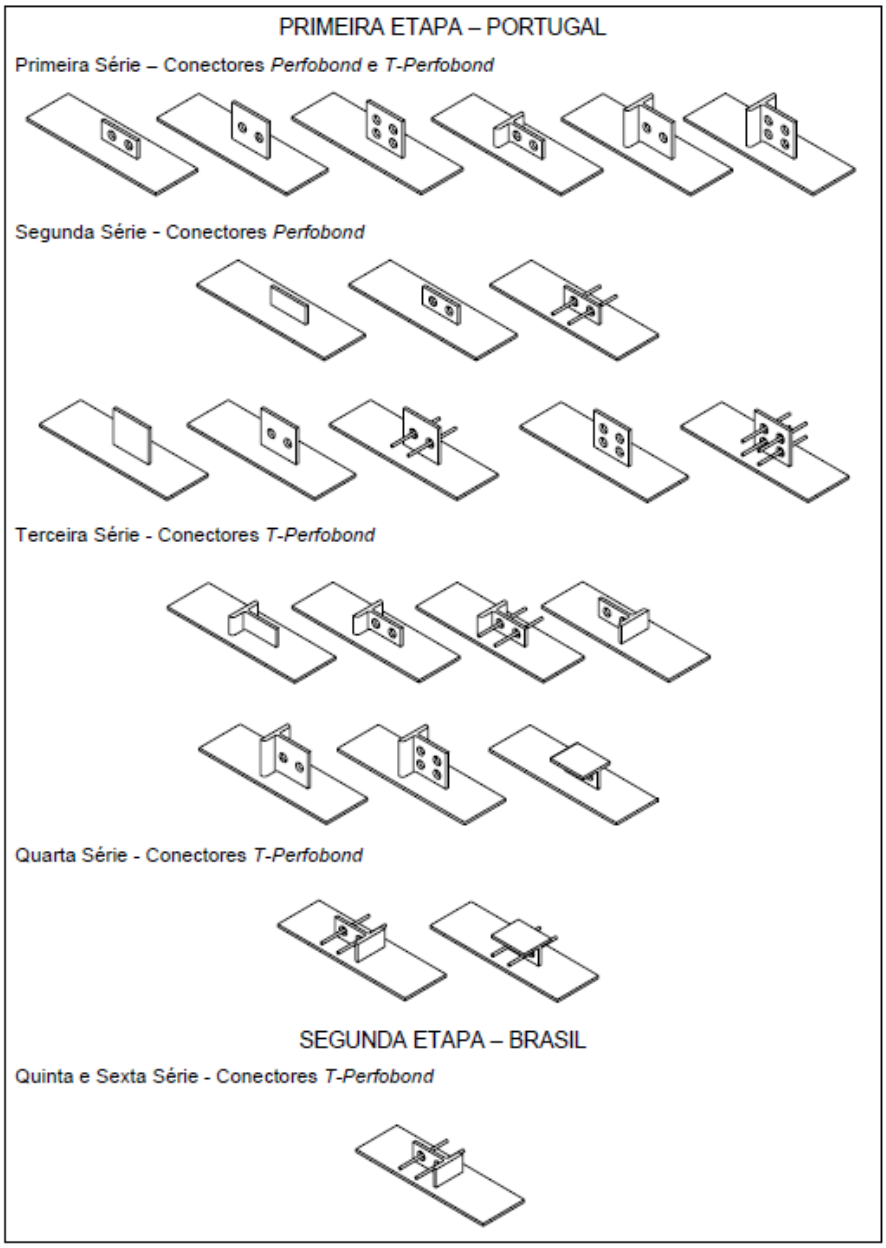


Figura 22 – Etapas dos ensaios *push-out* realizados por Vianna (2009)

Figura 23 – Geometria dos conectores Leite (2006) apud Vianna (2009).

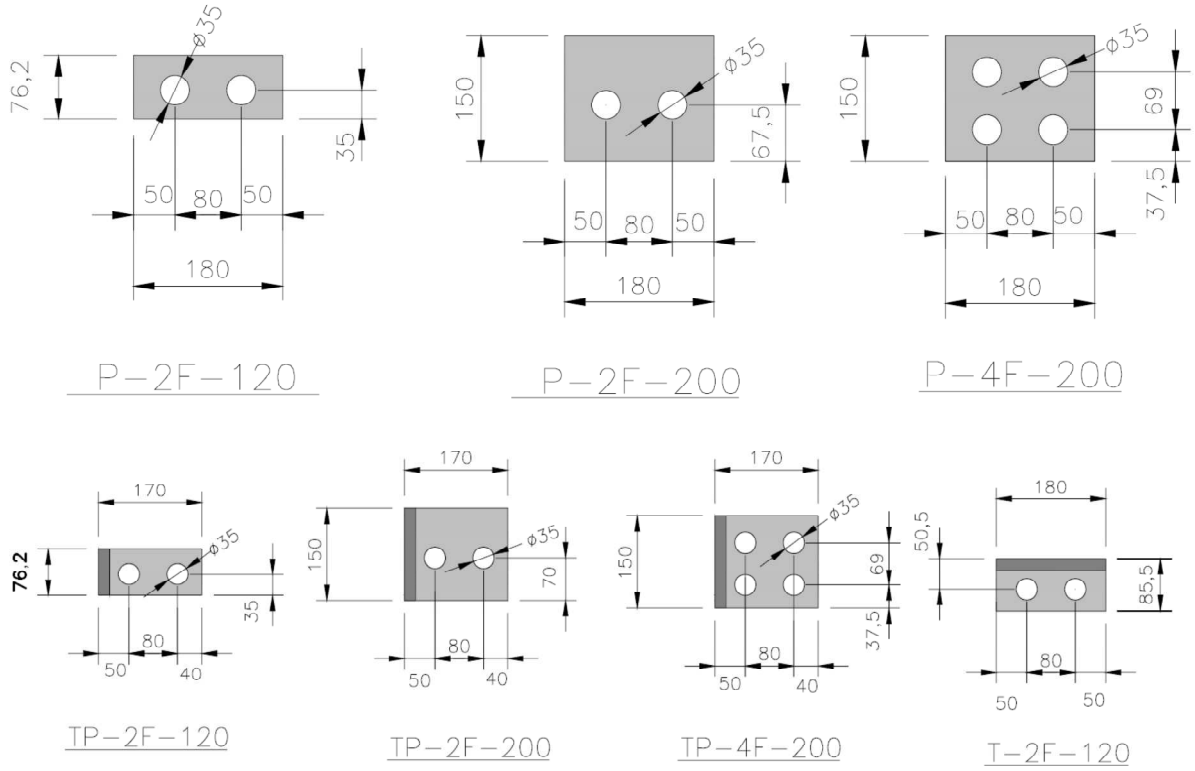


Figura 24 – Dimensões dos conectores utilizados por Vianna (2009)

A configuração para o ensaio push-out utilizada por Vianna (2009) está apresentada nas Figura 25 a Figura 27, respectivamente.

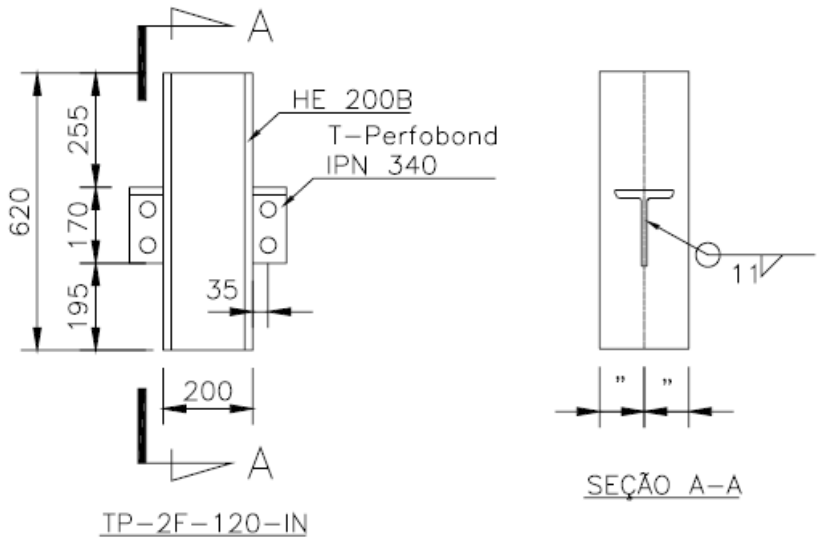


Figura 25 – Configuração do perfil com conector T-Perfobond (Vianna, 2009)

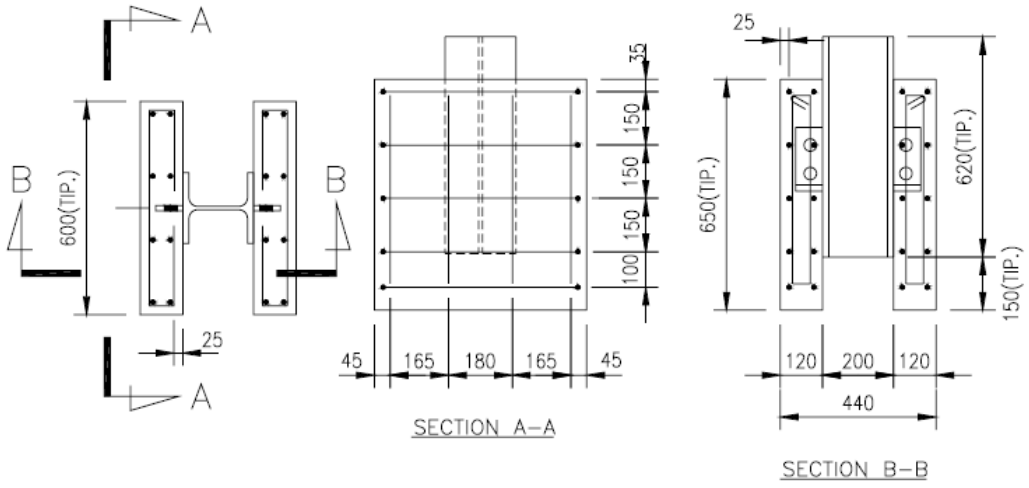


Figura 26 – Configuração detalha do protótipo TP-2F-120 (Vianna, 2009)

Os perfis em aço utilizados eram caracterizados com grau S275, mesmo aço usado nos conectores T-Perfobond. Já nos conectores Perfobond foi usado aço S355, para as armaduras aço S500 e para o concreto, a especificação da classe C25/30. As medições, durante o ensaio, foram realizadas com o auxílio de LVDTs e extensômetros conforme ilustrado na Figura 27 e na Figura 28, respectivamente. Cabe ressaltar que o carregamento foi aplicado conforme o protocolo recomendado pelo EUROCODE 4 (2005) já apresentado anteriormente na Figura 21.

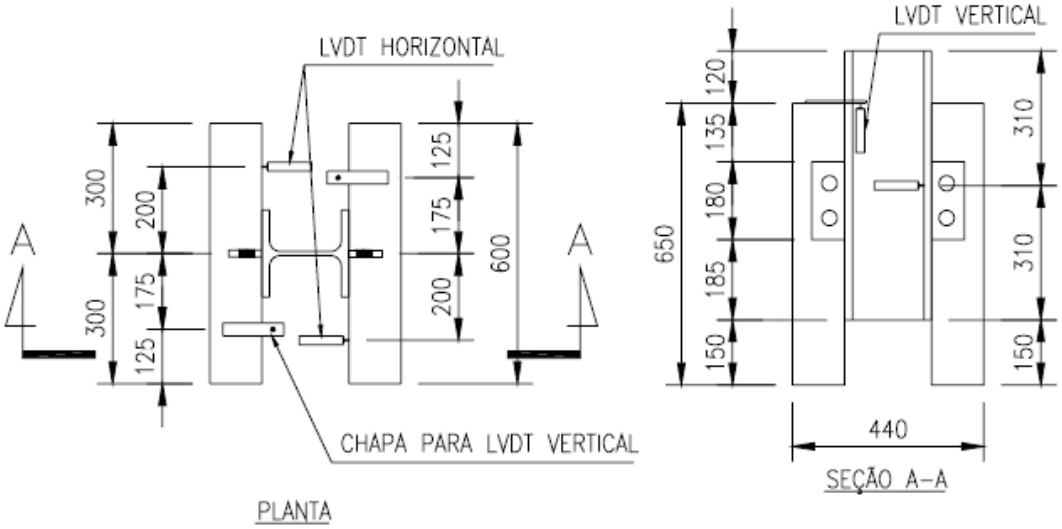


Figura 27 – Posicionamento dos LVDTs (Vianna, 2009)

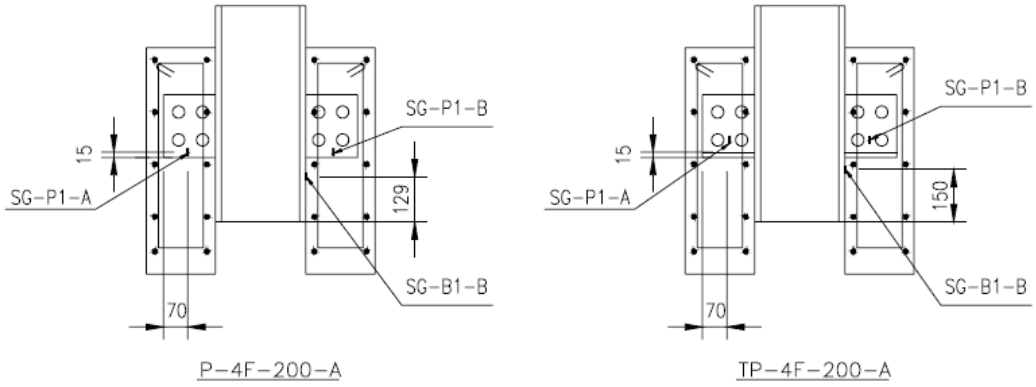
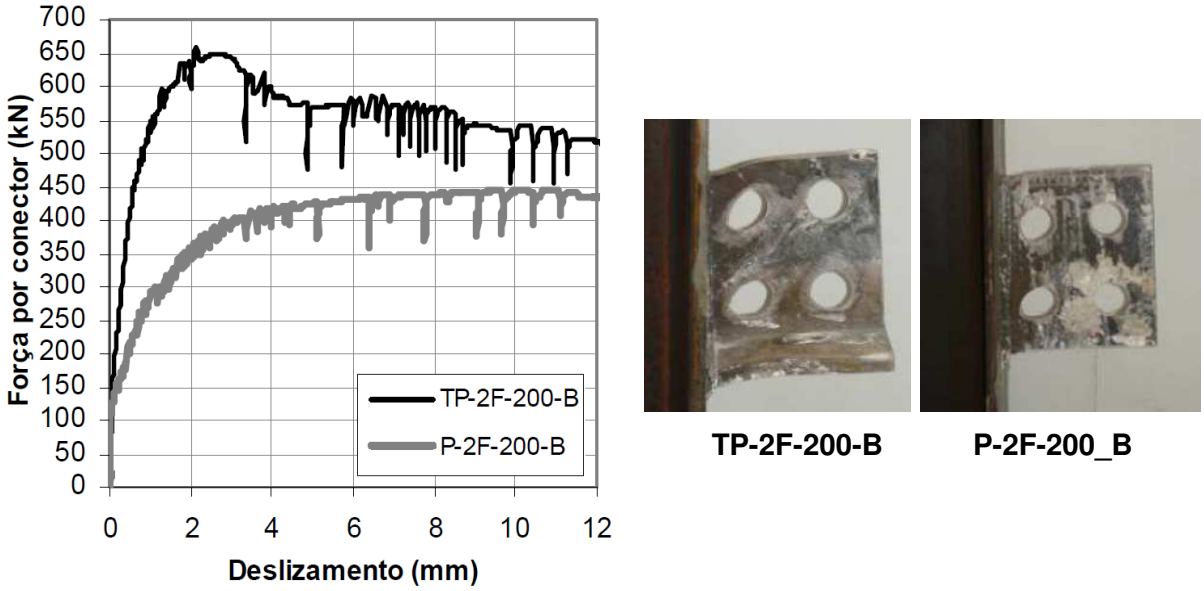


Figura 28 – Disposição dos extensômetros (Vianna, 2009)

Ao analisar os resultados, Vianna (2009) conclui que os conectores T-perfobond obtiveram resistências maiores que os conectores Perfobond. Contudo, o deslizamento de 6 mm, exigido pelo Eurocode 4 (2005), não foi atingido nos conectores T-perfobond, apenas nos conectores Perfobond. O colapso foi caracterizado pela plastificação do conector, o que pode ser visualizado na Figura 29.



a) curvas carga *versus* deslizamento

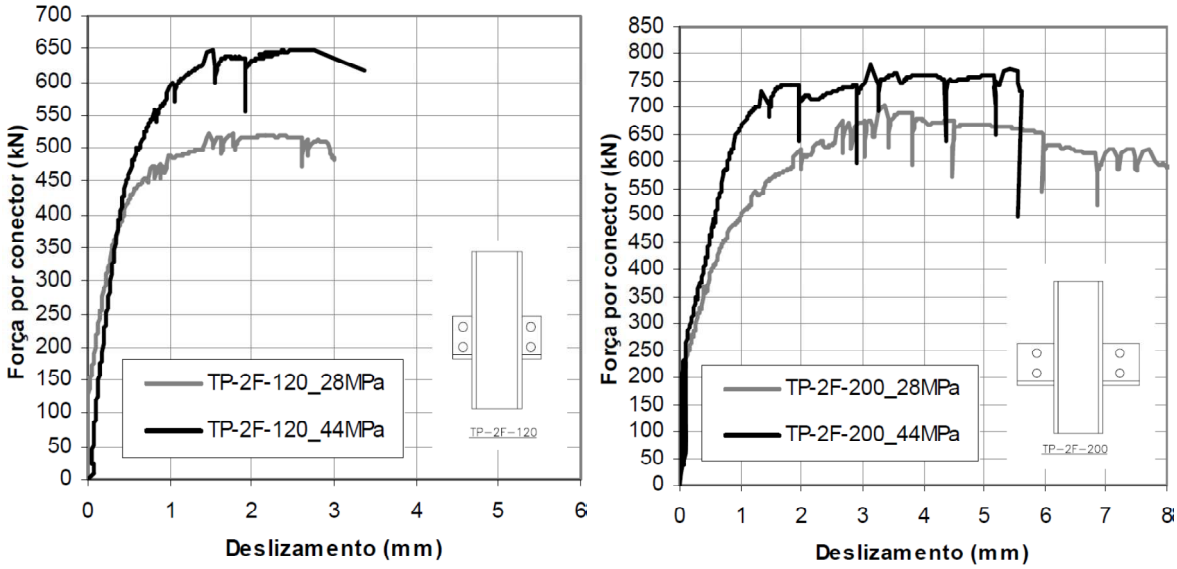
b) deformadas

Figura 29 – Comparativo do Perfobond e T-Perfobond com 4 furos laje de 200mm (Vianna, 2009)

Diante dos diversos fatores que influenciaram o resultado, Vianna(2009) realizou algumas análises as quais são descritas a seguir. Ao determinar a influência da resistência do concreto, Vianna(2009) comparou os resultados da primeira e da segunda série para os conectores Perfobond conforme apresentado na Tabela 2 . Já para a terceira e quarta séries, a comparação fez-se significante para os conectores T-Perfobond, Figura 30.

Tabela 2 – Comparação da resistência do concreto nos conectores perfobond (Vianna, 2009)

Protótipo	f_{ck} (MPa)	$q_{u,test}$ (kN)	P_{rk} (kN)	δ_u (mm)	δ_{uk} (mm)
P_2F_120_B	28	324,10	291,69	11,22	10,10
P_2F_200_B		444,03	399,62	22,00	19,80
P_4F_200_A		431,85	388,67	22,88	20,59
P_2F_120_A	52	344,85	310,37	6,57	5,91
P_2F_200_A		503,43	453,09	35,00	31,50
P_4F_200_A		458,93	413,04	35,00	31,50



a) laje de 120mm b) laje de 200mm

Figura 30 – Influência da resistência do concreto nos ensaios de conectores T-Perfobond (Vianna, 2009)

Apesar do concreto possuir um aumento de 86% de sua resistência característica à compressão, o aumento na resistência da ligação foi de apenas 6% com algum aumento no deslizamento para os Perfobond, Vianna (2009).

No caso dos conectores T-Perfobond, conforme apresentado na Figura 30, o aumento de 57% de sua resistência característica à compressão proporcionou um ganho de 14% de resistência nas lajes de 120 mm e 10% nas lajes de 200 mm, com um ganho na ductilidade da ordem de 6% (Vianna, 2009).

Vianna (2009) comparou os resultados dos Perfobond com os T-Perfobond, e para tanto, propôs a normalização da resistência característica do concreto face a variação dos valores encontrados, fato que, conforme visto acima, influi significativamente nas resistências finais dos conectores. A formulação proposta por Vianna (2009) está apresentada na equação (15) e o $f_{ckmedio}$ calculado por Vianna (2009) entre a segunda e a terceira séries foi de 47,9 MPa.

$$P_{rkNormaliz} = P_{rk} \cdot \sqrt{\frac{f_{ckmedio}}{f_{ck}}} \tag{15}$$

onde

$P_{rkNormaliz}$ – resistência característica ao cisalhamento normalizada do conector (kN);

$f_{ckmedio}$ – valor médio da resistência característica do concreto à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa);

f_{ck} – resistência característica do concreto à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa);

Ao comparar os conectores Perfobond e T-Perfobond sem furos e com dois furos, a resistência teve um acréscimo de 112% e 104%, respectivamente. No caso das lajes de 200mm para dois furos e quatro furos, o ganho foi de 69% e 78% respectivamente. A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios comparados e as respectivas resistências normalizadas.

Tabela 3 – Comparação da resistência do concreto nos conectores perfobond (Vianna, 2009)

Protótipo	f_{ck} (MPa)	$q_{u,test}$ (kN)	P_{rk} (kN)	$P_{rk\ norm}$ (kN)	δ_u (mm)	δ_{uk} (mm)
P-SF-120-B	51,9	319,28	287,35	276,06	11,00	9,90
P-2F-120-A		344,85	310,37	298,17	6,57	5,91
P-2F-AR-120-A		443,03	398,73	383,05	7,67	6,90
P-2F-200-A		403,43	453,09	435,28	35,00	31,50
P-4F-200-A		458,93	413,04	396,80	35,00	31,50
TP-SF-120-A	43,9	621,95	559,76	584,70	1,70	1,53
TP-2F-120-B		647,90	583,11	609,10	3,40	3,06
TP-2F-AR-120-A		683,38	615,04	642,45	2,76	2,48
TP-2F-200-A		780,35	702,32	733,61	5,18	4,66
TP-4F-200-A		750,28	675,25	705,34	5,38	4,84

A presença de armadura nos furos também foi destacada por Vianna (2009). No caso do conector T-perfobond houve um ganho de 17% e 13% ao se utilizar armaduras de 10 mm e 12 mm, respectivamente. Já para o conector T-Perfobond invertido foi observado um ganho de 5% com uma armadura de 12 mm e uma perda de 6% com a armaduras de 10 mm, Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação da influência das armaduras, Vianna(2009)

Protótipo	f_{ck} (MPa)	$q_{u,test}$ (kN)	P_{rk} (kN)	$P_{rk\ norm}$ (kN)	δ_u (mm)	δ_{uk} (mm)
TP-2F-120-IN-B	43,9	714,68	643,21	601,96	4,20	3,78
T-2F-120-B		596,43	536,78	502,36	11,63	10,47
TP-2F-AR-120-A-IN-10	33	585,30	526,77	568,61	2,54	2,29
TP-2F-AR-120-B-IN-12		649,10	584,19	630,59	4,19	3,77
T-2F-AR-120-A-10		606,28	545,65	588,98	20,00	18,00
T-2F-AR-120-B-12		585,13	526,61	568,44	14,00	12,60

Cabe ressaltar que a variação da espessura da alma não foi realizada em virtude dos trabalhos já realizados nesta área, dos quais Vianna (2009) destaca o realizado por Ushijima *et al.* (2001). Neste trabalho, concluiu-se que chapas com 8

mm de espessura ou menor apresentam uma concentração de tensão no concreto gerando portanto, uma fratura frágil e localizada, conforme pode ser observado na Figura 31.

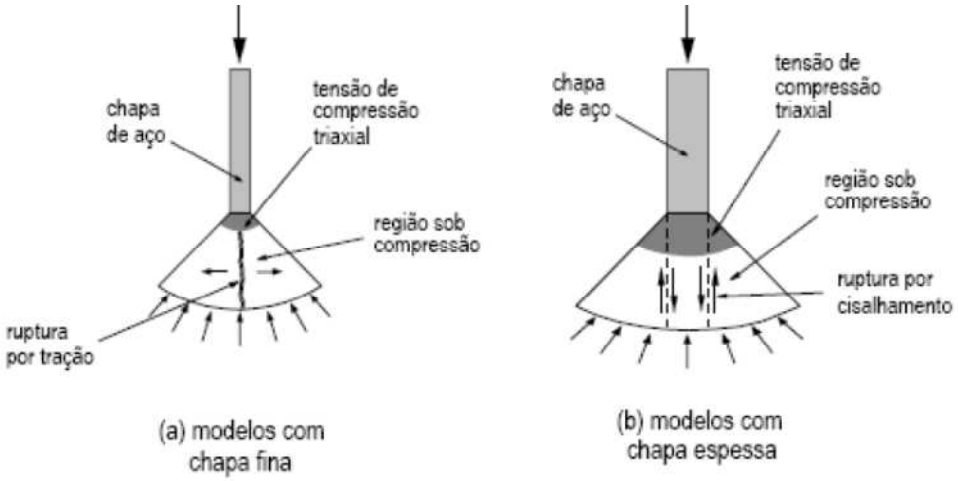


Figura 31 – Condições de ruptura do concreto em função da espessura (Veríssimo, 2007 apud Vianna, 2009)

Tal relato confirma a proposta do dimensionamento das estruturas de concreto armado onde o aço comporta-se a tração e o concreto a compressão. Desta forma, pode-se concluir que a armadura transversal tem fundamental importância para o comportamento dúctil do conjunto, devendo ser dimensionada conforme os parâmetros usados no dimensionamento de estruturas de concreto armado.

Ao se analisar o colapso da ligação, o mesmo pode ocorrer de duas formas, pelo elemento de concreto ou pelo conector, sendo ideal que ambos os elementos, concreto e conector, cheguem à ruína com aproximadamente a mesma carga, visando assim, a ótima utilização dos dois materiais. Destaca-se também o desejo por um comportamento dúctil do sistema que sofre influência de diversos parâmetros conforme descrito acima.

Vianna (2009) destaca, segundo os trabalhos de Oguejiofor & Housain (1994) e Medberry & Shahrooz (2002), que a borda do concreto carregada pelo conector tende a separar a laje em duas, devido a tensão de tração desenvolvida, vide Figura 32. A armadura transversal ao conector tem papel fundamental para combater a fissuração do concreto.

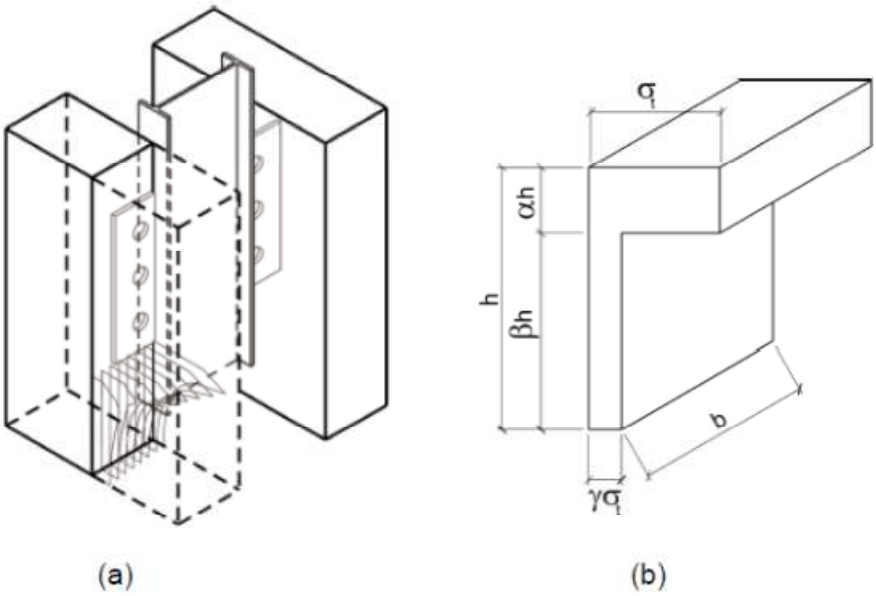


Figura 32 – (a) Distribuição da tensão de tração abaixo do conector; (b) bloco de tensão idealizado (Medberry & Shahrooz, 2002 apud Vianna, 2009)

Ao realizar os ensaios, Vianna (2009) destaca a evolução gradativa das fissuras no concreto, sendo isto um sinal do comportamento da armadura transversal, e a existência e influência dos pinos de concreto, os quais segundo Kraus & Wurzer (1997), dividem a área onde a força distribuiu-se no pino de concreto em duas partes principais, chamadas zona A e zona B - Figura 33.

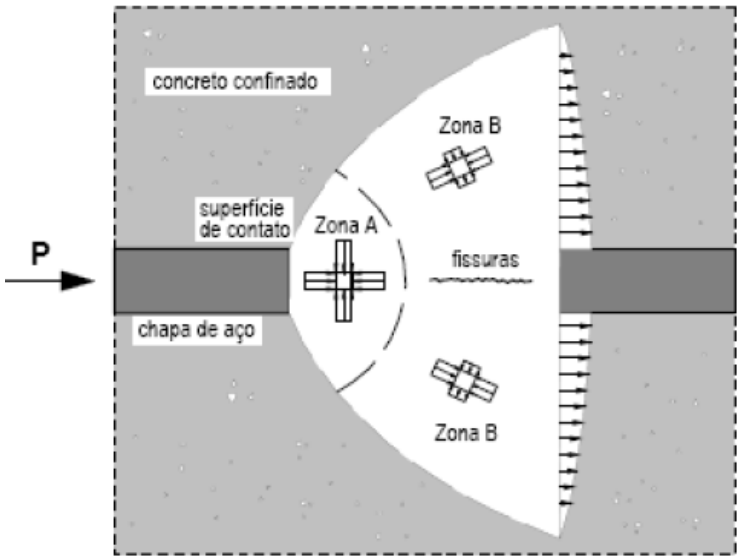


Figura 33 –Carregamento em um pino de concreto (Kraus & Wurzer (1997) apud Vianna, 2009)

De acordo com Kraus e Wurzer (1997) *apud* Vianna (2009), na zona A o concreto é confinado, ficando submetido à compressão triaxial. Nesta região, a

capacidade do concreto de suportar esforços e deformações depende principalmente da estrutura porosa da argamassa de cimento. Acima da carga crítica, o concreto sofre poro-colapso, na medida em que ocorre o esmagamento das paredes dos poros na pasta de cimento, decorrente da compressão triaxial, formando uma massa compacta. Na zona B atuam tensões de compressão na direção longitudinal e tensões de tração na direção transversal, responsáveis pela formação de fissuras no concreto, paralelas à força de cisalhamento.

Diante dos resultados obtidos e as conclusões apresentadas, Vianna (2009) realizou ainda dois experimentos para verificar a influência do diâmetro das armaduras de acordo com a Figura 34. A armadura utilizada apresentou influência no resultado final para a carga de ruptura contudo, não foi observada alteração na ductilidade conforme pode ser observado na Figura 35. Os valores da carga última, da carga característica, da carga característica normalizada (com um $f_{ckmedio}$ de 30,17MPa) e do deslizamento são apresentados na Tabela 5.

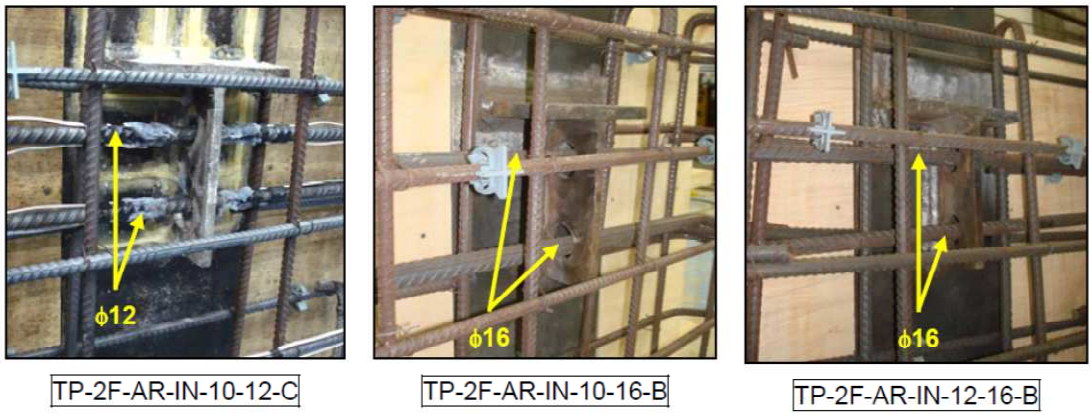


Figura 34 – Influência do diâmetro das armaduras - conectores T-Perfobond (Vianna, 2009).

Vianna (2009) destaca ainda que a influência das armaduras dos estribos é maior que a armadura dos furos tanto para a ductilidade do sistema quanto para a carga de ruptura. Foi observado que um aumento da taxa de armadura no furo resulta em uma perda da ductilidade do sistema e um pequeno ganha de carga.

Ao se comparar as primeiras séries com os resultados da quinta e sexta série de Vianna (2009), destaca-se que o perfil com espessuras iguais, HP 200x53, apresenta maior ductilidade, vide Figura 36.

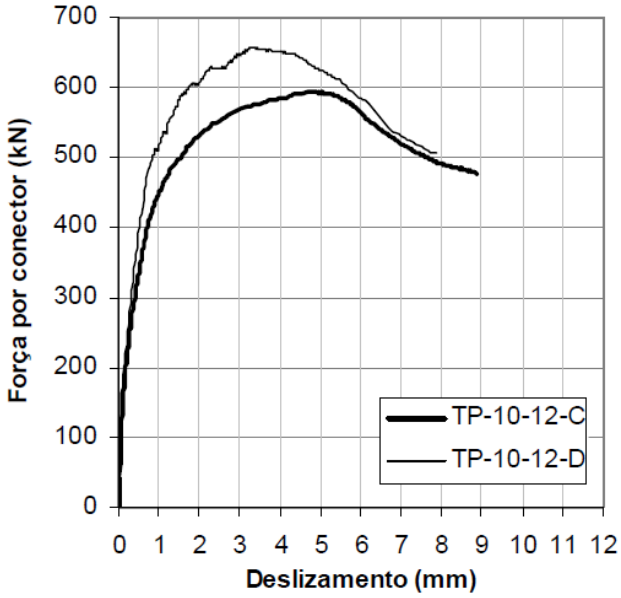


Figura 35 – Conectores T-Perfobond - sexta série (Vianna, 2009).

Tabela 5 – Resultados quinta e sexta série, Vianna(2009)

Protótipo	$q_{u,test}$ (kN)	P_{rk} (kN)	$q_{u,test\ norm}$ (kN)	$P_{rk\ norm}$ (kN)	δ_u (mm)	δ_{uk} (mm)
TP-2F-AR-IN-10-12-C	594,62	535,16	549,68	494,71	6,75	6,08
TP-2F-AR-IN-10-16-B	541,97	487,77	551,10	495,99	5,15	4,64
TP-2F-AR-IN-12-16-B	585,86	527,27	630,78	567,70	6,03	5,43

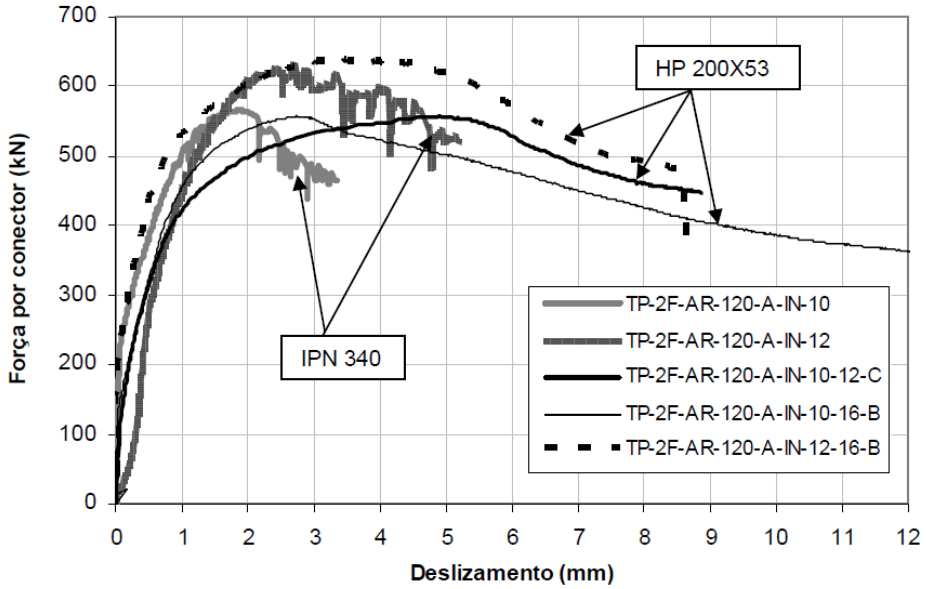


Figura 36 – Resultados, Vianna (2009).

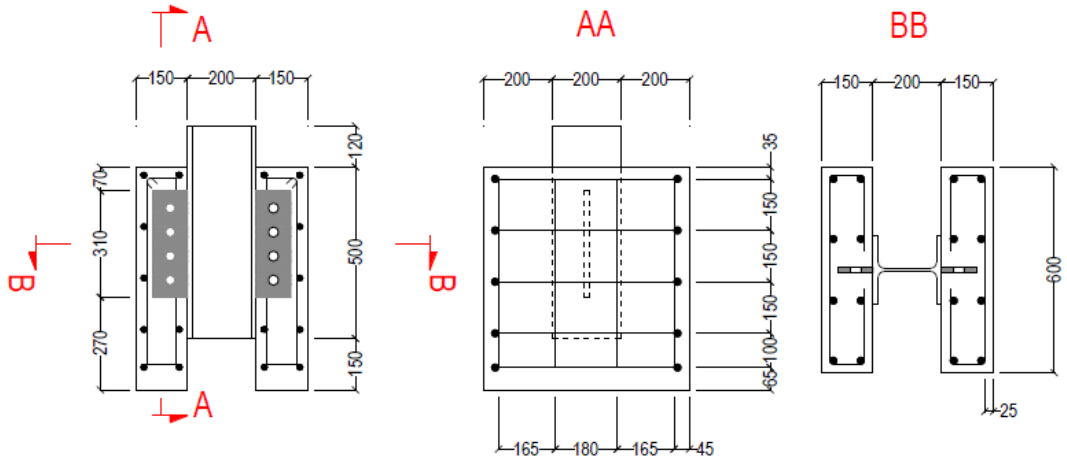
Os trabalhos realizados por Vianna (2009) percorrem uma vasta gama de variáveis para o desenvolvimento adequado de um conector de cisalhamento. Utilizando a variação de geometria do conector (perfobond, T-perfobond, perfil T e T-perfobond.), espessura (perfil IPN e HP) e a resistência do concreto.

2.2. Cândido - Martins et al. (2010)

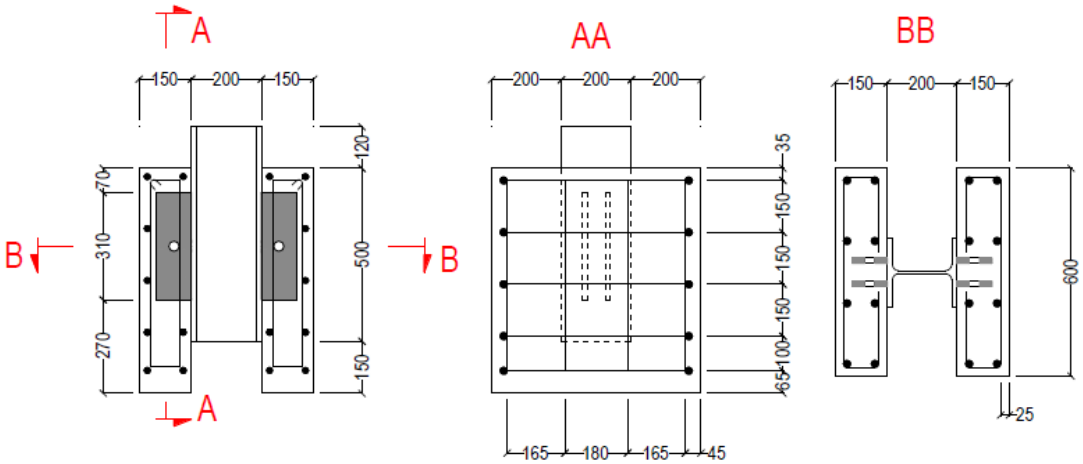
Cândido-Martins et al. (2010) realizou uma série de ensaios *push-out* com conectores perfobond. Tais conectores foram originados de chapas de aço S355 e o perfil foi um HEA 200 aço S275. As armaduras das lajes foram executadas com barras de 10mm com aço S500 e o concreto utilizado apresentou resistência a compressão de 31MPa. A Tabela 6 apresenta as dimensões e demais informações pertinentes ao ensaios realizados onde t_c é a espessura da laje (mm), h_c é a largura da laje (mm), l é o comprimento do conector (mm), h é a altura do conector (mm), t é a espessura do conector (mm), AR é o diâmetro da barra de reforço nos furos do conector, D é o diâmetro do conector (mm) e n é o número de furos no conector. A Figura 37 ilustra os ensaios push-out realizados.

Tabela 6 – Características geométricas do ensaio push-out (Cândido-Martins et al. ,2010)

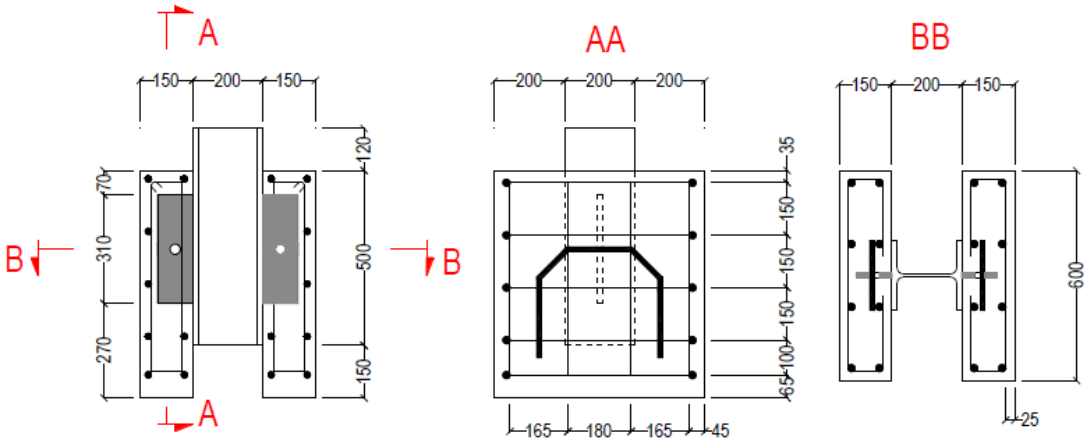
teste	nomenclatura	laje de concreto				conector			
		t_c (mm)	h_c (mm)	l (mm)	h (mm)	AR (mm)	D (mm)	t (mm)	n
1	P0F	150	600	310	100		30	15	0
2	P1F								1
3	P2F								2
4	P3F								3
5	P4F								4
6	P1F AR12					12			1
7	P1F AR20					20			1
8	2P1F								1



a) Configuração e um conector (ex. P4F)



b) Configuração com dois conectores (ex. 2P1F)



c) Conector com barra de reforço (P1FAR12/20)

Figura 37 – Ensaios push-out (Cândido-Martins et al. ,2010)

Os conectores utilizados por Cândido-Martins et al. (2010) são apresentados na Figura 38.

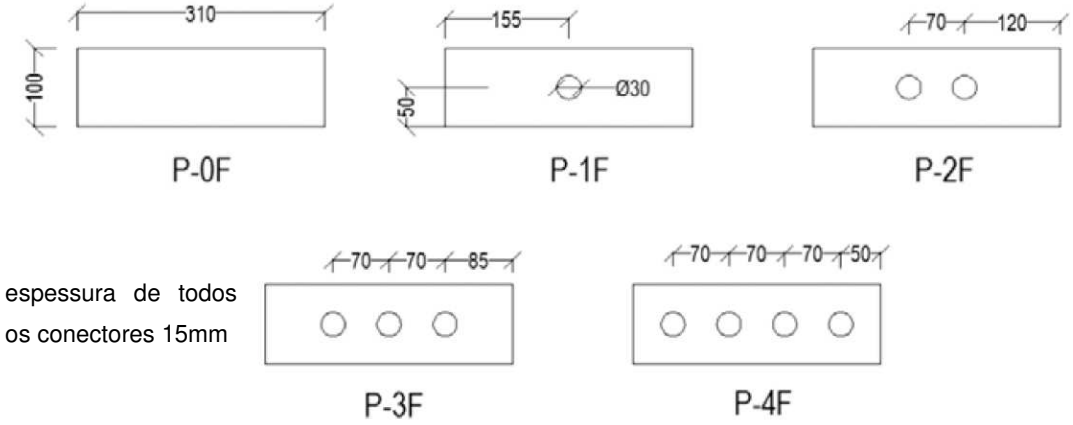


Figura 38 – Conectores utilizados nos ensaios push-out (Cândido-Martins et al. ,2010)

Os resultados obtidos por Cândido-Martins et al. (2010) são apresentados na Tabela 7. Nesta tabela são indicados o P_{test} correspondente a carga máxima obtida no ensaio, o P_{rk} que apresenta a resistência característica, o $P_{rk,norm}$ representa a resistência característica do ensaio após a normalização devido a variação da resistência do concreto, δ_u é o deslocamento máximo apresentado e δ_{uk} que representa o deslocamento característico.

Tabela 7 – Características geométricas dos ensaios push-out (Cândido-Martins et al. ,2010)

Conector	P_{test}	P_{rk}	$P_{rk,norm}$	δ_u	δ_{uk}
	(kN)	(kN)	(kN)	(mm)	(mm)
P0F A	283,51	255,16	252,99	15,34	13,81
P0F B				15,32	13,79
P1F A	309,44	278,49	276,13	9,50	8,55
P1F B				10,15	9,14
P2F A	317,52	285,77	284,30	17,80	16,02
P2F B				17,44	15,70
P3F A	331,35	298,22	296,69	10,76	9,65
P3F B				10,52	9,47
P4F A	354,03	318,63	317,40	10,00	9,00
P4F B				9,44	8,50
P1F-AR 12 A	365,93	329,34	328,07	10,28	9,25
P1F-AR 12 B				10,42	9,38
P1F-AR 20 A	395,68	356,11	355,02	11,44	10,30
P1F-AR 20 B				11,10	9,99
2 P1F A	546,84	492,16	490,65	2,96	2,66
2 P1F B				2,02	1,82

Ressalta-se que o critério de ductilidade foi atendido para a maioria dos conectores, exceto para o ensaio com 2 conectores 2P1F. As curvas carga x deslocamento dos conectores sem a barra de reforço são apresentadas na Figura 39. Nos ensaios realizados por Cândido-Martins et al. (2010) observa-se um ganho de resistência do conector com o aumento do número de furos presentes no mesmo, da ordem de 5%. Contudo, a ductilidade não apresentou ganhos em virtude do aumento número de furos.

A presença da barra de reforço nos ensaios resultou em um ganho de resistência, da ordem de 19% com a barra de 12mm e 29% com a barra de 20mm, e também foram observados ganhos para a ductilidade visto o incremento do deslocamento, da ordem de 5% com a barra de 12mm e de 9% com a barra de 20mm, respectivamente.

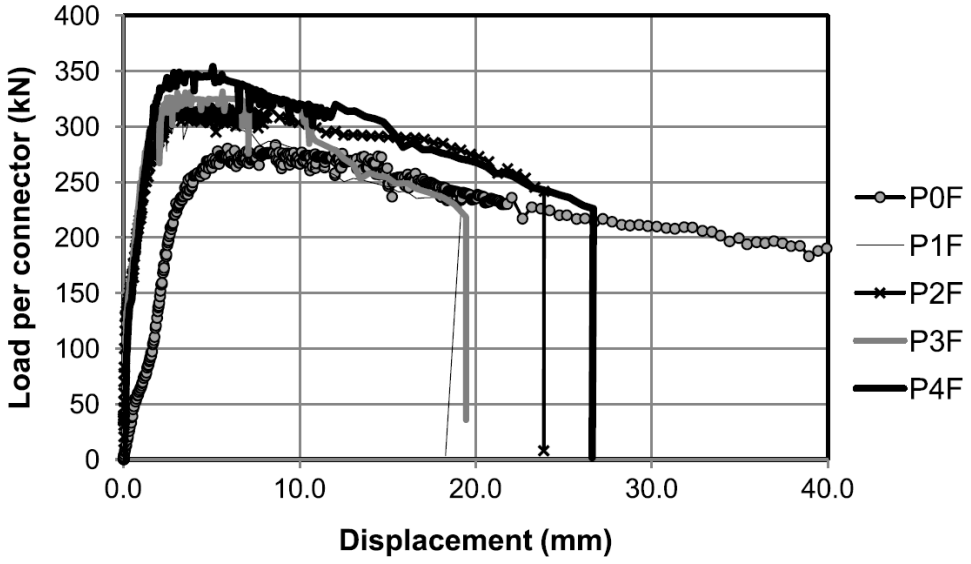


Figura 39 – Carga x Deslocamento, Candido-Martins (2010).

Ao empregar dois conectores de cada lado da laje nos ensaios, o resultado obtido foi significativamente superior para a carga de ruptura contudo, houve o comprometimento da ductilidade visto que não foram atingidos os 6mm de deslocamento mínimo.

O modo de falha encontrado nos ensaios realizados por Cândido-Martins et al. (2010) foi caracterizado pela ruptura do concreto a partir do conector com um espraiamento similar a um ângulo de 45º, conforme pode ser observado na Figura 40.

(a) Face inferior (b) Face superior

Figura 40 – Ruptura da laje de concreto (Cândido-Martins et al. ,2010)

2.3. Costa-Neves et al. (2013)

Na série de ensaios realizados por Costa-Neves et al. (2013) foram utilizados 4 geometrias para o conector, conforme apresentado na Figura 41 e na Figura 42. O concreto utilizado foi o C25/30 com resistência aproximada de 26MPa, sendo encontrado um desvio padrão da ordem 1,04 MPa. A Tabela 8 apresenta as geometrias utilizadas por Costa-Neves et al. (2013).

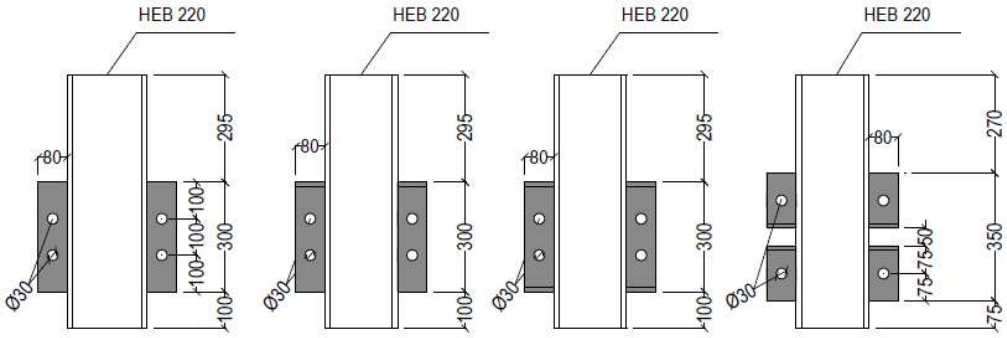


Figura 41 – Geometria dos ensaios (Costa-Neves et al., 2013).

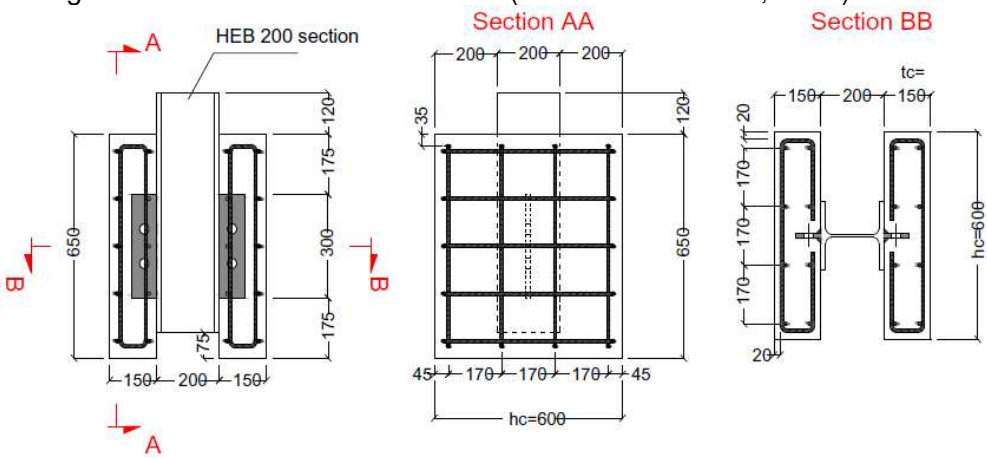
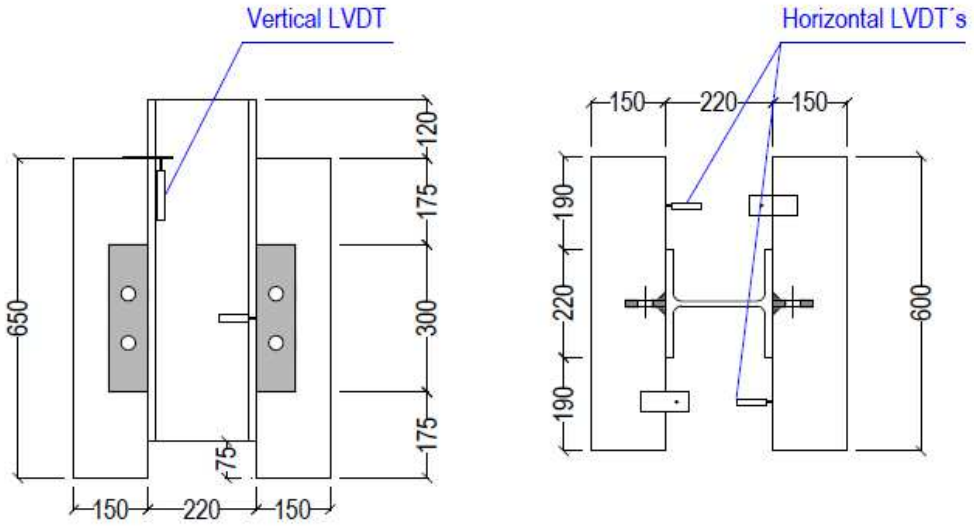


Figura 42 – Geometria dos ensaios (Costa-Neves et al, 2013).

Tabela 8 – Características dos ensaios push-out (Costa-Neves et al., 2013)

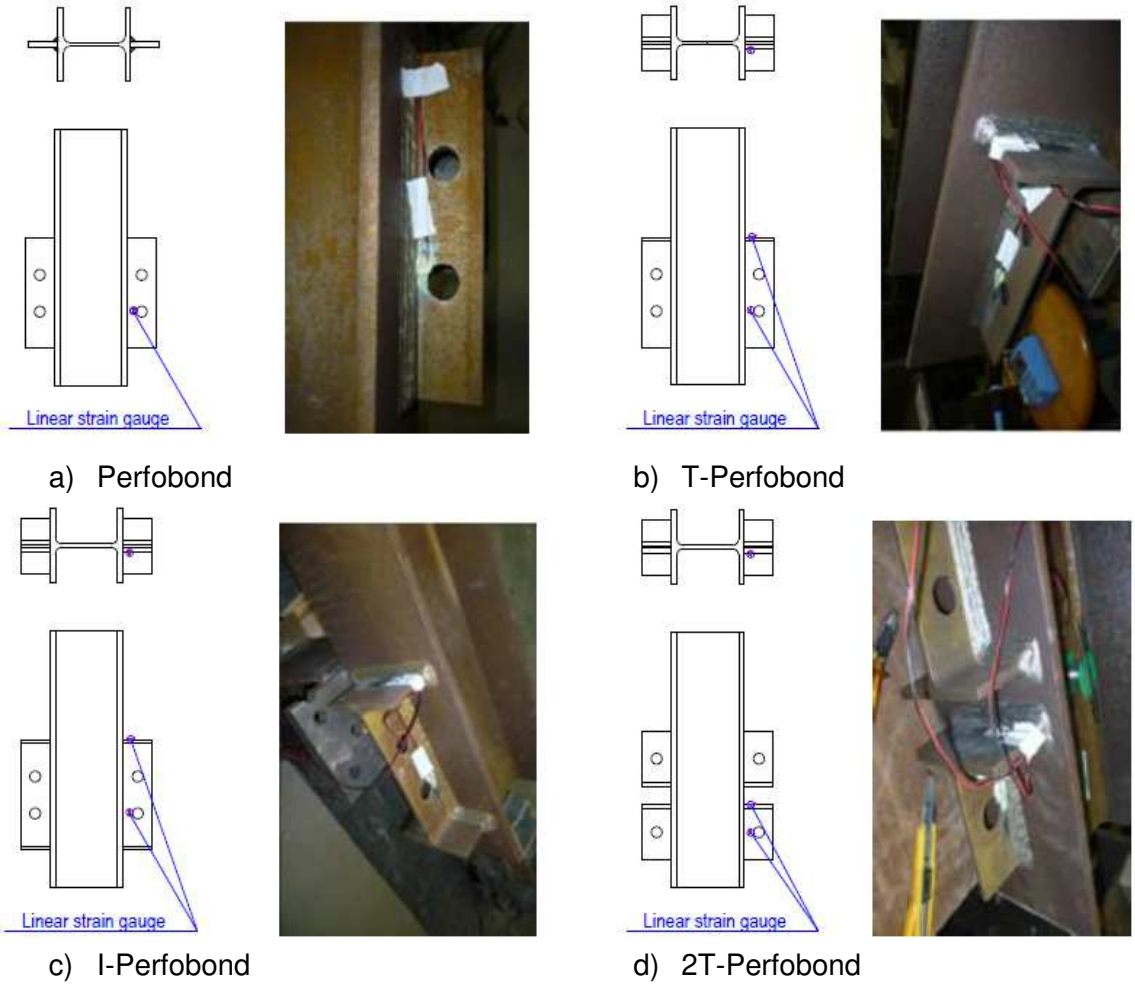
Ensaio			Laje de concreto					Conector	
Teste	Tipo de conector	Nomenclatura	tc (mm)	hc (mm)	Concreto (MPa)	Barra de Aço	D (mm)	Conector	Geometria
1 A/B	Perfobond	P2F	150	600	C 20/25	-	30	80*15*300	
2 A/B		P2F-AR12				2X12			
3 A/B	T-Perfobon	TP2F	150	600	C 20/25	-	30	T	
4 A/B		TP2F-AR12				2X12		"IPE 300"	
5 A/B	I-Perfobond	IP2F	150	600	C 20/25	-	30	IPE 300	
6 A/B		IP2F-AR12				2X12			
7 A/B	2T-Perfobond	2TP2F	150	600	C 20/25	-	30	2x	
8 A/B		2TP2F-AR12				2X12		1/2 IPE300	

As medições durante os ensaios foram realizadas com o auxílio de LVDTs e extensômetros conforme ilustrado na Figura 43 e na Figura 44.



a) Vista lateral b) Vista em plano

Figura 43 – Posicionamento dos LVDTs (Costa-Neves et al., 2013).



a) Perfobond b) T-Perfobond

c) I-Perfobond d) 2T-Perfobond

Figura 44 – Posicionamento dos extensômetros (Costa-Neves et al., 2013)

Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 9 sendo P_{test} correspondente a carga máxima obtida no ensaio, o P_{rk} que apresenta a resistência característica, δ_u é o deslocamento máximo apresentado e δ_{uk} que representa o deslocamento característico.

Ao analisar o comportamento dos ensaios realizados com os conectores Perfobond por Costa-Neves et al. (2013) pode-se notar um aumento significativo na resistência e na ductilidade do sistema com a barra de reforço passando pelos furos. Outro ponto a se destacar foi o comportamento desigual encontrado nos ensaios P2FA e P2FB. Tal fenômeno teve sua justificativa em uma possível torção no ensaio, a qual pode ser percebida na fase de descarregamento. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 45.

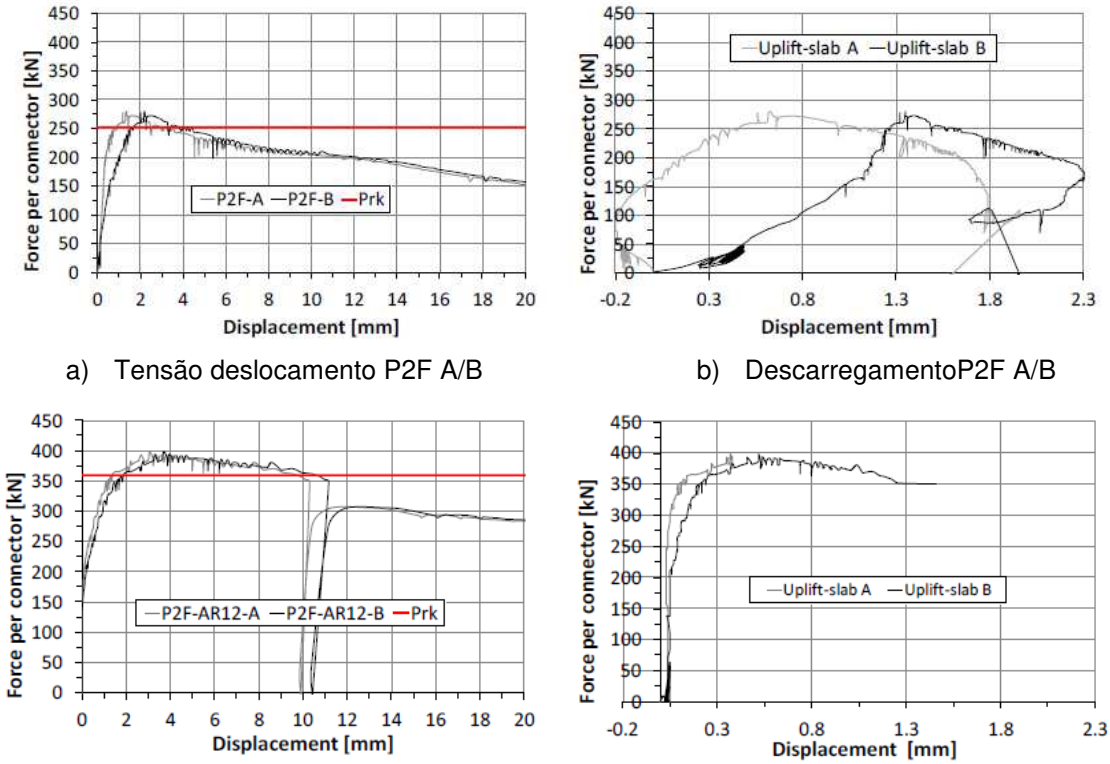
.

Tabela 9 – Resultados obtidos (Costa-Neves et al., 2013)

Teste	Nomenclatura	P_{test} (kN)	P_{rk} (kN)	δ_u (mm)	δ_{uk} (mm)
1A	P2F A	280,05	252,05	2,95	2,66
1B	P2F B			3,83	3,45
2A	P2F-AR12 A	398,86	358,97	9,70	8,73
2B	P2F-AR12 B			10,59	9,53
3A	TP2F A	545,90	491,31	6,52	5,86
3B	TP2F B			2,48	2,23
4A	TP2F-AR12 A	596,82	537,14	4,72	4,25
4B	TP2F-AR12 B			3,98	3,58
5A	IP2F A	769,60	692,64	4,29	3,86
5B	IP2F B			2,15	1,94
6A	IP2F-AR 12 A	763,20	686,88	5,42	4,88
6B	IP2F-AR 12 B			1,48	1,33
7A	2TP2F A	789,65	710,69	2,52	2,27
7B	2TP2F B			2,81	2,53
8A	2 TP2F-AR12 A	819,00	737,10	2,80	2,52
8B	2 TP2F-AR12 B			4,20	3,78

Ao analisar os ensaios realizados com o conector T-Perfobond por Costa Neves et al. (2013), pode-se notar um ganho pouco significativo ao se acrescentar uma barra de reforço passante nos furos do conector, o que demonstra a importância da mesa do conector frente ao seu comportamento. Antes do descarregamento foi visualizado que o conector TP2F B já havia atingido a ruína, fato que pode ser visto na Figura 46 a qual apresenta os resultados obtidos por Costa-Neves et al. (2013) com os ensaios T-Perfobond.

Diante dos resultados obtidos por Costa-Neves et al. (2013) para o ensaio realizado com o conector I-Perfobond, cabe destacar a presença de um platô semelhante a um patamar de escoamento, conforme pode ser visto na Figura 47 e a ausência de ductilidade do sistema. A ausência de ductilidade pode ser justificada devido a existência de duas mesas o que pode incorrer no deslocamento do bloco de concreto.



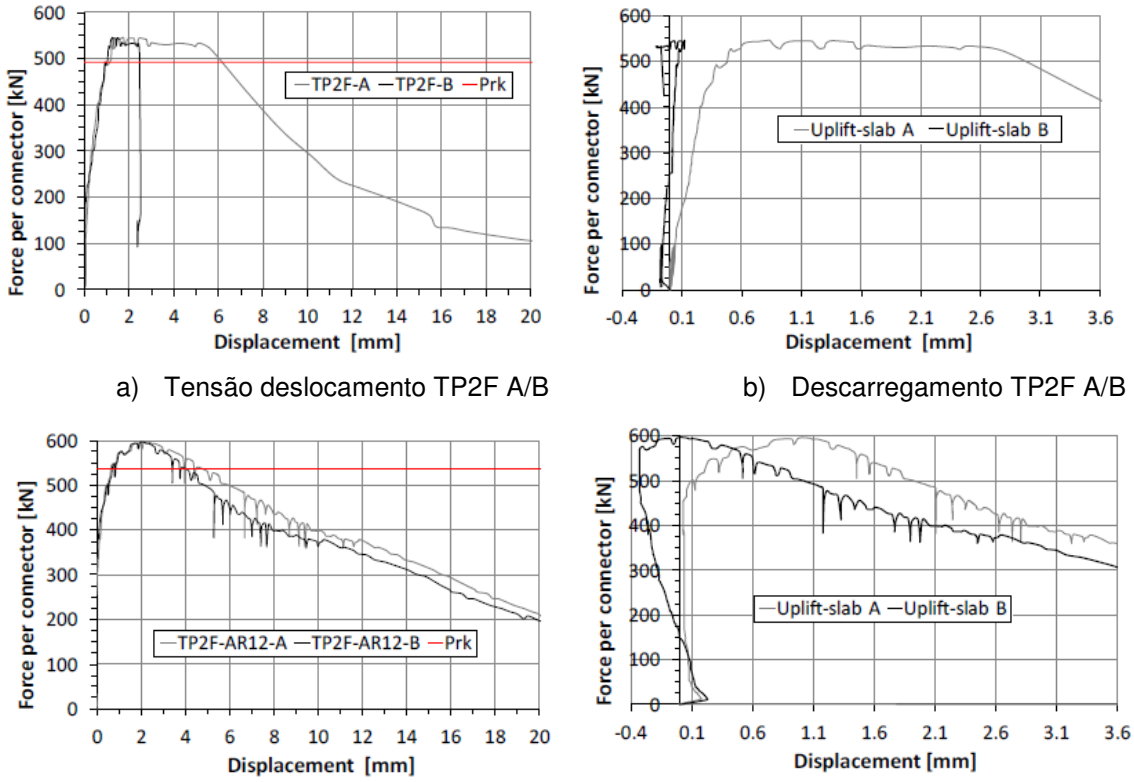
a) Tensão deslocamento P2F A/B

b) DescarregamentoP2F A/B

c) Tensão deslocamento P2F-AR12 A/B

d) Descarregamento P2F-AR12 A/B

Figura 45 – Resultados Perfobond (Costa-Neves et al., 2013)



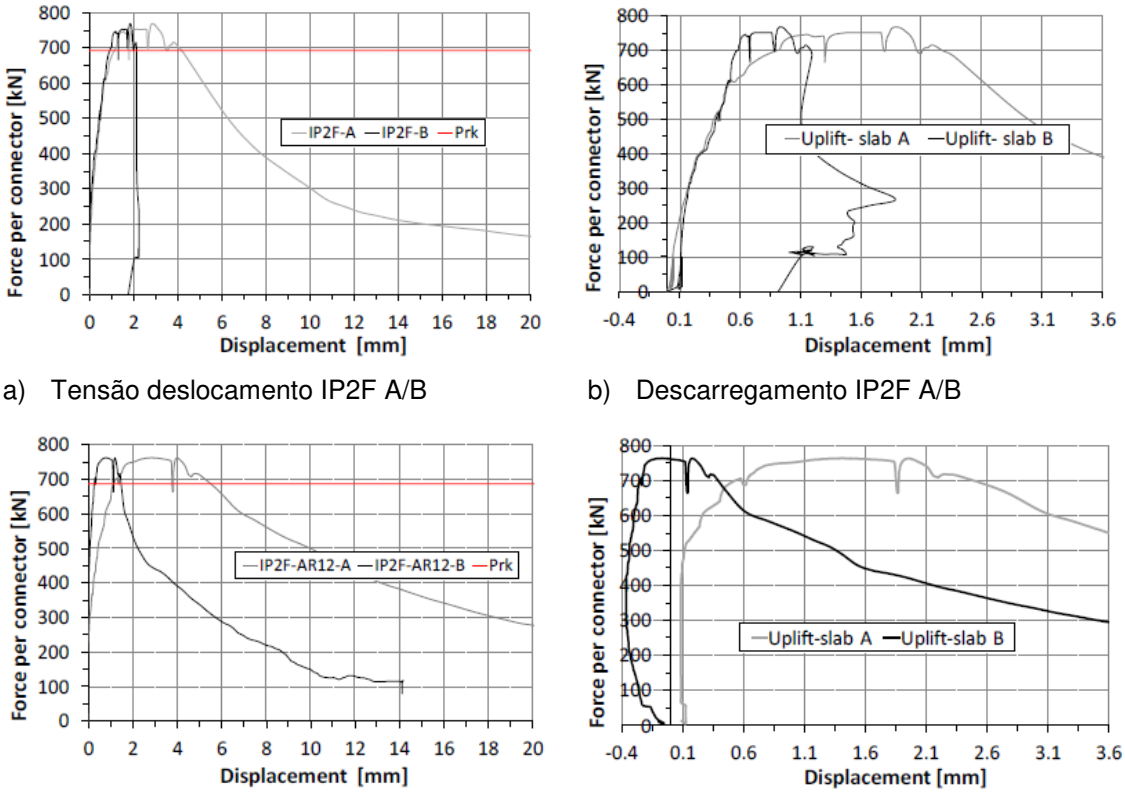
a) Tensão deslocamento TP2F A/B

b) Descarregamento TP2F A/B

c) Tensão deslocamento TP2F-AR12 A/B

d) Descarregamento TP2F-AR12 A/B

Figura 46 – Resultados T-Perfobond (Costa-Neves et al., 2013)



a) Tensão deslocamento IP2F A/B

b) Descarregamento IP2F A/B

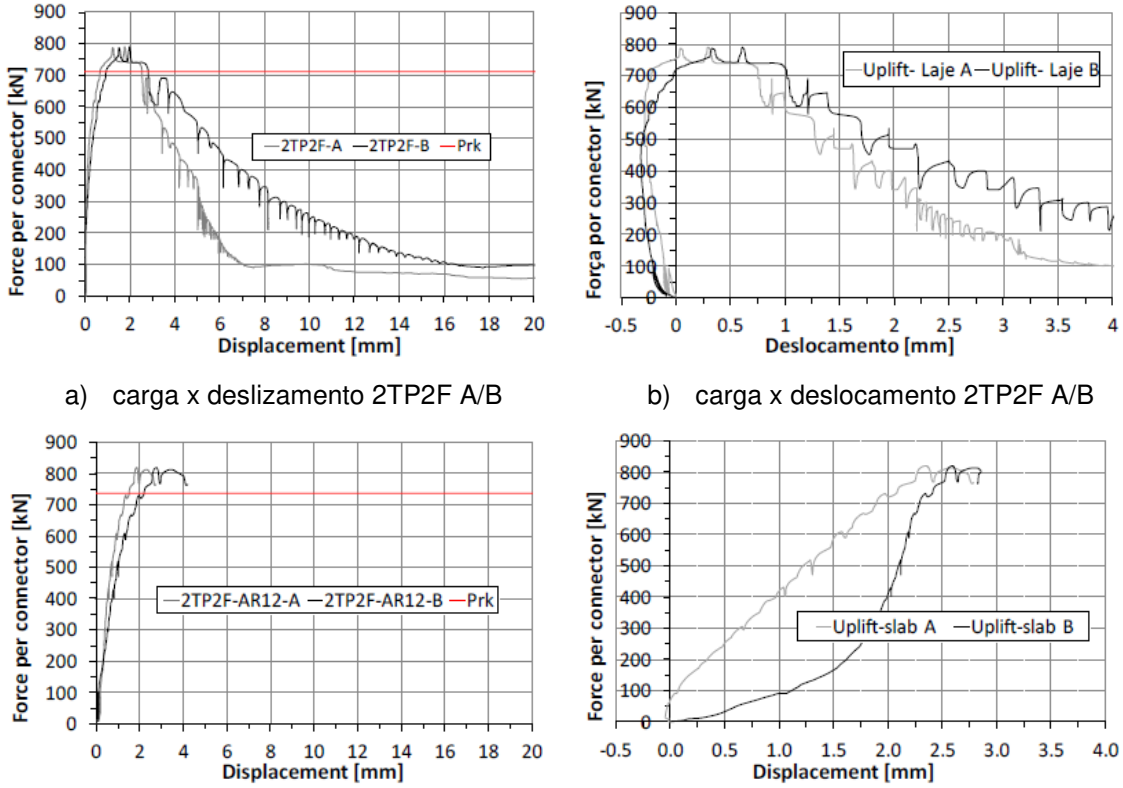
c) Tensão deslocamento IP2F-AR12 A/B

d) Descarregamento IP2F-AR12 A/B

Figura 47 – Resultados I-Perfobond (Costa-Neves et al., 2013)

Ainda sobre os ensaios realizados por Costa-Neves et al. (2013), os resultados obtidos com o duplo T-Perfobond foram similares ao obtidos com o I-Perfobond, tanto em termos de ductilidade não atingida, quanto em termos de resultados de carga máxima e a presença de patamar de escoamento – ver Figura 48. Tal resultado torna-se interessante do ponto de vista econômico, pois a ausência de alma em todo o trecho entre as mesas traz, consequentemente, uma redução do peso dos conectores e uma economia na compra de material.

Costa-Neves et al. (2013) conclui que a presença das mesas nos conectores contribuíram de forma significativa para o aumento de resistência, sendo de 200% com apenas uma mesa e de 300% com duas mesas. Contudo, para a ductilidade, a presença da mesa nem sempre foi benéfica. Ao se incluir uma mesa tem-se um aumento da ordem de 30% porém com duas mesas houve uma perda de até 22%. Tais resultados podem ser vistos na Tabela 10 onde os valores normalizados foram obtidos utilizando o conector Perfobond como referência.



a) carga x deslizamento 2TP2F A/B

b) carga x deslocamento 2TP2F A/B

c) carga x deslizamento 2TP2F-AR12 A/B

d) carga x deslocamento 2TP2F-AR12 A/B

Figura 48 – Resultados 2T-Perfobond, Costa Neves (2013).

Tabela 10 – Resumo de resultados obtidos por Costa-Neves et al. (2013) – sem barra

Teste	Nomenclatura	P_{rk} (kN)	$P_{rk(norm.)}$ (kN)	Ganho (%)	δ_{uk} (mm)	$\delta_{uk(norm.)}$ (mm)
1 A/B	P2F	252,05	1	-	3,06	1
3 A/B	TP2F	491,31	1,95	194,93%	4,05	1,32
5 A/B	IP2F	692,64	2,75	274,81%	2,90	0,95
7 A/B	2TP2F	710,69	2,82	281,97%	2,40	0,78

Ao analisar apenas os conectores com barra de reforço também houve um acréscimo de resistência ao considerar a mesa, da ordem de 150% com uma mesa e 200% com duas mesas. Contudo, a ductilidade apresentou perda em todos os casos, da ordem de 60% com uma mesa e 65% com duas. A Tabela 11 apresenta uma síntese dos resultados obtidos e a Figura 49 apresenta o mecanismo de colapso.

Ao analisar a influência da barra de reforço pode-se notar que em todos os casos houve um acréscimo de resistência para o conector e apenas no caso do conector T-Perfobond não foi percebido um ganho de ductilidade. Tal fato demonstra

a importância de uma barra de reforço adequada ao conector, pois conforme os ensaios realizados por Vianna (2009) em alguns casos, no conector T-Perfobond, ao se utilizar uma armadura maior pode-se reduzir a resistência e a ductilidade destes conectores, vide Tabela 5.

Tabela 11 – Resultados obtidos por Costa-Neves et al. (2013) - com barra de reforço

Teste	Nomenclatura	P_{rk} (kN)	$P_{rk(norm.)}$ (kN)	Ganho (%)	δ_{uk} (mm)	$\delta_{uk(norm.)}$ (mm)
2 A/B	P2F-AR12	358,97	1	-	9,13	1
4 A/B	TP2F-AR12	537,14	1,50	149,63%	3,92	0,43
6 A/B	IP2F-AR12	686,88	1,91	191,35%	3,11	0,34
8 A/B	2TP2F-AR12	737,10	2,05	205,34%	3,15	0,35

O mecanismo de colapso encontrado por Costa-Neves et al. (2013) foi o mesmo encontrado por Cândido-Martins et al. (2010) sendo caracterizado pela ruptura do concreto a partir do conector com um espraiamento similar a um ângulo de 45º, conforme Figura 49.

a) Sem barra de reforço b) Com barra de reforço

Figura 49 – Mecanismo de colapso (Costa-Neves et al., 2013).

2.4. Pessoa (2015)

Pessoa (2015) realizou uma série de 8 ensaios do tipo *push-out* onde se variou a existência ou não de armaduras passantes nos furos com diâmetros ϕ10 e ϕ16mm e a classe de concreto (C20/25 e C25/30). Os conectores foram fabricados a partir de perfis IPE360 em aço S275. A seção adotada, para fabricar os conectores, foi um perfil HEA200 em aço S275.

A geometria e o posicionamento dos conectores estão na Figura 50 e na Figura 51, respectivamente.

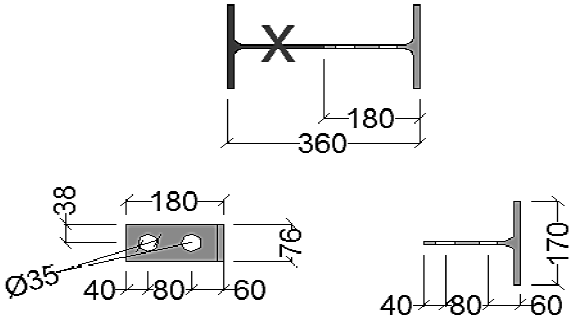


Figura 50 – Características geométricas dos conectores em mm (Pessoa, 2015).

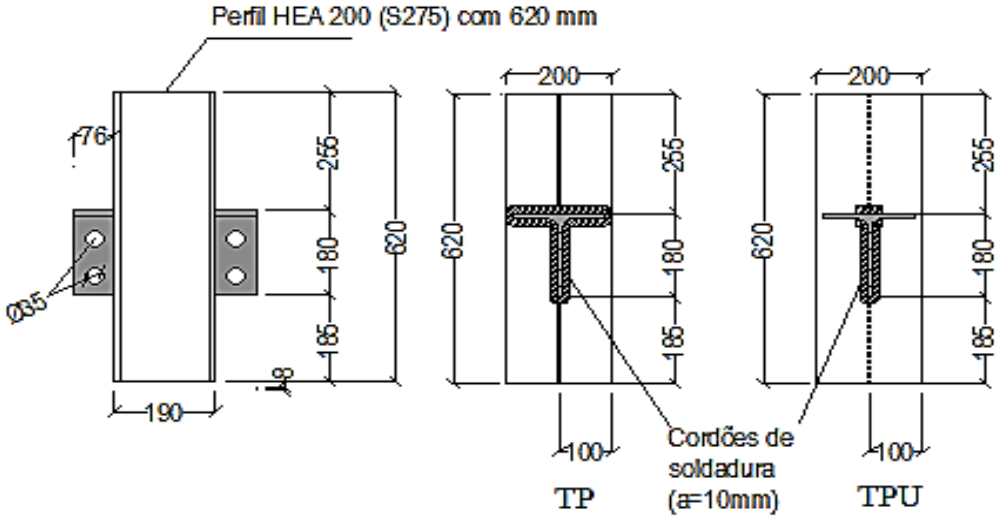


Figura 51 – Posição dos conectores no perfil metálico em mm (Pessoa, 2015)

As abreviaturas futuramente utilizadas, no nome dos conectores e referentes particularidades, são referentes a: TP – T-Perfobond, TPU – T-Perfobond Unconnected, ou seja, com as mesas do conector não soldadas na mesa da viga e AR – Armadura passante nos furos. A Figura 52 apresenta a diferença entre os conectores com mesas soldadas ou desconectadas.

a) TP – *T-Perfobond*

b) TPU – *T-PerfobondUnconnected*

Figura 52 – Conectores ensaidos por Pessoa (2015).

A instrumentação realizada por Pessoa (2015) foi igual em todos os ensaios de forma a se poder comparar facilmente os resultados. Os equipamentos de medida utilizados foram os seguintes:

- Transdutores de deslocamento (defletômetros ou LVDT´s), para avaliar os deslocamentos entre a laje de concreto e o conector, assim como o efeito de *Uplift* - Figura 53;
- Extensômetros unidirecionais (FLA-6-11) e rosetas (FRA-5-11) para medição das deformações dos conectores em estudo como ilustrado na Figura 54.

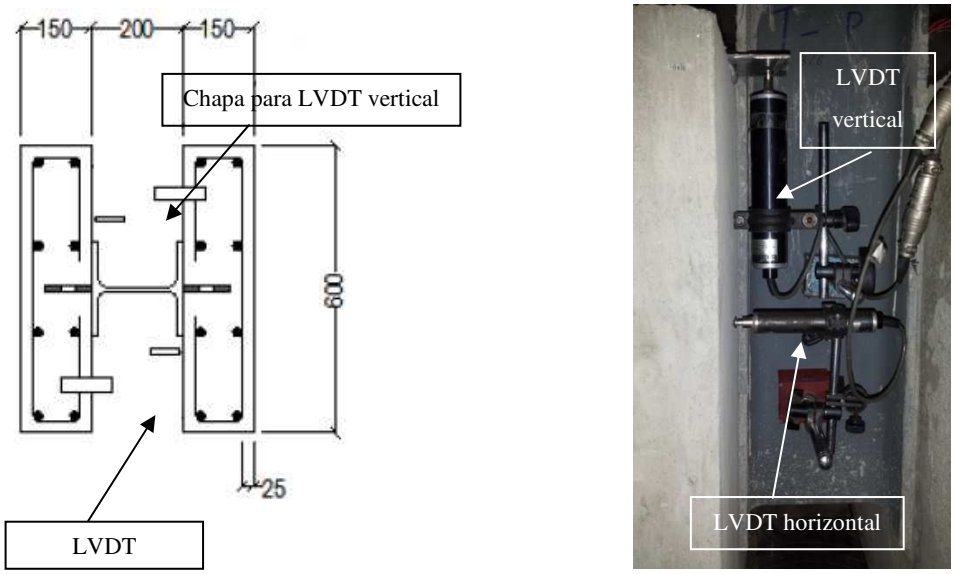


Figura 53 – Colocação dos LVDT's, Pessoa(2015)

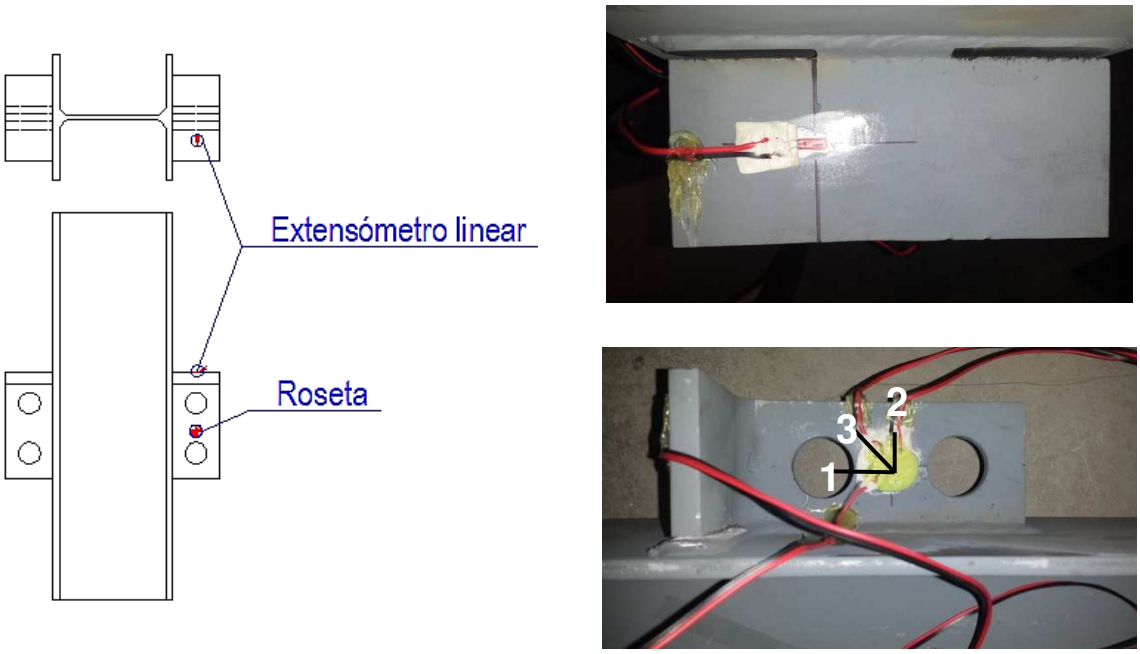


Figura 54 – Posicionamento dos extensômetros e das rosetas (Pessoa, 2015)

Em cada ensaio *push-out* foram estudados dois conectores iguais, que se distinguem por conector A e conector B, como ilustra a Figura 55. No final da nomenclatura de cada conector acrescenta-se também, um número que indica a série de ensaios a que pertence, sendo 1 e 2 correspondente aos concretos C20/25 e C25/30, respetivamente. A Tabela 12 apresenta uma síntese dos resultados obtidos por Pessoa (2015).

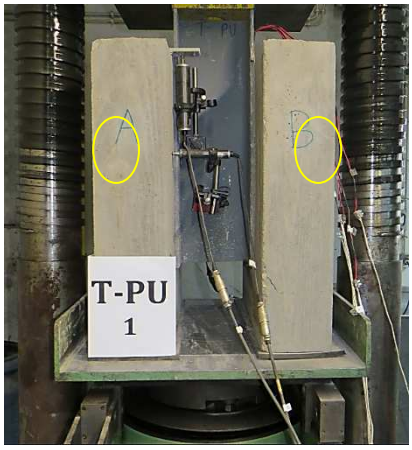


Figura 55 – Distinção das lajes/conectores em cada ensaio

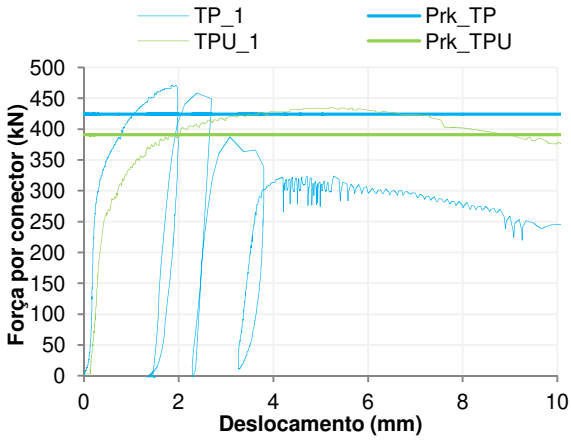
Pessoa (2015) constata que todos os conectores, à exceção do TP da primeira série e dos TPU_AR16 de ambas as séries, apresentam um comportamento dúctil.

O comparativo entre os conectores TPU e TP pode ser visto na Figura 56. Pessoa (2015) avalia que, o conector T-Perfobond Unconnected apresenta menores valores de capacidade de carga, ou seja, menos 8% e 14% aproximadamente, para cada concreto, respetivamente. Quanto à capacidade de deformação, o conector TPU apresenta sempre melhor comportamento podendo ser considerado um conector dúctil.

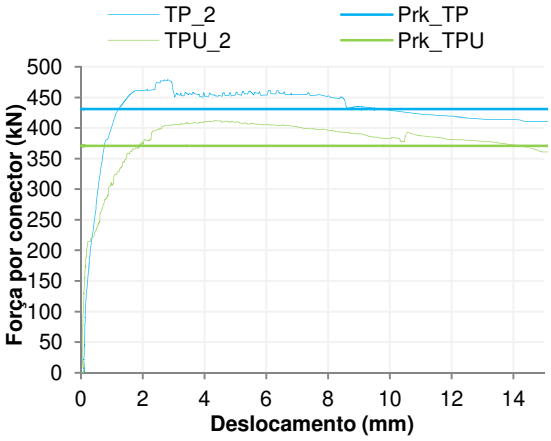
Ao analisar o mecanismo de colapso, Pessoa (2015) realiza os passos demonstrados para apresentação de uma equação de dimensionamento. A força necessária para que a mesa dos conectores TPU atinja a plastificação é obtida considerando-se o momento plástico da seção transversal que compõe a mesa do conector. Esta é obtida através do modelo estrutural apresentado na Figura 57 e as equações (16) e (17).

Tabela 12 - Resultados dos ensaios push-out (Pessoa, 2015)

Classe do concreto	Conector	P_{teste} (kN)	P_{rk} (kN)	δ_u (mm)	δ_{uk} (mm)
C20/25	TP_A1	471,45	424,31	2,00	1,80
	TP_B1			3,70	3,33
	TPU_A1	434,45	391,01	9,93	8,94
	TPU_B1			8,04	7,24
	TPU_AR10_A1	523,50	471,15	7,92	7,13
	TPU_AR10_B1			7,62	6,86
	TPU_AR16_A1	527,67	474,90	5,17	4,65
	TPU_AR16_B1			5,14	4,63
C25/30	TP_A2	480,11	432,10	8,81	7,93
	TP_B2			10,55	9,50
	TPU_A2	411,80	370,62	14,76	13,28
	TPU_B2			13,82	12,44
	TPU_AR10_A2	496,56	446,90	7,63	6,87
	TPU_AR10_B2			9,04	8,14
	TPU_AR16_A2	528,78	475,90	2,95	2,66
	TPU_AR16_B2			4,07	3,66



a) F-δ – Conector TP e TPU em concreto C20/25



b) F-δ – Conector TP e TPU em concreto C25/30

Figura 56 – Curvas carga versus deslocamento para o conector T-Perfobond e T-Perfobond Unconnected (Pessoa, 2015).

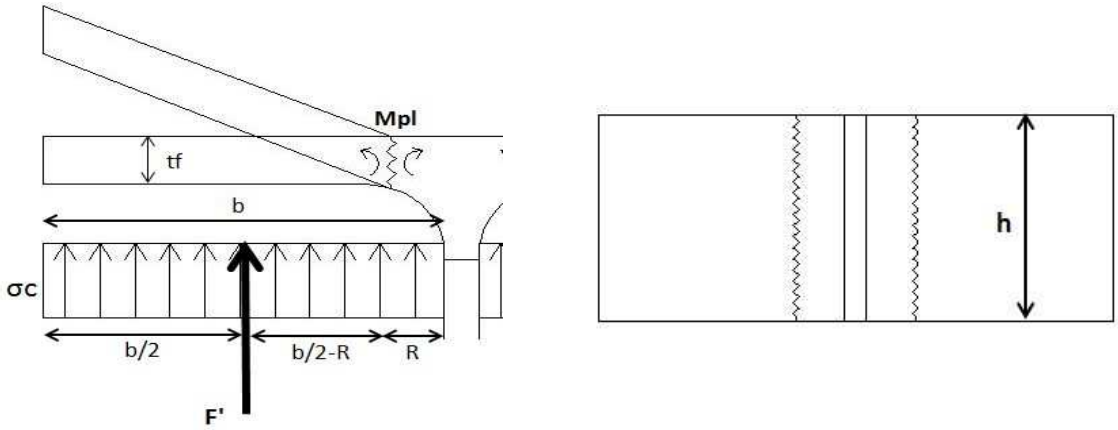


Figura 57 – Modelo estrutural para avaliação da plastificação do banzo do conector

$$F_{Banzo} = 2 \times F' \tag{16}$$

Na equação (16), a força F' é o valor mínimo entre a resistência do concreto, equação (17), e a resistência do aço, equação (18).

- Equação da resistência do concreto:

$$F_1' = f_{ck,cyl.} \times h \times b \tag{17}$$

- Equação da resistência do aço:

$$F_2' \times \left(\frac{b}{2} - R\right) = M_{pl} =>$$

$$=> F_2' \times \left(\frac{b}{2} - R\right) = 0{,}25 \times h \times {t_f}^2 \times f_y => \tag{18}$$

$$=> F_2' = \frac{0{,}25 \times h \times {t_f}^2}{\left(\frac{b}{2} - R\right)} \times f_y$$

Das equações anteriores obtém-se:

$$F_{Banzo} = min \begin{cases} 2f_{ck,cil.} \times h \times b \\ \dfrac{0{,}5 \times h \times {t_f}^2}{\left(\frac{b}{2} - R\right)} \times f_y \end{cases} \tag{19}$$

Quanto à força necessária para que a alma do conector plastifique quando solicitada ao corte, esta é obtida pela a equação (20) com base na geometria apresentada na Figura 58.

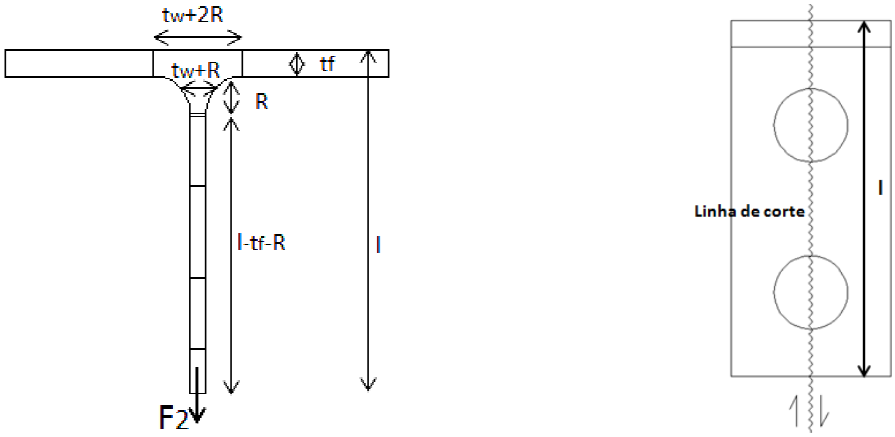


Figura 58 – Plastificação do banzo solicitado ao corte

$$F_{Alma} = A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}} \tag{20}$$

$$A_v = \left(l - t_f - R - n\emptyset\right) \times t_w + (t_w + R) \times R + (t_w + 2R) \times t_f \tag{21}$$

Considerando-se que ambas as resistências (alma e mesa) podem ser somadas, a capacidade de carga do conector pode então ser estimada a partir da seguinte equação:

$$F_{Total} = F_{Banzo} + F_{Alma} => F_{Total} = min \begin{cases} 2f_{ck,cil.} \times h \times b + \frac{A_v}{\sqrt{3}} \times f_y \\ (\frac{h \times {t_f}^2}{(b - 2R)} + \frac{A_v}{\sqrt{3}}) \times f_y \end{cases} \tag{22}$$

Pessoa (2015) conclui que colocando armadura nos furos do conector existe um aumento significativo da capacidade de carga dos mesmos em cerca de 17%. No entanto, com o aumento do diâmetro da mesma, o aumento da capacidade de carga já não é tão significativo, cerca de 6%. Quanto à ductilidade, esta diminui com a colocação de armadura e com a utilização de barras de maior diâmetro, TPU_AR16, o conector perdeu o comportamento dúctil.

O aumento da classe de concreto não proporcionou ganhos em relação à capacidade de carga dos conectores, no entanto, trouxe um aumento significativo na capacidade de deslizamento dos conectores, à exceção do TPU_AR16.

Ao comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos pelas equações propostas por Vianna (2009) e pelo Eurocodigo 4 (2005), Pessoa (2015) ressalta que as equações referidas consideram uma ruptura apenas por parte do concreto. No entanto estas equações poderão ser utilizadas, para conectores tipo TPU, quando comparadas com equações, como a proposta por Pessoa (2015), que consideram uma ruptura da ligação por plastificação do conector. Neste caso, a resistência do conector será considerada a menor entre as duas equações.

2.5. Duarte (2015)

Duarte (2015) realizou ensaios *push-out* onde utilizou a seguinte nomenclatura para os conectores P – "Perfobond", Y – " Y-Type", Y-P – " Y-Perfobond", V – "V-Type", F – furos. As características geométricas da laje de concreto e dos tipos de conectores utilizados por Duarte (2015) são indicadas na Tabela 13. Na Figura 59 ilustram-se os diferentes tipos de conectores ensaiados por este autor.

Tabela 13 - Características geométricas dos ensaios, Duarte (2015)

Tipo	Ensaio	Designação	Laje de concreto			Conector			
			t_c (mm)	h_c (mm)	*Concreto* (MPa)	*l* (mm)	*h* (mm)	*d* (mm)	*t* (mm)
Perfobond	1	P-1F-1	150	600	C20/25	200	76	35	12,5
	2	P-1F-2			C25/30				
Y-Type	3	Y-T-1	150	600	C20/25	200	76	-	12,5
	4	Y-T-2			C25/30				
Y-Perfobond	5	Y-P-1F-1	150	600	C20/25	200	76	35	12,5
	6	Y-P-1F-2			C25/30				
V-Type	7	V-T-1	150	600	C20/25	200	76	35	12,5
	8	V-T-2			C25/30				

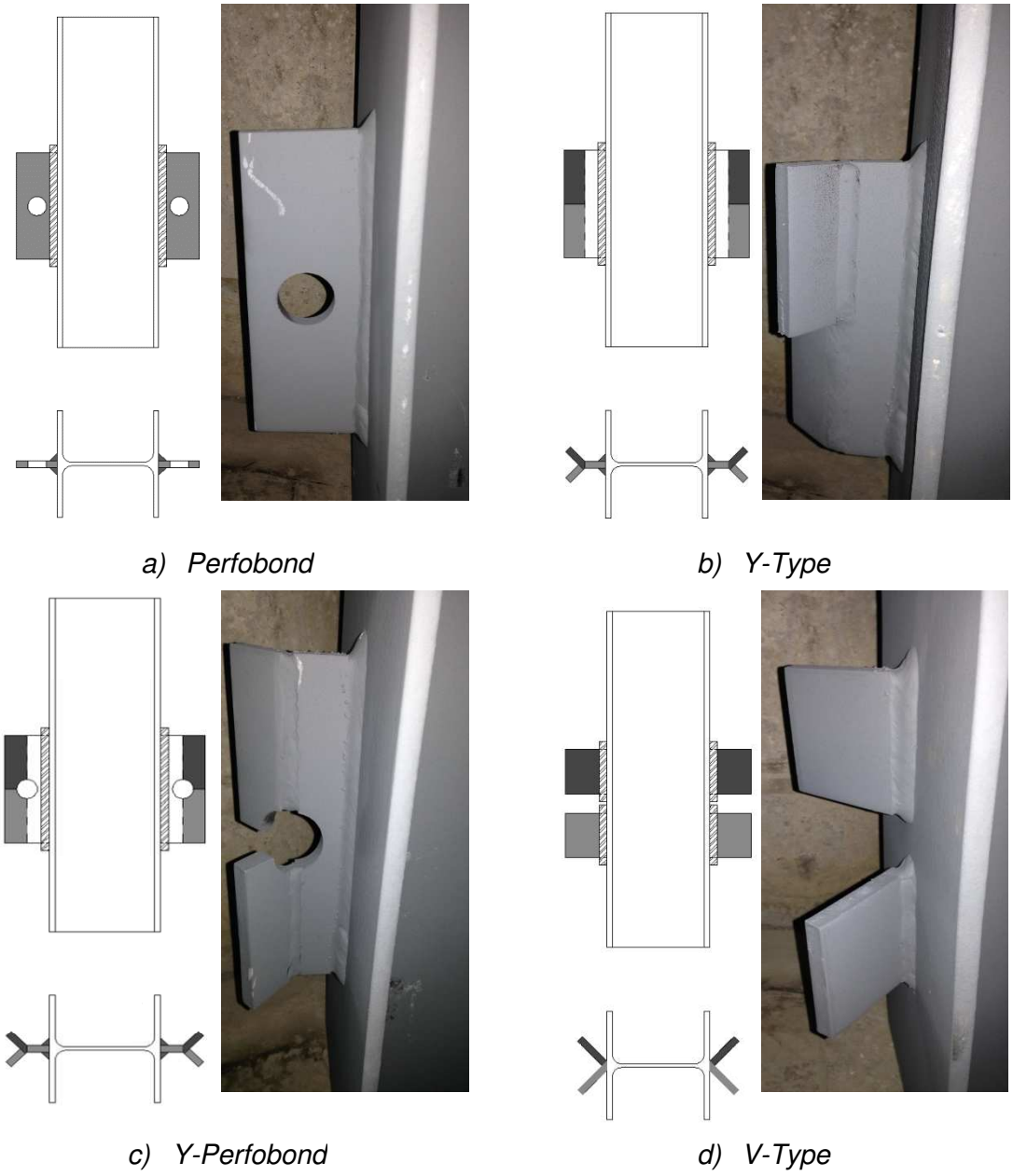


Figura 59 – Tipos de conectores estudados por Duarte (2015)

As características dos ensaios realizados por Duarte (2015) foram: HEA 200 em aço S275 na viga metálica e os conectores foram fabricados a partir de chapas de aço S275 (tensão limite de escoamento de 275 MPa, de acordo com EN10025) com 12,5 mm de espessura. A classe de resistência do concreto pretendido por Duarte (2015) para os ensaios, de acordo com o Eurocode 2 (CEN, 2004), era C20/25.

A Figura 60 são apresentados os diferentes conectores usados por Duarte (2015) em seus ensaios experimentais.

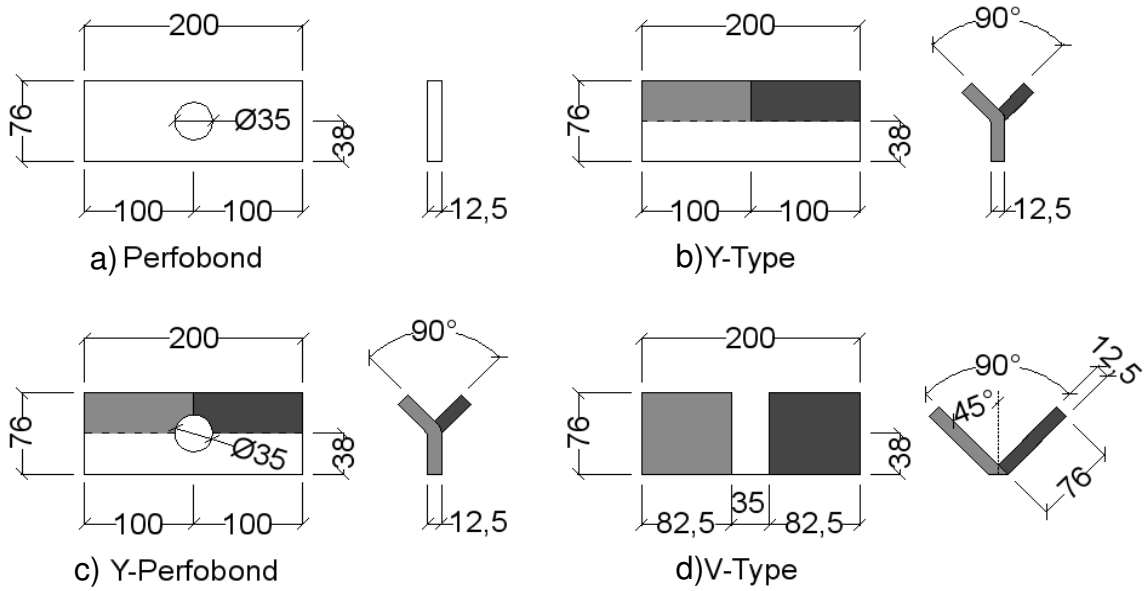


Figura 60 – Características geométricas dos conectores ensaiados (medidas em mm), Duarte (2015)

Ao analisar os tipos de conectores ensaiados, Duarte (2015) conclui que o conector *Perfobond* apresenta a menor capacidade resistente, mas por outro lado, uma maior capacidade de deformação. Com relação à capacidade de carga, os conectores ensaiados por Duarte (2015) apresentaram uma maior resistência. Comparando-os com o conector de referência *Perfobond*, para o conector Y-*Perfobond* verificou-se um aumento de 27%, para o conector *Y-Type* um acréscimo de 29% e para o conector *V-Type* observou-se um aumento de 23%. Embora nenhuma destas tipologias tenha um comportamento dúctil, verificou-se um acréscimo de carga significativo, revelando-se assim satisfatórios.

A Figura 61 apresenta as curvas carga *versus* deslocamento para os diferentes tipos de conectores ensaiados por Duarte (2015).

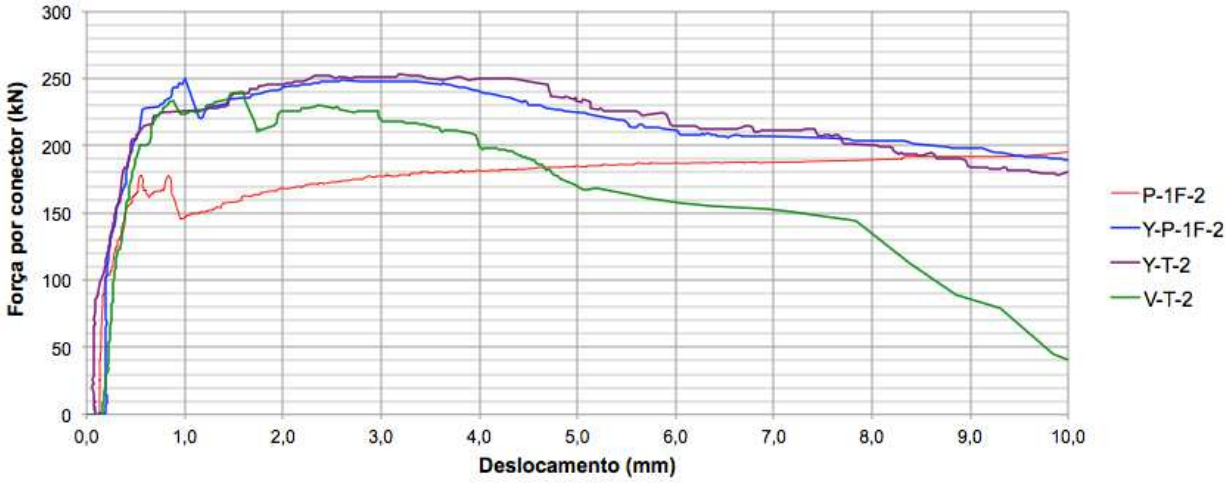


Figura 61 – Curvas carga versus deslocamento para o concreto 2 – C25/30 (Duarte, 2015)

Ao formular a resistência dos conectores Y-Perfobond e Y-Type, Duarte (2015) toma por base, as formulações de Oguejiofor & Hosain (1997) conforme equação (23). A diferença entre estes conectores é que o Y-Type não possui furos sendo, portanto, nula a parte da equação que considera a influência dos furos para este conector.

$$q_u = 4{,}5(b + 2l)t_{sc}f_{ck} + 3{,}31nD^2\sqrt{f_{ck}} \tag{23}$$

A formulação de Kim *et al.* (2013) modificada corresponde à equação (24):

$$q_u = 3{,}428(b + 2l)t_{sc}f_{ck} + 1{,}9n\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2\sqrt{f_{ck}} \tag{24}$$

Desenvolvendo o modelo de Vianna (2009), obtém-se a formulação expressa pela equação (25):

$$q_u = 152{,}9 + 3{,}21 \times 10^{-3} \times (b + 2l) \times t_{sc}f_{ck} - 0{,}86 \times 10^{-3} \times A_{sc}\sqrt{f_{ck}} \tag{25}$$

Nas equações acima utiliza-se a seguinte nomenclatura:

q_u representa a resistência nominal ao corte do conector (N);
D é o diâmetro dos furos do conector (mm);
n é o número de furos;

h é a altura do conector (mm);
t é a espessura do conector (mm);
f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão (MPa);
f_y é a tensão nominal das armaduras da laje (MPa);
A_{tr} é a área total da armadura transversal na laje (em mm^2);
m é o número de pinos virtuais criados pelas dobras em forma de Y;
s é a distância entre as dobras que estão viradas para o mesmo lado (em mm);
b representa a parte direita do conector (em mm);
l é a parte inclinada do conector (em mm) conforme apresentado na Figura 62.

Na equação (25), o primeiro termo diz respeito à resistência de ponta e o segundo termo à resistência provocada pelos tarugos de concreto formados devido à existência dos furos.

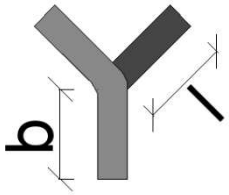


Figura 62 – Resistência de ponta - 1º termo (Duarte, 2015)

Para a formulação do conector V-Type, Duarte(2015) propõem a equação (26), modificada de Oguejiofor & Hosain (1997):

$$q_u = 4{,}5 \times 2l \times t_{sc} f_{ck} + 3{,}31 hs\sqrt{f_{ck}} \tag{26}$$

Para o modelo de Kim *et al.* (2013) modificado chegou-se à equação:

$$q_u = 3{,}428 \times 2l \times t_{sc} f_{ck} + 1{,}9 hs\sqrt{f_{ck}} \tag{27}$$

E finalmente, adaptando-se o modelo de Vianna (2009), obteve-se a formulação expressa pela equação (28):

$$q_u = 152{,}9 + 3{,}21 \times 10^{-3} \times 2l \times t_{sc} f_{ck} - 0{,}86 \times 10^{-3} \times hs\sqrt{f_{ck}} \quad (28)$$

Em que, l representa a parte inclinada do conector (mm), h a altura do conector (mm) e s o afastamento entre as chapas (mm), conforme se verifica na Figura 63 e na Figura 64. As restantes das variáveis são as já definidas nas equações apresentadas anteriormente. Como na equação do conector Y, o primeiro termo diz respeito à resistência de ponta e o segundo termo à resistência provocada pela área de concreto que se forma entre as duas chapas.

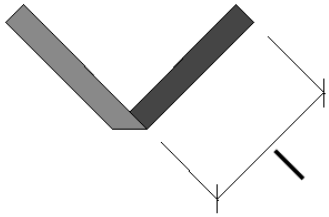


Figura 63 – Resistência de ponta - 1º termo (Duarte, 2015)

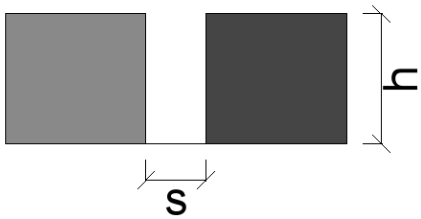


Figura 64 – Resistência provocada pelos tarugos de concreto formados devido à existência dos espaços - 2º termo (Duarte, 2015)