



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Conectores T-PerfobondUnconnected submetidos a carregamento monotónico.

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

Lino Filipe Cristóvão Pessoa

Orientador

Professor Doutor Luís Filipe da Costa Neves

Co-Orientador

Prof. Doutor Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

Colaboração Institucional: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2015

AGRADECIMENTOS

Com a presente dissertação se encerra um capítulo muito importante da minha vida. Apesar de ser um trabalho individual, muitas pessoas estiveram envolvidas, às quais gostaria de deixar um especial agradecimento:

Ao professor Doutor Luís Costa Neves pelo seu incansável apoio e disponibilidade demonstrada, e pela partilha de conhecimentos científicos importantes. Agradeço também ao Professor Doutor Pedro Vellasco que mesmo estando longe em muito me ajudou.

Agradeço também a todos os funcionários do Laboratório de Construções, Estruturas e Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC em especial ao Luís Gaspar e ao Eng.º Edmundo por toda a ajuda e disponibilidade demonstrada ao longo de todo o decorrer dos ensaios experimentais.

Aos meus colegas do Perfil de Mecânica Estrutural, especialmente ao Antony, ao Filipe, ao Gonçalo e ao Seixas, companheiros de longas noites de trabalho, agradeço a grande amizade que saúdo por todos os bons momentos partilhados. Quero dirigir ainda uma palavra de apreço a todos os outros colegas que de alguma forma também me ajudaram durante todo este percurso académico.

Um agradecimento muito especial à Patrícia Nunes, e também aos seus pais, pessoa bastante importante para mim e que em muito me ajudou e apoiou ao longo de todo o curso. Ao Marcos Bento e Jorge Cardoso, amigos que levo para a vida, e que de alguma forma tornaram todos estes anos mais animados.

Agradeço ao Sr. Valter Gomes por ter fornecido os perfis metálicos e os conectores para os ensaios experimentais, e também à empresa *Verdasca e Verdasca* pela oferta do betão.

Por fim, agradeço às pessoas mais importantes da minha vida, os meus pais, que em tanto se esforçaram para que hoje pudesse ser quem sou, sem eles nada disto seria possível. Não posso também deixar de agradecer ao meu irmão, aos meus avós e restante família pois de algum modo foram também pessoas bastante importantes ao longo de todo este percurso.

RESUMO

Na presente dissertação de Mestrado Integrado no domínio da construção metálica e mista, será realizada uma investigação sobre o comportamento estrutural de Conectores de corte tipo *T-Perfobond* sem soldadura nos banzos. Este trabalho contempla uma revisão bibliográfica da literatura sobre o tema, seguida de uma parte experimental através de ensaios do tipo push-out. Nesta etapa foram testados conectores do tipo T-Perfbond, monotonicamente, fazendo variar alguns parâmetros relevantes no comportamento da ligação.

O comportamento de estruturas mistas é baseado na ação conjunta entre o perfil de aço e o betão armado, à custa do desenvolvimento de forças longitudinais de corte. Ensaios em estruturas mistas mostram que, para baixos valores de carga, a maior parte do corte longitudinal é desenvolvida na interface por aderência química entre a pasta de cimento e a superfície de aço. No entanto, para cargas mais elevadas é necessário o uso de conectores de corte para transmitir o corte na interface aço-betão.

Sendo usada uma metodologia experimental, serão preparados e realizados 8 ensaios tipo push-out monotónicos, com o objetivo de caracterizar o comportamento dos conectores, com a variação de parâmetros chave. As variáveis para o problema são a quantidade de armadura dentro dos orifícios, a classe de resistência do betão e a ligação do conector ao perfil metálico.

O principal conector em estudo nesta tese é um conector derivado do já existente *T-Perfobond*, o *T-PerfobondUnconnected*. A diferença será a inexistência de soldadura no banzo do conector com o objetivo de se obter um conector com maior ductilidade.

Os resultados obtidos nos ensaios monotónicos são representados em curvas força-escorregamento, e serão analisados comparativamente por forma a avaliar a importância relativa de cada parâmetro. Por fim, serão utilizados modelos analíticos com o objetivo de avaliar a sua adequabilidade às ligações em análise. Será também proposto um modelo analítico para o cálculo da capacidade de carga do conector *T-PerfobondUnconnected*.

ABSTRACT

In the present dissertation, for a masters degree in the field of steel and composite construction, an investigation of the structural behavior of T- Perfobond shear connectors with welded and non-welded flanges will be developed. This work initially comprises a literature review on the subject, followed by an experimental part through push-out type tests. At this stage T- Perfobond and T-Perfobond Unconnected type connectors, were monotonically tested, varying some relevant shear connectors' parameters.

The behavior of composite structures is based on the joint action between the steel profile and the concrete, at the cost of development of longitudinal shear forces. Assays in composite structures shows that, for early loading stages, most of the longitudinal section is developed by a chemical bond at the interface between the concrete and the steel surface. However, at higher loads the use of shear connectors is necessary to ensure the shear transfer at the concrete to steel interface.

Using an experimental methodology, eight push-out monotonic tests were prepared and conducted, in order to characterize the connectors' behavior by vaying key parameters. The studied variables were: the number of steel reinforcing bars used in the shear connector holes, the concrete strength class and the adopted type of weld configuration (flanges connected and unconnected to the beam's top flange).

The shear connector studied in this investigation is a derivative of the T-Perfobond connector, the T-PerfobondUnconected. The main difference between them is the lack of welds ar the connector's flange aiming to obtain a higher ductility.

The results obtained in monotonic tests are represented in terms of force-slip curves, and are comparatively analyzed in order to assess the relative significance of the parameters investigated. Finally, analytical load carrying predicting models were compared to rhe experimental findings leading to the development of a new analytical model to calculate the loas carrying capacity of the T-PerfobondUnconnected connector.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| AGRADECIMENTOS | i |
| RESUMO | ii |
| ABSTRACT | iii |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Enquadramento geral | 1 |
| 1.2 Conceito de estrutura mista..... | 2 |
| 1.3 Objetivos | 3 |
| 1.4 Estrutura do documento | 4 |
| 2 Estado do conhecimento..... | 6 |
| 2.1 Considerações iniciais..... | 6 |
| 2.1.1 Grau de conexão | 7 |
| 2.1.2 Classificação de conectores | 8 |
| 2.1.3 <i>Uplift</i> | 9 |
| 2.2 Conectores | 9 |
| 2.2.1 Conector tipo <i>Stud</i> | 9 |
| 2.2.2 Conector tipo “C” | 11 |
| 2.2.3 Conector tipo “X-HVB” da Hilti | 11 |
| 2.2.4 Conector CR ou “ <i>Crestbond</i> ” | 12 |
| 2.2.5 Conector <i>Perfobond</i> e <i>T – Perfobond</i> | 13 |
| 2.3 Estudos relevantes sobre conectores <i>T-Perfobond</i> | 14 |
| 2.3.1 Avaliação do comportamento estrutural de conectores <i>Perfobond</i> e <i>T-Perfobond</i> para vigas mistas (Vianna, 2009) | 14 |
| 2.3.2 Conectores <i>Perfobond</i> submetidos a carregamento monotónico e cíclico (Figueiredo, 2012)..... | 21 |
| 2.4 Equações de cálculo da resistência de conectores | 22 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.4.1 | Cálculo da resistência do <i>Perfobond</i> | 22 |
| 2.4.2 | Conector Tipo Bloco | 24 |
| 2.4.3 | Conector <i>T-Perfobond</i> | 25 |
| 3 | Programa experimental | 27 |
| 3.1 | Introdução | 27 |
| 3.2 | Propriedades e características geométricas dos provetes ensaiados | 27 |
| 3.3 | Procedimento adotado para o ensaio <i>push-out</i> | 31 |
| 3.4 | Equipamentos utilizados nos ensaios..... | 31 |
| 3.5 | Instrumentação dos provetes..... | 32 |
| 3.6 | Avaliação da resistência última e capacidade de deslizamento | 34 |
| 4 | Análise dos resultados experimentais | 35 |
| 4.1 | Resultados experimentais | 35 |
| 4.2 | Estudo da influência dos principais parâmetros | 48 |
| 4.2.1 | Influência do tipo de conector | 48 |
| 4.2.2 | Influência da resistência do betão..... | 49 |
| 4.2.3 | Influência da armadura nos furos | 50 |
| 4.3 | Modo de rotura..... | 52 |
| 5 | Comparação de resultados..... | 57 |
| 5.1 | Comparação com resultados experimentais obtidos por outros autores | 57 |
| 5.2 | Comparação com modelos analíticos | 58 |
| 6 | Proposta de um modelo analítico para o conector <i>T-Perfobondunconnected</i> | 61 |
| 7 | Considerações finais..... | 65 |
| 7.1 | Introdução | 65 |
| 7.2 | Conclusões | 66 |
| 7.3 | Propostas para trabalhos futuros | 67 |
| 8 | Referências bibliográficas | 68 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Aplicação de vigas mistas secções em I ou H (a), secção em caixão (b), sistema em treliça (c) (Vianna, 2009)..... | 2 |
| Figura 1.2 - (a) Pontes mistas, (b) e (c) Laje <i>steel deck</i> em sistema de piso (Vianna, 2009)..... | 3 |
| Figura 2.1 – Curva força-deslocamento em conectores vulgarmente utilizados (Cosenza & Zandonini, 1999) | 6 |
| Figura 2.2 - Exemplo de grau de conexão nulo (à esquerda) e total (à direita), Queiroz..... | 7 |
| Figura 2.3 - Classificação dos conectores e suas curvas características (Figueiredo et al, 2012) | 8 |
| Figura 2.4 - Conectores do tipo “ <i>stud</i> ”, (Veríssimo et al, 2006) | 9 |
| Figura 2.5 - Conector rígido tipo C (Eurocódigo 4, CEN 1994)..... | 11 |
| Figura 2.6 - <i>Channel</i> conector (Johnson, 1994) | 11 |
| Figura 2.7 - Conectores da <i>Hilti X-HVB</i> (http://www.hilti.pt , 2012) | 12 |
| Figura 2.8 - Conector tipo <i>crestebond</i> contínuo à esquerda e interrompido à direita (Veríssimo et al, | 12 |
| Figura 2.9 - Conector tipo <i>Perfobond</i> (Veríssimo et al, 2006)..... | 13 |
| Figura 2.10 - Conector <i>T-Perfobond</i> | 14 |
| Figura 2.11 – Conectores <i>T-Perfobond</i> por etapas (Vianna 2009)..... | 15 |
| Figura 2.12 – Geometria dos conectores testados (Vianna, 2009) | 16 |
| Figura 2.13 - Curva força vs deslocamento dos conectores <i>T-Perfobond</i> em lajes de 120mm (Vianna et al, 2008) | 17 |
| Figura 2.14 - Configurações dos conectores T-Perfobond, segunda etapa (Vianna, 2009) | 18 |
| Figura 2.15 - Comparação do <i>Perfobond</i> versus <i>T-Perfobond</i> (Vianna et al 2012)..... | 20 |
| Figura 2.16 - Geometria dos conectores <i>T-Perfobond Light</i> (Vianna et al, 2012)..... | 21 |
| Figura 2.17 - Conectores tipo bloco, Eurocódigo 4 (2001)..... | 25 |
| Figura 2.18 – Definição das áreas Af1 e Af2 (Eurocódigo 4, CEN 1994)..... | 25 |
| Figura 2.19 – Posição do Conector <i>T-Perfobond</i> (Vianna, 2009)..... | 26 |
| Figura 3.1 - <i>T-Perfobond</i> | 28 |
| Figura 3.2 - <i>T-PerfobondUnconnected</i> | 28 |
| Figura 3.3 - Provete de ensaio “ <i>standart</i> ” (Eurocodigo 4, 2004)..... | 29 |
| Figura 3.4 - Características geométricas dos conectores (em milímetros)..... | 29 |
| Figura 3.5 - Posição dos conectores no perfil metálico (em milímetros)..... | 30 |
| Figura 3.6 - Geometria dos provetes de ensaio (em milímetros)..... | 30 |
| Figura 3.7 - Esquema de controlo de carga do ensaio <i>push-out</i> (Vianna 2009 [9])..... | 31 |
| Figura 3.8 - Prensa hidráulica e sistema de aquisição de dados | 32 |
| Figura 3.9 - Colocação dos LVDT's | 33 |
| Figura 3.10 - Localização das rosetas e extensómetros em todos os provetes | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.11 - Colocação dos extensómetros..... | 33 |
| Figura 3.12 – Colocação das rosetas | 33 |
| Figura 3.13 - Capacidade de deslizamento δu (Eurocódigo 4, CEN 2004)[12]..... | 34 |
| Figura 4.1 – Distinção dos conectores de cada ensaio | 36 |
| Figura 4.2 - Curva carga/deslocamento para o conector <i>T-Perfobond</i> | 37 |
| Figura 4.3 - Curva carga/deslocamento para o conector <i>T-PerfobondUnconnected</i> | 38 |
| Figura 4.4 - Curva carga/deslocamento para o conector <i>T-PerfobondUnconnected</i> com armadura de 10 milímetros..... | 39 |
| Figura 4.5 - Curva carga/deslocamento para o conector <i>T-PerfobondUnconnected</i> com armadura de 16 milímetros..... | 40 |
| Figura 4.6 - Curva Carva/ <i>uplift</i> do conector <i>T-Perfobond</i> | 40 |
| Figura 4.7 - Curva Carva/ <i>uplift</i> do conector <i>T-PerfobondUnconnected</i> | 41 |
| Figura 4.8 - Curva Carva/ <i>uplift</i> do conector <i>T-PerfobondUnconnected</i> com armadura de 10 milímetros..... | 41 |
| Figura 4.9 - Curva Carva/ <i>uplift</i> do conector <i>T-PerfobondUnconnected</i> com armadura de 16 milímetros..... | 41 |
| Figura 4.10 - Extensão no bazo do conector <i>T-Perfobond</i> | 42 |
| Figura 4.11 - Extensão no bazo do conector <i>T-PerfobondUnconnected</i> | 43 |
| Figura 4.12 - Extensão no bazo do conector <i>T-PerfobondUnconnected</i> com armadura de 10 milímetros..... | 43 |
| Figura 4.13 - Extensão no bazo do conector <i>T-PerfobondUnconnected</i> com armadura de 16 milímetros..... | 43 |
| Figura 4.14 – Resultados da roseta na alma do conector TP em betão C20/25..... | 45 |
| Figura 4.15 – Resultados da roseta na alma do conector TPU em betão C20/25..... | 45 |
| Figura 4.16 – Resultados da roseta na alma do conector TPU-AR10 em betão C20/25..... | 45 |
| Figura 4.17 – Resultados da roseta na alma do conector TPU-AR10 em betão C25/30..... | 46 |
| Figura 4.18 – Resultados da roseta na alma do conector TPU-AR16 em betão C20/25..... | 46 |
| Figura 4.19 – Resultados da roseta na alma do conector TPU-AR16 em betão C25/30..... | 46 |
| Figura 4.20 – Ângulo ente as direções da roseta e as principais do conector TPU_AR10 com betão C25/30..... | 47 |
| Figura 4.21 – Curvas carga/deslocamento para o conector <i>T-Perfobond</i> e <i>T-PerfobondUnconnected</i> | 48 |
| Figura 4.22 – Resistência dos conectores..... | 48 |
| Figura 4.23 – Curva F- δ do conector TP em betão C20/25 e C25/30 | 49 |
| Figura 4.24 - Curva F- δ do conector TPU em betão C20/25 e C25/30..... | 49 |
| Figura 4.25 - Curva F- δ do conector TPU_AR10 em betão C20/25 e C25/30 | 50 |
| Figura 4.26 - Curva F- δ do conector TPU_AR16 em betão C20/25 e C25/30 | 50 |
| Figura 4.27 - Curva F- δ do conector TPU com e sem armadura nos furos em betão C20/25 . | 51 |
| Figura 4.28 - Curva F- δ do conector TPU com e sem armadura nos furos em betão C25/30 . | 51 |
| Figura 4.29 – Fissura inicial de corte do TP em betão C25/30 | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.30 – Fissura de corte em fase mais avançada, do TPU em betão C25/30..... | 52 |
| Figura 4.31 - Modo de rotura intermedio do conector TP em betão C25/30 | 53 |
| Figura 4.32 - Modo de rotura intermedio do conector TPU em betão C20/25..... | 53 |
| Figura 4.33 - Modo de rotura intermedio do conector TPU_AR10 em betão C25/30..... | 53 |
| Figura 4.34 - Modo de rotura intermedio do conector TPU_AR16 em betão C20/25..... | 53 |
| Figura 4.35 – Plastificação do banzo dos conectores TP e TPU após o ensaio..... | 54 |
| Figura 4.36 – Plastificação da alma dos conectores TP e TPU após o ensaio..... | 54 |
| Figura 4.37 – Cone de betão nos conectores TPU_AR10_B e TPU_AR16_B em betão C20/25 | 55 |
| Figura 4.38 – Plastificação das armaduras de reforço | 55 |
| Figura 4.39 – Laje do conector TP em betão C25/30..... | 56 |
| Figura 4.40 – Laje do conector TPU_AR10 em betão C20/25 | 56 |
| Figura 6.1 - Plastificação do banzo do conector..... | 61 |
| Figura 6.2 – Plastificação do banzo solicitado ao corte | 63 |
| Figura 6.3 - Comparação entre resultados analíticos e experimentais | 64 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 2.1 – Características geométricas dos modelos testados (Vianna et al, 2008) | 16 |
| Quadro 2.2 – Resultados dos ensaios pertencentes à terceira série (Vianna, 2009)..... | 17 |
| Quadro 2.3 – Resultados da quarta série (Vianna,2009) | 18 |
| Quadro 2.4 - Ensaios Push-out, segunda etapa (Vianna, 2009) | 19 |
| Quadro 2.5 - Resultados dos ensaios da segunda etapa (Vianna, 2009) | 19 |
| Quadro 2.6 - Características dos modelos ensaiados (Vianna et al, 2012)..... | 20 |
| Quadro 2.7 - Características geométricas dos ensaios (Figueiredo, 2012)..... | 22 |
| Quadro 2.8 – Resultados dos ensaios monotónicos (Figueiredo, 2012)..... | 22 |
| Quadro 3.1 – Características geométricas dos ensaios | 30 |
| Quadro 4.1 - Características do Betão | 36 |
| Quadro 4.2 - Resultado dos ensaios push-out..... | 37 |
| Quadro 4.3 – Resultados obtidos experimentalmente | 50 |
| Quadro 4.4 – Influência da armadura no conector <i>T-PerfobondUnconnected</i> | 51 |
| Quadro 5.1 - Comparação com os resultados experimentais de Vianna (2009) e Figueiredo (2012) para o conector <i>T-Perfobond</i> | 57 |
| Quadro 5.2 - Resultados experimentais versus teóricos | 59 |
| Quadro 5.3 – Cálculo da capacidade de carga do conector TP-2F-AR-IN-10-16 de Vianna (2009) | 59 |
| Quadro 5.4 – Resultados analíticos de Vianna (2009) | 60 |
| Quadro 6.1 – Valores obtidos a partir da equação proposta..... | 64 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

Ao longo da história, no que toca à conceção de estruturas, o constante interesse na descoberta de novos materiais e técnicas, tem permitido uma grande evolução na engenharia civil.

Atualmente o betão armado é dos materiais mais utilizados em estruturas correntes. No entanto, a utilização de betão e argamassas remonta a milhares de anos atrás, sendo obtido nessa altura a partir da mistura de argilas, areias, água e cascalho. A grande evolução deste deu-se aquando da descoberta de um novo ligante que viria a substituir a argila; o cimento.

Em inícios do século XX, foram publicados os primeiros regulamentos para betão armado, em França. O primeiro regulamento português sobre betão armado, Instruções Regulamentares para o Emprego do Beton Armado, foi publicado em 1918. Atualmente, o regulamento em vigor em Portugal é a Norma Europeia – Eurocódigo 2 que veio substituir o REBAP (Regulamento de Betão Armado Português).

Outro material bastante importante na construção, nos dias de hoje, é sem dúvida o aço. Este é obtido a partir da adição de carbono ao ferro e surgiu no século XVIII. Antes da sua descoberta, o material utilizado era apenas o ferro (fundido ou forjado). Um grande exemplo da utilização do ferro no passado é a Torre Eiffel, da autoria de Gustave Eiffel (França, 1889). O aparecimento do aço veio melhorar as características mecânicas e de durabilidade em relação ao ferro, o que por sua vez relançou a construção metálica. As estruturas metálicas são hoje em dia uma solução interessante e económica na concretização de algumas estruturas, como por exemplo pontes, edifícios industriais, edifícios de escritórios, parques de estacionamento, entre outras.

O documento regulador da construção metálica em Portugal é a Norma Europeia – Eurocódigo 3 que veio substituir o REAEP (Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios Portugueses).

A partir da associação dos dois materiais anteriormente referidos, resultou um novo tipo de estruturas, as estruturas mistas. As estruturas mistas de aço e betão começaram a ser opções

bastante utilizadas por engenheiros e arquitetos sobretudo nos Países desenvolvidos. Estas estruturas conferem uma maior rapidez e um maior aproveitamento dos materiais visto que, desta forma, se tira maior partido dos pontos fortes de ambos.

Os primeiros estudos nesta área começaram a ser desenvolvidos antes da Primeira Grande Guerra (1914-1918) em Inglaterra, Tristão (2001). Mais tarde, em 1944, os sistemas mistos passaram a fazer parte das normas da American Association of Highway Officials (AASHO), hoje denominada por AASHTO.

Durante o séc. XX a construção mista foi vista sobretudo como uma solução bastante satisfatória para pontes. No entanto, nas últimas décadas, tem vindo a ser extensivamente aplicada em todo o tipo de estruturas, sendo atualmente regulamentada pelo Eurocódigo 4. É de destacar que ao longo da história, o constante estudo da construção mista tem levado a um aumento da variedade de tipos de conectores, entre viga metálica e laje de betão, e também a avanços significativos no tipo de análise a realizar sobre os elementos e estrutura.

1.2 Conceito de estrutura mista

Uma estrutura mista é constituída por dois ou mais materiais que estão ligados entre si e trabalham interactivamente, obtendo assim elementos estruturais com melhor comportamento do que aquele que seria de esperar com os materiais a funcionar individualmente. São exemplo disto, as estruturas mistas compostas por uma componente de aço e outra de betão. Podem ser vigas, pilares, lajes, ligações entre outros. Estas combinam as melhores características das duas componentes, ou seja, a grande capacidade de resistir à tração e compressão do aço e do betão, respetivamente. O betão tem ainda a função de fornecer um melhor comportamento estrutural ao fogo da estrutura.

A Figura 1.1 e Figura 1.2 mostram exemplos de aplicação de vigas mistas em construções de edifícios e pontes.

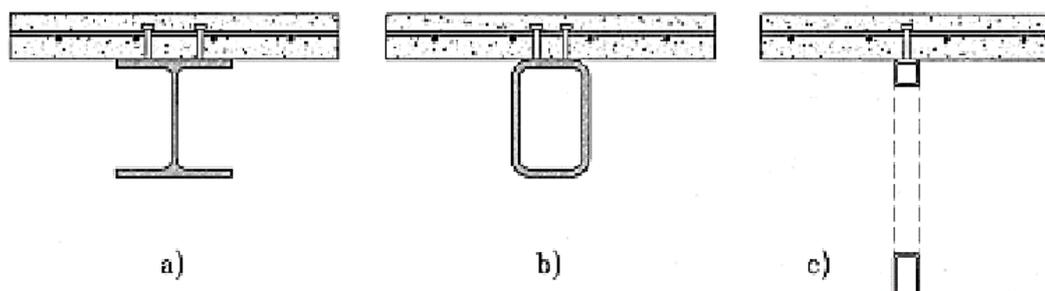


Figura 1.1 - Aplicação de vigas mistas secções em I ou H (a), secção em caixão (b), sistema em treliça (c) (Vianna, 2009)

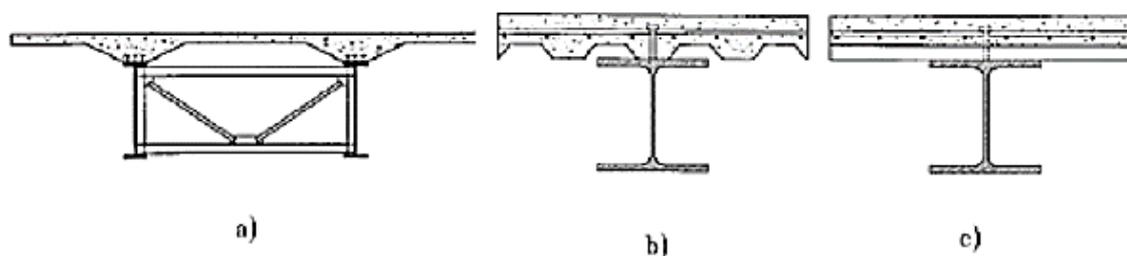


Figura 1.2 - (a) Pontes mistas, (b) e (c) Laje *steel deck* em sistema de piso (Vianna, 2009)

Ao utilizar pavimentos mistos, sendo o aço mais leve que o betão, consegue-se obter uma redução do peso global da estrutura e consequente alívio nas fundações sendo que, desta fora, se obtém também uma diminuição nos custos de obra. Aproveitando as melhores características de ambos os materiais, existe maior facilidade em vencer maiores vãos e diminuir as flechas nas estruturas.

Este facto explica a razão por que a construção mista tem vindo a ter uma grande aplicabilidade em engenharia civil, sendo exemplo disso o seu uso em obras como pontes, edifícios de habitação, comércio e serviços, parques de estacionamento, entre outros.

Para que a interação entre os dois componentes ocorra é necessário que, na interface aço-betão, existam mecanismos capazes de impedir a separação dos dois materiais e absorverem as forças longitudinais de corte que se formam entre estes. Normalmente este efeito é conseguido através de conectores.

Atualmente o conector mais utilizado é o *stud*, também conhecido por conector *Nelson*, desenvolvido na década de 40 pela *Nelson Stud Welding*. No entanto com o evoluir dos estudos nesta área, têm vindo a aparecer outros tipos de conectores tais como *U* ou *channel*, *Hilti X-HVB*, *CR* ou *Crestbond*, *Perfobond* e *T-Perfobond*, entre outros.

1.3 Objetivos

A presente tese tem como objetivo contribuir para a caracterização do comportamento de conectores em estruturas mistas aço-betão, através de ensaios do tipo *push-out*, incidindo principalmente na caracterização estrutural de um tipo inovador de conector: *T-PerfobondUnconnected* submetido a carregamento monotónico. Para avaliar a eficiência de tal conector, foi necessário o estudo do comportamento estrutural do conector *T-Perfobond*, já que este compõe uma parte do conector proposto.

É de salientar que existem estudos anteriormente realizados sobre conectores do tipo *T-Perfobond*, mas os conectores *T-PerfobondUnconnected* são inovadores e tanto quanto se sabe são aqui estudados pela primeira vez.

O objetivo deste trabalho é, essencialmente, estudar o comportamento dos novos conectores propostos a partir de ensaios monotónicos que serão representados em curvas força-escorregamento, e analisados comparativamente por forma a avaliar a importância relativa de cada parâmetro.

Serão aplicados os modelos analíticos existentes para os conectores T-Perfobond com o objetivo de avaliar a sua adequabilidade às ligações em análise, e ainda proposto um modelo analítico para prever a capacidade resistente do conector *T-PerfobondUnconnected*.

1.4 Estrutura do documento

Esta tese inicia-se com o presente capítulo no qual se faz uma pequena introdução ao que se irá estudar e onde se apresentam os objetivos estabelecidos.

O segundo capítulo, Estado do conhecimento, apresenta os conceitos mais relevantes, tais como classificação dos conectores (rígidos ou flexíveis) e *uplift*, assim como alguns tipos de conectores. São apresentados também resultados obtidos por vários investigadores, apresentando as vantagens e desvantagens de cada conector na perspetiva de cada um.

O terceiro capítulo, Programa experimental, apresenta o trabalho experimental realizado, onde são descritas as características geométricas dos provetes e conectores ensaiados. Descrevem-se também os 8 ensaios *push-out* realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, e respetivas instrumentações.

O quarto capítulo, Análise de resultados experimentais, contém uma análise crítica dos resultados obtidos nos ensaios experimentais monotónicos.

O quinto capítulo, Comparação de resultados, apresenta uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente com modelos analíticos existentes e com resultados experimentais obtidos por outros autores.

No sexto capítulo, Proposta de um modelo analítico, propõe-se uma equação para o cálculo da capacidade de carga do conector proposto, o T-PerfobondUnconnected.

O sétimo e último capítulo, Considerações finais, tece as principais conclusões sobre o estudo realizado.

2 ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 Considerações iniciais

As vigas mistas têm sido usadas, ao longo da história, em diversas construções de pontes e edificações. O elemento essencial para garantir a ação mista entre o perfil de aço e a laje de betão são os conectores de corte, pois são estes que, impedindo ou limitando o deslocamento relativo entre o elemento metálico e o elemento de betão, permitem que toda a peça funcione em conjunto, transmitindo as forças de corte entre o betão e o aço.

A resistência da ligação pode ser influenciada pela capacidade de os conectores redistribuírem as cargas. Esta circunstância aponta a relevância da curva força-deslocamento no desempenho global. Os aspetos mais importantes relacionados com a curva força-deslocamento são a rigidez, a resistência e a ductilidade.

A Figura 2.1 mostra a relação força-deslocamento típica em conectores vulgarmente utilizados na construção mista.

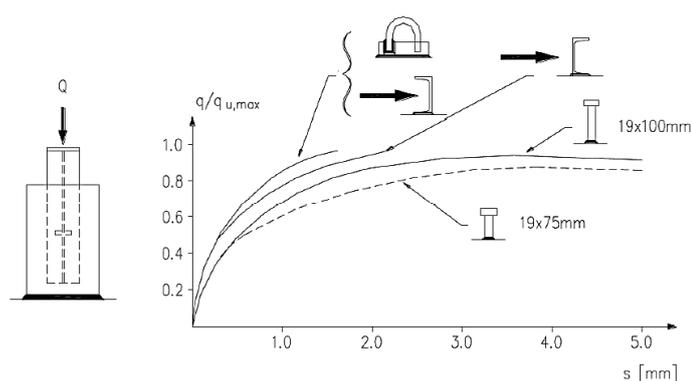


Figura 2.1 – Curva força-deslocamento em conectores vulgarmente utilizados (Cosenza & Zandonini, 1999)

2.1.1 Grau de conexão

Ensaaios realizados em estruturas mistas mostram que a resistência ao corte pode ser obtida, para baixos valores de carga, por aderência química entre a pasta de cimento e a superfície metálica. Contudo, com o aumento do carregamento, a aderência química é quebrada, não podendo ser reestabelecida. A transmissão das forças de um material para o outro, é então assegurada por dispositivos denominados por conectores.

A interação entre os dois materiais será tanto maior quanto menor for o deslizamento relativo entre estes. O grau de conexão entre os dois materiais é considerado como:

- Nulo – o deslizamento entre os materiais é livre, não existindo conectores;
- Total – a força de corte é totalmente mobilizada pelos conectores, levando a que ambos os materiais se deformem como sendo uma única peça;
- Parcial – corresponde a uma solução intermédia entre os anteriores.

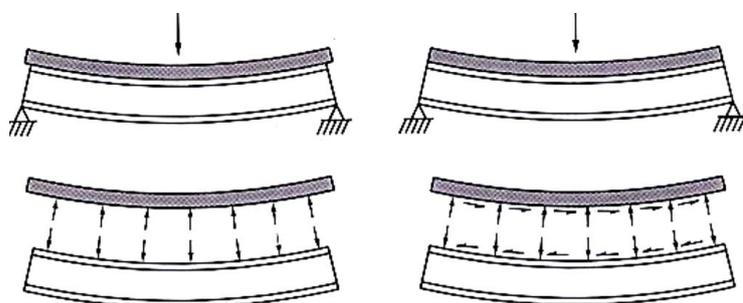


Figura 2.2 - Exemplo de grau de conexão nulo (à esquerda) e total (à direita), Queiroz et.al (2001).

Em vigas mistas com conexão total, o momento resistente é atingido com a plastificação da secção, sendo o seu dimensionamento possível de realizar através de tensões uniformes, assumindo que os dois materiais se deformam como uma peça única, sem haver deslizamento do betão em relação ao aço. Ou seja, em vigas com conexão total a resistência das mesmas à flexão está condicionada apenas pela resistência da viga de aço ou pela laje de betão, a que for menor.

As principais consequências do tipo de conexão revelar-se-ão na deformação máxima vertical da viga, assim como na tensão normal nela registada. Para o caso de uma viga simplesmente

apoiada constituída por duas secções retangulares idênticas, do mesmo material, e no caso de uma conexão total, a deformação máxima é cerca de um quarto, e a tensão máxima cerca de metade, comparativamente a uma conexão nula. (Johnson, 1994)

O grau de conexão pode ser determinado pela expressão (2.1):

$$\eta = \frac{n_{cp}}{n} = \frac{N_{cp}}{N} \quad (2.1)$$

Em que:

n - representa o número mínimo de conectores para que se possa considerar um grau de conexão total;

n_{cp} - representa o número de conectores que leva a conexão parcial;

N - é a força de conexão no betão quando existe conexão total;

N_{cp} - é a força de compressão no betão para um grau de conexão parcial.

O grau de conexão pretendido é normalmente definido pelo projetista, tendo em conta naturalmente fatores económicos e construtivos.

2.1.2 Classificação de conectores

Os conectores são classificados em dois grupos distintos, conectores flexíveis ou rígidos. Os conectores flexíveis apresentam uma menor relação força-deslizamento, ou seja, maior capacidade de deformação. Estes deformam-se, permitindo que haja um deslizamento relativo entre o aço e o betão, apresentando rutura dúctil. Já o conector rígido, não se deforma tanto como o flexível e proporciona uma conexão praticamente sem deslizamento relativo entre o aço e o betão. O seu modo de falha é normalmente caracterizado por rutura frágil, com esmagamento ou cisalhamento do betão, indesejável por questões de segurança estrutural.

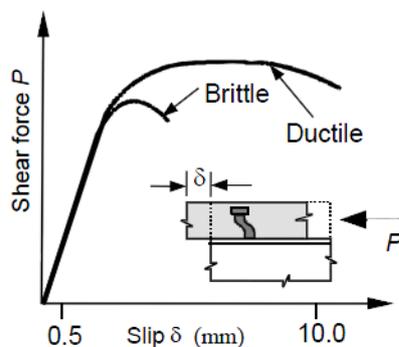


Figura 2.3 - Classificação dos conectores e suas curvas características (Figueiredo et al, 2012)

Um conector é classificado como dúctil se o valor característico da capacidade de deformação (δ_{uk}) for igual ou superior a 6mm, segundo a recomendação do Eurocódigo 4.

Uma rotura dúctil caracteriza-se por se registar um aumento de deformação com um aumento de carregamento, sendo que mesmo após atingir a sua resistência última, este continuar-se-á a deformar sem entrar em colapso, permitindo assim uma redistribuição de forças para os conectores vizinhos levando-os a atingir a sua resistência máxima e aumentando a resistência global da peça. No caso de uma rotura frágil, regista-se uma eventual diminuição gradual da rigidez da peça até á rotura, sendo que esta se regista bruscamente, ao contrário dos casos de rotura dúctil.

2.1.3 Uplift

Este é um fenómeno que se define como sendo a desagregação vertical entre o perfil metálico e a laje de betão, devido à ocorrência de tensões de tração transversais ao plano da peça. Tensões de tração estas que podem ocorrer, por exemplo, quando a carga é aplicada ao elemento inferior (cargas suspensas).

Normalmente as forças de levantamento (*uplift*) são muito inferiores às forças de escorregamento. Por essa razão e, de acordo com o Eurocódigo 4, não é necessário o cálculo da resistência dos conectores para este tipo de forças quando estes apresentem uma forma adequada que lhes confira alguma resistência ao *uplift*.

2.2 Conectores

2.2.1 Conector tipo Stud

O conector tipo *stud* foi desenvolvido na década de 40 pela *Nelson Stud Welding*. Trata-se de um conector circular com cabeça numa das extremidades, sendo a outra soldada num perfil de aço como mostra a Figura 2.4.

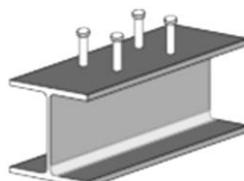


Figura 2.4 - Conectores do tipo “stud”, (Veríssimo et al, 2006)

Este tipo de conector é o mais utilizado na atualidade, sendo que, na atual versão do Eurocódigo 4, este tipo de conector é o único que está associado a uma metodologia de dimensionamento e apresenta ainda, uma vasta gama de geometrias possíveis especificando as características de cada elemento constituinte do *stud*. Normalmente estes conectores têm definidas dimensões padrão que podem ser consultadas em diversos catálogos.

As desvantagens deste conector são, apresentar limitações quando solicitado a ações cíclicas, a necessidade de um equipamento de solda especial, que inclui um gerador de grande potência no estaleiro de obras caso a sua instalação não seja realizada em fábrica, e a pouca resistência de cada conector em particular, sendo necessário um elevado número de conectores em vigas mistas, com espaçamento contínuo e relativamente reduzido. A necessidade da colocação de um número elevado de conectores, torna esta opção pouco apetecível quando se pretende, por exemplo, efetuar a reabilitação e reforço de uma laje por incorporação de vigas metálicas, com funcionamento misto. Algumas das suas vantagens são a rapidez da sua colocação, não constituírem obstáculo à armadura presente nas lajes, facilitando a colocação da mesma, e o seu custo competitivo associado á produtividade que proporciona.

A resistência ao corte de um conector tipo *stud* é dada pela menor resistência entre a resistência do conector e a resistência do betão envolvente. O Eurocódigo 4 (CEN, 2004), fornece as seguintes expressões de dimensionamento.

$$P_{Rd} = \frac{0,8 f_u \left(\frac{\pi d^2}{4}\right)}{\gamma_v} \quad (2.2)$$

$$P_{Rd} = \frac{0,29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_v} \quad (2.3)$$

Em que:

f_u é a resistência última à tração do aço do conector;

d é o diâmetro do fuste do conector;

f_{ck} e E_{cm} são a resistência característica do betão à compressão e o seu módulo de elasticidade secante;

O parâmetro α é dependente da altura nominal do conector.

A equação (2.2) e equação (2.3), são relativas à resistência do conector e à resistência do betão envolvente, respetivamente.

2.2.2 Conector tipo “C”

Os conectores tipo C consistem num perfil U cortado, podendo ser laminado ou enformado a frio. Devido à orientação do conector (Figura 2.5) é necessária a colocação de uma “gravata” para fornecer ao conector resistência suficiente ao *uplift*. Este tipo de conector tem um comportamento rígido, tornando-o impopular entre vários autores e projetistas.

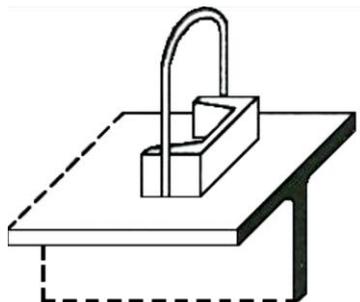


Figura 2.5 - Conector rígido tipo C (Eurocódigo 4, CEN 1994)

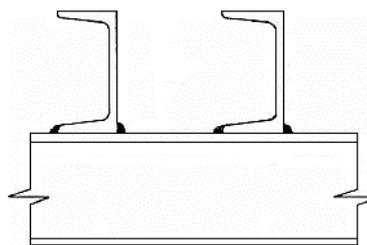


Figura 2.6 - Channel conector (Johnson, 1994)

Outra disposição para este tipo de conectores é a ilustrada na Figura 2.6. Esta disposição melhora o comportamento do conector quanto à sua ductilidade e resistência ao *uplift*.

As principais vantagens deste tipo de conector são o bom desempenho na presença de cargas cíclicas, ou seja, um bom comportamento à fadiga.

2.2.3 Conector tipo “X-HVB” da Hilti

O conector tipo X-HVB (Figura 2.7) foi desenvolvido pela *Hilti Corporation*. Têm maior utilidade quando é necessário providenciar uma resistência adicional em lajes mistas visto que a sua aplicação é bastante flexível e ganham vantagem aos conectores de soldadura quando se trata da sua aplicação em chapas perfiladas de espessura reduzida, podendo ser instalado através do deck metálico por meio de fixadores pirotécnicos. Esta forma de ligação apresenta a vantagem de não necessitar de soldaduras, não sendo necessária mão de obra qualificada nem energia elétrica para a sua aplicação.

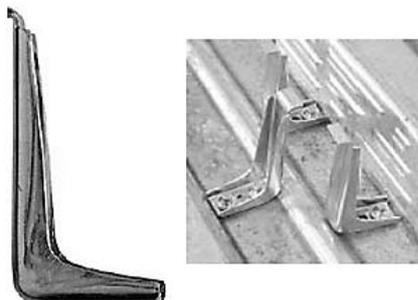


Figura 2.7 - Conectores da *Hilti* X-HVB (<http://www.hilti.pt>, 2012)

2.2.4 Conector CR ou “*Crestbond*”

Veríssimo et al (2006) desenvolveram um tipo de conector alternativo ao *Perfobond*, chamado *Crestbond*, que é formado por uma chapa contínua dentada (Figura 2.8). Uma das vantagens deste tipo de conector é a configuração das aberturas que facilitam a disposição das armaduras da laje. Este conector garante a desejada resistência ao corte, assim como uma boa resposta ao efeito de *uplift*. Outras vantagens deste tipo de conector são a facilidade de produção em grande escala, poder assumir diferentes tamanhos e formas e apresentar maior resistência, quando comparado com os *studs*.

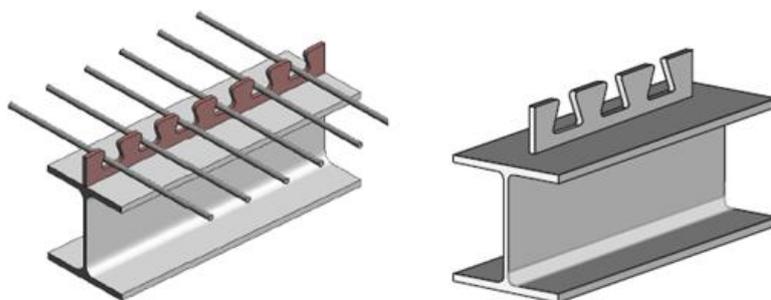


Figura 2.8 - Conector tipo *crestbond* contínuo à esquerda e interrompido à direita (Veríssimo et al, 2006)

Tendo por base resultados obtidos por via experimental (Veríssimo et al, 2006), este tipo de conector apresenta uma capacidade resistente próxima do dobro dos conectores tipo *stud* (em grupo), revelando-se também uma solução mais rígida.

Quanto à ductilidade destes conectores, apresentam maior rigidez para cargas de serviço que os *studs*. Contudo, a rotura de ligações com estes conectores não se dá por corte do conector

e, a deformação final é muito elevada, o que se traduz numa rotura dúctil. (Veríssimo et al, 2006)

2.2.5 Conector *Perfobond* e *T – Perfobond*

O conector de corte do tipo *Perfobond* foi primeiramente desenvolvido por uma empresa sediada em Estugarda, na Alemanha, “Leonhardt, Andra, & Partners” para a construção da terceira ponte sobre o rio Caroni, Venezuela. Este tipo de conector consiste numa chapa de aço, com um número limitado de furos, soldada à viga metálica e embebida no betão pelo qual a laje é formada, criando-se assim, na zona dos furos, cilindros de betão, os quais providenciam a resistência ao corte longitudinal e evitam a separação vertical na interface aço-betão, *uplift*,

Figura 2.9.

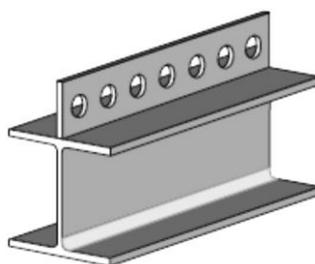


Figura 2.9 - Conector tipo *Perfobond* (Veríssimo et al, 2006)

Este conector apresenta vantagens quando comparado com o conector do tipo *stud*. Exemplo disso é a possibilidade de assumir diferentes tipos de formas e tamanhos e serem facilmente soldados ao elemento metálico sem necessidade de equipamentos especiais, podendo a soldadura ser efetuada tanto em obra como em fábrica.

Inúmeros ensaios, do tipo *Push-out*, têm vindo a ser realizados, por diversos autores, com o intuito de aferir a resistência do conector *perfobond*. Dos ensaios concluiu-se que, diversos parâmetros geométricos e do material influenciam significativamente o seu comportamento estrutural. De entre esses parâmetros destacam-se a resistência à compressão do betão, o número de furos, a espessura e dimensões da placa, e a quantidade de armadura transversal utilizada. São de referir os trabalhos de Machacék e Studnicka, Veríssimo et al, Vellasco et al, e de Ferreira, que adaptou a geometria do *Perfobond* para menor espessura de laje com vista à aplicação em lajes de edifícios residenciais.

Devido à sua grande resistência, os conectores *Perfobond* permitem a sua colocação mesmo quando a laje já se encontra betonada, por meio de furos nesta, para efeitos de reabilitação de

estruturas (Costa Neves e Lima, 2005). Este processo apenas é possível visto que, sendo estes conectores capazes de mobilizar grande resistência, o número de furos a abrir para a colocação dos mesmos é diminuto, não comprometendo a segurança estrutural durante a reabilitação.

Alguns autores estudaram conectores alternativos que permitissem aumentar a capacidade resistente do *Perfobond* ao mesmo tempo que incorporassem outras vantagens. Desses estudos terá resultado, entre outros, o conector *T-perfobond* proposto por Vianna (2009) - Figura 2.10.



Figura 2.10 - Conector *T-Perfobond*

Vianna (2009), concluiu que este tipo de conector apresenta maior resistência quando comparado com o *Perfobond*, para geometrias de chapas semelhantes na direção longitudinal. No entanto, apresenta menor capacidade de deformação, não satisfazendo o critério de ductilidade do Eurocódigo 4. Uma grande vantagem de se utilizar este tipo de conector é ser produzido a partir de perfis laminados comerciais, não sendo necessário produzir um novo elemento de ligação específico.

2.3 Estudos relevantes sobre conectores *T-Perfobond*

2.3.1 Avaliação do comportamento estrutural de conectores *Perfobond* e *T-Perfobond* para vigas mistas (Vianna, 2009)

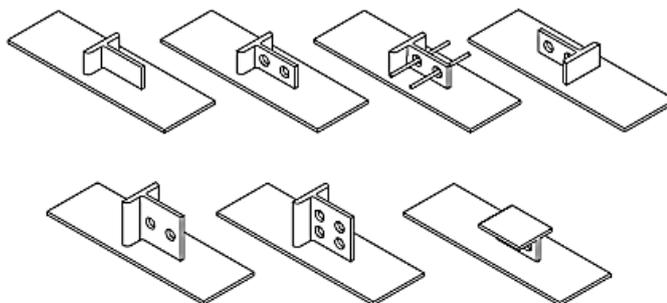
Vianna (2009), no âmbito da sua tese para obtenção do título de doutor em engenharia civil, estudou o comportamento de conectores do tipo *Perfobond* e *T-Perfobond*, variando vários parâmetros como estribos e classe de betão constituintes das lajes, armadura passante nos furos dos conectores e disposição dos conectores. Os conectores foram todos submetidos a

ensaios do tipo push-out, divididos em quatro séries, realizadas no Laboratório de Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, e outras duas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, no Brasil.

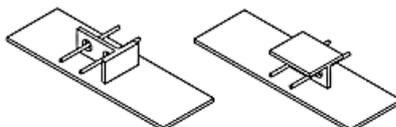
Ao longo da elaboração da sua tese, Vianna em conjunto com outros investigadores, terá publicado alguns artigos baseados nos ensaios realizados. Os respetivos artigos serão também referidos neste capítulo.

Apresenta-se em seguida, Figura 2.11, as últimas quatro séries de ensaios, referentes apenas aos T-Perfobond.

Terceira Série - Conectores *T-Perfobond*



Quarta Série - Conectores *T-Perfobond*



SEGUNDA ETAPA – BRASIL

Quinta e Sexta Série - Conectores *T-Perfobond*

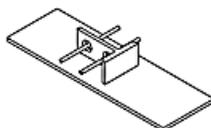
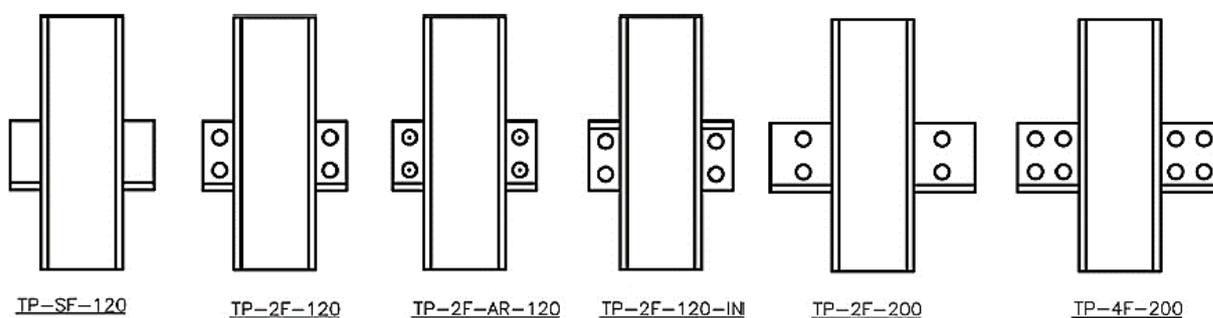


Figura 2.11 – Conectores *T-Perfobond* por etapas (Vianna 2009)

A geometria dos provetes, pertencentes à terceira série de ensaios, apresenta-se no Quadro 2.1 e na Figura 2.12.

Quadro 2.1 – Características geométricas dos modelos testados (Vianna et al, 2008)

| Type | Slab | | | T-Perfobond Rib | | | | | Reinforcement bars | | |
|------------------|------------------|------------|------------|-----------------|----------|----------|----------|-----|--------------------|------|-------------|
| | f_{ck}^a (MPa) | t_c (mm) | H_c (mm) | h_{sc} (mm) | l (mm) | t (mm) | D (mm) | n | Bars in holes | nI | ϕ (mm) |
| TP-SF-120-A/B | 43.9 (C35/45) | 120 | 650 | 76.2 | 170 | 12.2 | 35 | 0 | 0 | 10 | 10 |
| TP-2F-120-A/B | | 120 | 650 | 76.2 | 170 | 12.2 | 35 | 2 | 0 | 10 | 10 |
| TP-2F-AR-120-A/B | | 120 | 650 | 76.2 | 170 | 12.2 | 35 | 2 | 2 | 12 | 10 |
| TP-2F-120-A/B-IN | | 120 | 650 | 76.2 | 170 | 12.2 | 35 | 2 | 0 | 10 | 10 |
| TP-2F-200-A/B | | 200 | 650 | 150 | 170 | 12.2 | 35 | 2 | 0 | 10 | 10 |
| TP-4F-200-A/B | | 200 | 650 | 150 | 170 | 12.2 | 35 | 4 | 0 | 10 | 10 |



a) Conectores T-Perfobond em laje de 120mm

b) Conectores T-Perfobond em laje de 200mm

Figura 2.12 – Geometria dos conectores testados (Vianna, 2009)

Apenas o provete TP-2F-120-IN apresenta a disposição dos conectores tal como foram estudados na presente dissertação. Sendo que todos os outros apresentam o conector numa posição invertida, que é considerada como posição não invertida por Vianna (2009). Os resultados obtidos para o conjunto de ensaios pertencente à terceira série encontram-se no Quadro 2.2. A resistência média, em provetes cúbicos, do betão utilizado nesta série de ensaios foi de 53,91MPa, equivalente a 43,9MPa em provetes cilíndricos.

No Quadro 2.2 apresentam-se os resultados, obtidos por Vianna (2009), pertencentes à terceira serie de ensaios.

Quadro 2.2 – Resultados dos ensaios pertencentes à terceira série (Vianna, 2009)

| Protótipo | Idade dias | qu,test kN | Prk kN | δ_u mm | δ_{uk} mm |
|-----------------|---------------|---------------|-----------|------------------|---------------------|
| TP_SF_120_A | 33 | 621,95 | 559,76 | 1,70 | 1,53 |
| TP_SF_120_B | 33 | 660,55 | 594,50 | 2,25 | 2,03 |
| TP_2F_120_A* | 33 | 563,20 | 506,88 | 2,18 | 1,96 |
| TP_2F_120_B | 34 | 647,90 | 583,11 | 3,40 | 3,06 |
| TP_2F_AR_120_A | 34 | 683,38 | 615,04 | 2,76 | 2,48 |
| TP_2F_AR_120_B* | 34 | | | | |
| TP_2F_120_IN_A* | 34 | | | | |
| TP_2F_120_IN_B | 34 | 714,68 | 643,21 | 4,20 | 3,78 |
| TP_2F_200_A | 34 | 780,35 | 702,32 | 5,18 | 4,66 |
| TP_2F_200_B | 34 | 804,05 | 723,65 | 2,81 | 2,53 |
| TP_4F_200_A | 35 | 750,28 | 675,25 | 5,38 | 4,84 |
| TP_4F_200_B | 35 | 790,25 | 711,23 | 5,42 | 4,88 |

*Os resultados desses ensaios foram descartados devido a problemas com a prensa ou com a geometria do ensaio.

Tendo em conta os resultados apresentados no Quadro 2.2, em particular o ensaio do TP-2F-120 e TP-2F-120-IN que apenas diferem na sua disposição, conclui-se que o conector *T-Perfobond* apresenta melhores características, tanto em termos de resistência como capacidade de deslizamento, quando utilizado na posição do provete TP-2F-120-IN. No entanto não cumpre os critérios de ductilidade recomendados no Eurocodigo 4. A mesma conclusão pode ser constatada no gráfico força-deslocamento, presente na figura seguinte, (Figura 2.13).

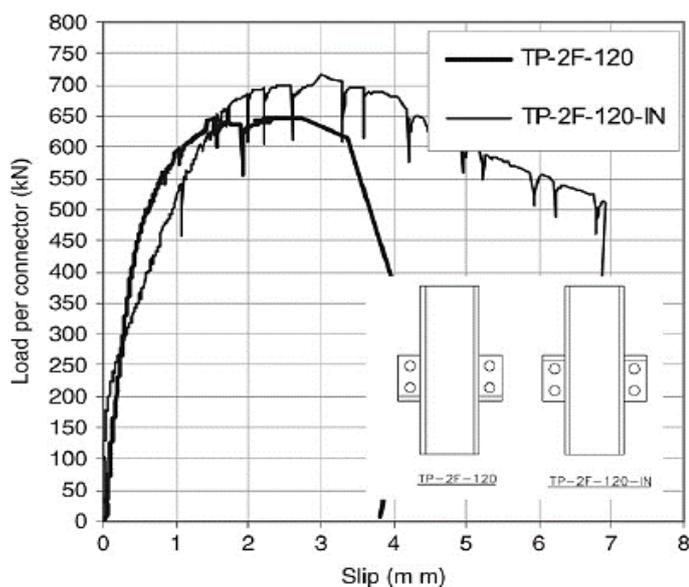


Figura 2.13 - Curva força vs deslocamento dos conectores *T-Perfobond* em lajes de 120mm (Vianna et al, 2008)

Vianna et al (2008), concluíram que no ensaio do conector TP-2F-120, sendo a frente de contacto com o betão o banzo do conector, este mobiliza quase toda a resistência nessa zona sem a participação dos furos do conector. Por outro lado, no ensaio do TP-2F-120-IN, a frente de contacto com o betão é a alma do conector, e os buracos são certamente mobilizados, o que resulta num aumento de 10% da resistência característica do conector e de aproximadamente 1,8 milímetros da capacidade de deslizamento.

Na quarta série de ensaios, foi avaliada a influência da variação da armadura passante nos furos do conector *T-Perfobond* na posição invertida, segundo Vianna (2009). A autora concluiu que houve um ganho tanto na capacidade de deslizamento como na capacidade de carga ao aumentar o diâmetro da armadura.

Apresenta-se no Quadro 2.3, os resultados obtidos para os T-Perfobond desta série. O betão utilizado para estes conectores apresentava uma resistência média para provetes cúbicos de 38,61MPa.

Quadro 2.3 – Resultados da quarta série (Vianna,2009)

| Protótipo | Idade dias | qu,test kN | Prk kN | δ_u mm | δ_{uk} mm |
|----------------------|---------------|---------------|-----------|------------------|---------------------|
| TP-2F-AR-120-A-IN-10 | 19 | 585,30 | 528,77 | 2,54 | 2,29 |
| TP-2F-AR-120-B-IN-12 | 19 | 649,10 | 584,19 | 4,19 | 3,77 |

A configuração dos conectores utilizados, na quinta e sexta série, apresenta-se em seguida, na Figura 2.14. Nestas séries apenas foi estudado o conector T-perfobond na posição invertida, segundo Vianna (2009).

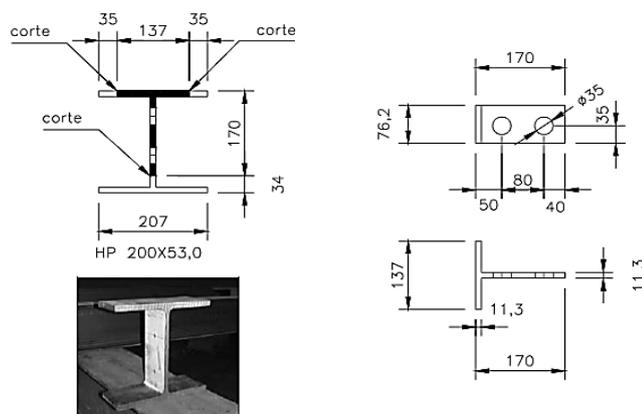


Figura 2.14 - Configurações dos conectores T-Perfobond, segunda etapa (Vianna, 2009)

A quinta série, composta por seis ensaios, serviu para avaliar a influência da variação de armadura passante nos furos do conector (12mm ou 16mm) e dos estribos da laje (10mm ou 12mm). No entanto, sendo que os primeiros três ensaios terão corrido mal, devido à presença de neoprene na base das lajes, foi necessário a realização da sexta serie, composta por dois ensaios sem neoprene, para análise do conector TP-2F-AR-IN-10-12.

O Quadro 2.4 apresenta os ensaios realizados na segunda etapa.

Quadro 2.4 - Ensaios Push-out, segunda etapa (Vianna, 2009)

| Série | Tipo | Nomenclatura | f_c (MPa) | Armadura nos furos | | Total |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-------------|--------------------|-------------|----------|
| | | | | presença | ϕ (mm) | |
| 5 | T-Perfobond Invertido | TP-2F-AR-IN-10-12-A/B | 25,7 | sim | 12 | 6 |
| | | TP-2F-AR-IN-10-16-A/B | 29 | sim | 16 | |
| | | TP-2F-AR-IN-12-16-A/B | 26 | sim | 16 | |
| 6 | T-Perfobond Invertido | TP-2F-AR-IN-10-12-C/D | 35,3 | sim | 12 | 2 |
| TOTAL | | | | | | 8 |

Os resultados finais para análise da segunda etapa são os apresentados no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Resultados dos ensaios da segunda etapa (Vianna, 2009)

| Protótipo | $q_{u, test}$ (kN) | P_{rk} kN | $q_{u, test}$ <i>norm.</i> (kN) | P_{rknorm} (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 |

Vianna (2009), concluiu que para os ensaios de *push-out*, caso se utilize o neoprene, a espessura máxima utilizada deve ser de 5mm, como foi adotado na primeira etapa, ao invés de 15mm, adotado nos primeiros ensaios da segunda etapa, pois altera o comportamento dos ensaios push-out. Verificou também que ao aumentar as armaduras passantes dos furos, não houve ganho significativo na capacidade de carga do conector e nem na ductilidade do ensaio, ao contrário do que se esperava. O ensaio que utilizou a armadura passante de 12mm, apresentou uma capacidade de deslizamento em torno de 31% acima do ensaio que utilizou a armadura com 16mm de diâmetro. A falta de um controle eficaz na aplicação da carga de forma manual, pode ter influenciado nos resultados.

Em suma Vianna (2009), concluiu que o aumento das armaduras dos estribos tem maior contribuição para o ganho da capacidade de carga e de deslizamento, do que o aumento das armaduras dos furos.

No seguimento da pesquisa efetuada por Vianna (2009), Vianna et al (2012) apresentam três novas geometrias de conectores *T-Perfobond* para utilização em vigas mistas sob momentos positivos, que agora denominam de *T-Perfobond Light*. Estes foram então comparados com os resultados obtidos na segunda etapa e com um perfobond estudado na primeira etapa dos ensaios realizados por Vianna (2009).

Quadro 2.6 - Características dos modelos ensaiados (Vianna et al, 2012)

| Ensaio | Tipo | Laje | | Conectores | | | Armadura | | |
|--------------|----------|-----------|-----------------------|------------|---------|----------------|-------------------|----|----|
| | | fck (MPa) | l (mm) | tf (mm) | tw (mm) | Arm. Furo (mm) | Arm. Estribo (mm) | | |
| Perfo-bond | 1ª etapa | 2ª série | P-2F-AR-120-A / B | 52 | 180 | - | 13 | 12 | 10 |
| | | 6ª série | TP-2F-AR-120-HP200x53 | 35,2 | 180 | 11,3 | 11,3 | 12 | 10 |
| T-Perfo-bond | 2ª etapa | 5ª série | TP-2F-AR-120-HP200x53 | 29,2 | 180 | 11,3 | 11,3 | 16 | 10 |
| | | 5ª série | TP-2F-AR-120-HP200x53 | 26,0 | 180 | 11,3 | 11,3 | 16 | 12 |
| | 3ª etapa | W200x15 | TPL-2F-AR-120-IN-15 | 30,57 | 170 | 5,2 | 4,3 | 12 | 10 |
| | | W200x19,3 | TPL-2F-AR-120-IN-19 | 32,73 | 170 | 6,5 | 5,8 | 12 | 10 |
| | | W200x22,5 | TPL-2F-AR-120-IN-22 | 28,4 | 170 | 8 | 6,2 | 12 | 10 |

Os resultados e a geometria dos *T-Perfobond Light* estudados são apresentados na Figura 2.15 e Figura 2.16.

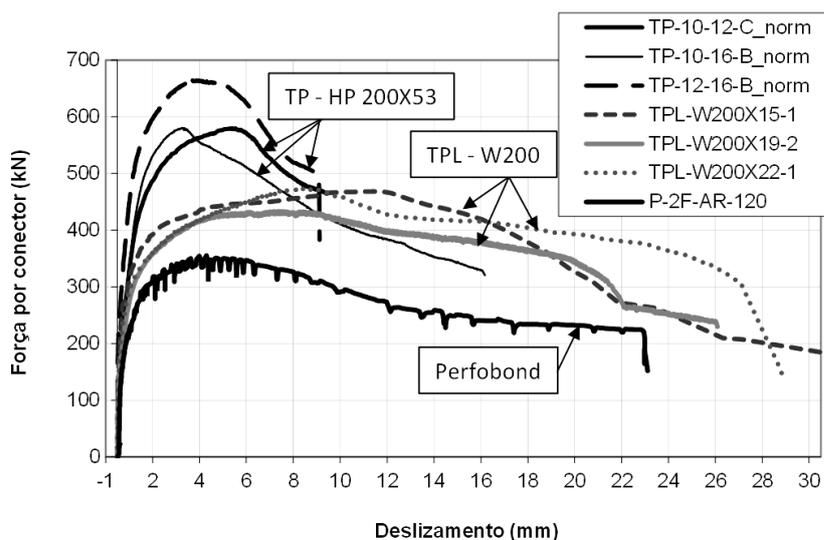


Figura 2.15 - Comparação do *Perfobond* versus *T-Perfobond* (Vianna et al 2012)

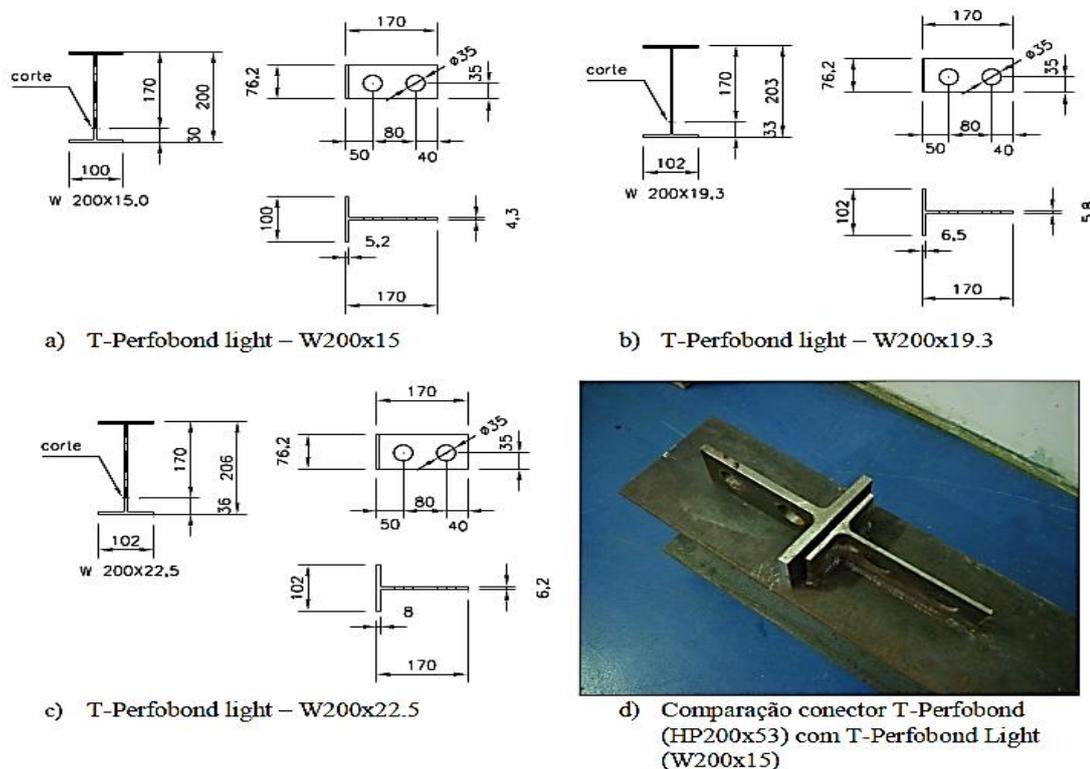


Figura 2.16 - Geometria dos conectores *T-Perfobond Light* (Vianna et al, 2012)

A conclusão a que se chegou foi de que *T-Perfobond Light*, em termos de capacidade de carga, apresentam resultados inferiores ao *T-Perfobond* da segunda etapa, no entanto são dúcteis e apresentam capacidade de carga superior ao conector *Perfobond*.

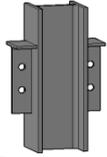
2.3.2 Conectores Perfobond submetidos a carregamento monotónico e cíclico (Figueiredo, 2012)

Figueiredo (2012), em prol da sua tese de mestrado para obtenção do grau de mestre em engenharia civil, estudou quatro tipologias diferentes de conectores, entre os quais o T-Perfobond.

O programa experimental consistiu em ensaios *push-out* e ensaios cíclicos, em que, todos os conectores foram utilizados em lajes de 150mm. O betão utilizado nos ensaios monotónicos era de classe C20/25.

As características dos modelos ensaiados estão presentes no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 - Características geométricas dos ensaios (Figueiredo, 2012)

| Ensaio | Designação | Tipo | Laje de betão | | | | Conector | | |
|-------------|------------|-------------|---------------|---------------|----------------|------------|-----------|----------------|---|
| | | | t_c (mm) | h_c (mm) | Betão (Mpa) | AR (mm) | D (mm) | conector | Geometria |
| T-Perfobond | 5 | TP2F | | | | - | | | |
| | 6 | TP2F-AR12 | 150 | 600 | C20/25 | 2x12 | 30 | T "IPE 300" |  |
| | 7 | TP2F-C | | | | - | | | |
| | 8 | TP2F-AR12-C | | | | 2x12 | | | |

Os resultados obtidos nos ensaios monotónicos são os apresentados em seguida no Quadro 2.8.

Quadro 2.8 – Resultados dos ensaios monotónicos (Figueiredo, 2012)

| Conector/ Ensaio | P_{teste} (kN) | P_{rk} (kN) | δu (mm) | δu_k (mm) |
|------------------|---------------------|------------------|--------------------|----------------------|
| TP2F A | 545,9 | 491,31 | 6,52 | 5,86 |
| TP2F B | | | 2,48 | 2,23 |
| TP2F-AR12 A | 596,82 | 537,14 | 3,92 | 3,53 |
| TP2F-AR12 B | | | 4,80 | 4,32 |

A partir dos resultados obtidos, Figueiredo (2012) verificou que a presença do banzo nos conectores lhes confere um ganho de resistência significativo. Verificou nomeadamente que o ganho de resistência em relação ao conector Perfobond (P2F) de aproximadamente 95% para o TP2F, de 275% para o conector IP2F e de 282% para o conector 2TP2F. Concluiu também que, com a presença de armadura passante nos furos, existe um aumento da capacidade de carga e ductilidade dos conectores. Nenhum dos conectores pôde ser classificado como dúctil (com exceção do TP2F).

2.4 Equações de cálculo da resistência de conectores

2.4.1 Cálculo da resistência do Perfobond

Tendo em vista o cálculo da resistência do conector *Perfobond*, Oguejiofor & Hosain (1994) propuseram, num primeiro estudo, a equação (2.4) que considera a contribuição da laje de betão, a armadura transversal passante nos furos e os cilindros de betão que se formam nos furos.

$$q_u = 4,47h_{sc}t_{sc}f_{ck} + 0,90A_{tr}f_y + (3,30nD^2\sqrt{f_{ck}} + 0,01A_{cc}) \quad (2.4)$$

Com a realização de novos estudos, e através de análises numéricas, Oguejiofor e Hosain (1997) estabeleceram uma nova equação, equação (2.5), que quantifica melhor a capacidade de resistência do conector.

$$q_u = 4,5h_{sc}t_{sc}f_{ck} + 0,91A_{tr}f_y + 3,31nD^2\sqrt{f_{ck}} \quad (2.5)$$

Onde:

q_u é a resistência nominal ao corte do conector (N);

D é diâmetro dos furos do conector (mm);

n é o numero de furos;

h_{sc} é a altura do conector (mm);

t_{sc} é a espessura do conector (mm);

f_{ck} é a resistência característica do betão à compressão em provetes cilíndricos (MPa);

f_y é a tensão nominal das armaduras da laje (MPa);

A_{tr} é a área total das barras de armadura transversal presente na laje (mm²).

Segundo Medberry & Shahrooz (2002), as equações anteriores, equação (2.4) e (2.5), são limitadas a conectores com 12,7mm de espessura, com 50mm de diâmetro nos furos com distância entre centro dos furos igual a duas vezes o diâmetro e para resistência do concreto entre 20 e 40MPa.

Medberry & Shahrooz (2002) propuseram então a equação (2.6), na qual o primeiro termo avalia a contribuição da laje de concreto, o segundo avalia a ligação química, o terceiro a armadura transversal e o último termo a contribuição dos cilindros de betão presentes nos furos.

$$q_u = 0,747bh\sqrt{f_{ck}} + 0,413b_fL_c + 0,9A_{tr}f_y + 1,66n\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2\sqrt{f_{ck}} \quad (2.6)$$

Em que :

b é a espessura da laje de betão (mm);

h é a altura do conector (mm);

b_f é a largura do banzo do perfil metálico (mm);

L_c é o comprimento de contacto entre o betão e o banzo do perfil metálico (mm);

A_{tr} é a área total das barras de armadura transversal presente na laje (mm²);

f_y é a tensão nominal das armaduras da laje (MPa);

n é o número de furos do conector;

D é o diâmetro dos furos do conector (mm);

f_{ck} é a resistência característica do betão à compressão em provetes cilíndricos (MPa).

Al-Darzi et al. (2007) publicaram no *American Journal of Applied Sciences* um artigo, sobre o conector *Perfobond*, onde realizaram um estudo paramétrico utilizando um modelo de elementos finitos com o objetivo de estudar o efeito de vários parâmetros do conector. Estes autores propuseram então a seguinte equação, para o cálculo da sua resistência do conector *Perfobond*:

$$V_u = 255,31 + 7.62 \times 10^{-4} h t f_{ck} - 7,59 \times 10^{-7} A_{tr} f_y + 2,53 \times 10^{-3} A_{sc} \sqrt{f_{ck}} \quad (2.7)$$

Onde:

V_u é a resistência última ao corte do conector (kN);

h é a altura do conector (mm);

t é a espessura do conector (mm);

f_{ck} é a resistência característica do betão à compressão em provetes cilíndricos (MPa);

A_{tr} é a área total de armadura presente nos furos do conector (mm²);

f_y é a tensão nominal do conector (MPa);

$A_{sc} = n \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)$, é a área de betão nos furos do conector. n é o numero de furos do conector e D o diâmetro dos furos.

Ao estudar o conector *Crestbond*, Veríssimo (2007) concluiu que, ao considerar a influência da taxa de armadura e da excentricidade do conector na equação da resistência, obtêm-se resultados mais próximos das medições experimentais. Baseando-se nas conclusões apresentadas por Oguejiofor e Hosain (1994), propôs então a equação (2.8).

$$P = 4,04 \frac{h_{sc}}{b} h_{sc} t_{sc} f_{ck} + 2,37 n D^2 + 0,16 A_{cc} \sqrt{f_{ck}} + 31,85 \times 10^6 \times \frac{A_{tr}}{A_{cc}} \quad (2.8)$$

Em que:

A_{cc} é a área longitudinal de betão ao corte por conector (mm²);

As restantes variáveis são as mesmas já definidas anteriormente.

2.4.2 Conector Tipo Bloco

O Eurocódigo 4 (2001), numa versão anterior, apresentava os conectores tipo bloco (rígidos), Figura 2.17, bem como uma fórmula que permite o dimensionamento deste tipo de conectores.

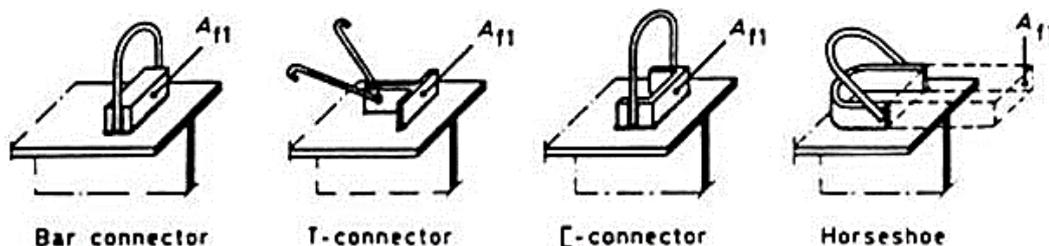


Figura 2.17 - Conectores tipo bloco, Eurocódigo 4 (2001)

A resistência de conector, tipo bloco, é dada pela seguinte equação:

$$P_{Rd} = \eta A_{f1} F_{ck} / \gamma_c \quad (2.9)$$

Onde:

A_{f1} é a área da superfície frontal Figura 2.18;

A_{f2} é a área da superfície frontal aumentada como é mostrado na Figura 2.18;

$\eta = \sqrt{A_{f2}/A_{f1}}$, é um fator que tem em conta a densidade do betão envolvente, mas nunca maior que 2,5 para betão de densidade normal e 2 para betão leve;

γ_c é o fator de segurança do betão.

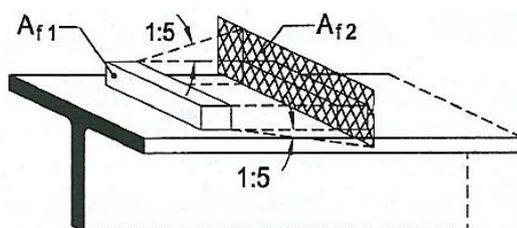


Figura 2.18 – Definição das áreas A_{f1} e A_{f2} (Eurocódigo 4, CEN 1994)

2.4.3 Conector T-Perfobond

Vianna (2009), a partir dos resultados experimentais com conectores *T-Perfobond* e considerando a equação de Al-Darzi et al. (2007) (Equação (2.7)), para o dimensionamento do Perfobond, e a equação (2.9), para o dimensionamento de conectores tipo bloco, realizou uma análise de regressão múltipla e apresentou um modelo aproximado para o dimensionamento de conectores do tipo *T-Perfobond*.

As equações propostas têm em conta a disposição dos conectores presentes na Figura 2.19a, de acordo com o Eurocódigo 4, e os conectores na posição invertida com resistência à compressão do betão inferior a 30MPa e resistência superior a 30MPa.

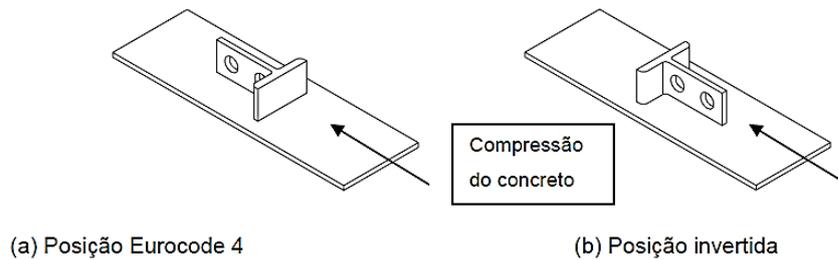


Figura 2.19 – Posição do Conector *T-Perfobond* (Vianna, 2009)

Apresentam-se em seguida as equações propostas por Vianna (2009).

- Figura 2.19a:

$$q_u = 174 + 0,25 \times \left(\sqrt{\frac{A_{f2}}{A_{f1}}} A_{f1} f_{ck} \right) - 1,3 \times 10^{-3} \times (h_{sc} t_{sc} f_{ck}) + 0,55 \times 10^{-3} \times (A_{tr} f_y) - 0,14 \times 10^{-3} \times (A_{sc} \sqrt{f_{ck}}) \quad (2.10)$$

- Conectores *T-Perfobond*, na posição da Figura 2.19b, com resistência a compressão do betão inferior a 30MPa:

$$q_u = -0,43 \times 10^6 - 16,7 \times (h_{sc} t_{sc} f_{ck}) + 84,5 \times (A_{sc} \sqrt{f_{ck}}) \quad (2.11)$$

- Conectores *T-Perfobond*, na posição da Figura 2.19b, com resistência a compressão do betão superior a 30MPa:

$$q_u = 243,5 + 3,14 \times 10^{-3} \times (h_{sc} t_{sc} f_{ck}) + 0,25 \times 10^{-3} \times (A_{tr} f_y) \quad (2.12)$$

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

No Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, no âmbito desta dissertação, realizaram-se um conjunto de ensaios de resistência ao corte de conectores do tipo *T-Perfobond*.

Os conectores considerados neste trabalho são os *T-Perfobond* e uma nova configuração proposta: o *T-PerfobondUnconnected*, formados por metade de um perfil I. A diferença entre os dois tipos analisados é a presença ou não de ligação entre o banzo do conector e o perfil metálico, que confere ductilidade adicional ao sistema.

O motivo de se avaliar os conectores tipo *T-perfobond*, já estudados anteriormente, é dispor de parâmetros para comparação com o novo conector, o *T-PerfobondUnconnected*, e com isto poder avaliar a contribuição efetiva da nova geometria proposta. O conector *T-PerfobondUnconnected* foi projetado com o objetivo de melhorar algumas características da conexão mista.

Os ensaios tiveram como objetivo analisar a influência da variação de parâmetros chave na capacidade resistente do conector proposto e ductilidade do mesmo. Estes serviram também para comparar as propriedades do novo conector com as do já existente *T-Perfobond*.

Foram realizados um total de 8 ensaios do tipo Push-out onde se fez variar a existência ou não de armaduras passantes nos furos, o diâmetro destas ($\phi 10$ e $\phi 16$) e a classe de betão (C20/25 e C25/30).

3.2 Propriedades e características geométricas dos provetes ensaiados

Os conectores foram dimensionados tendo em conta a espessura das lajes de betão utilizadas e respeitando o espaçamento mínimo de $2.25D$ entre o centro de cada furo, de acordo com Oguejiofor e Hosain (1994). Deste modo todos os conectores foram criados com as mesmas dimensões variando apenas o perímetro de solda entre o conector e o perfil metálico a que

está soldado, sendo este o fator que distingue o conector *T-Perfobond* do *T-PerfobondUnconnected* como se pode ver na Figura 3.1 e Figura 3.2.



Figura 3.1 - *T-Perfobond*



Figura 3.2 - *T-PerfobondUnconnected*

As abreviaturas futuramente utilizadas, no nome dos conectores e referentes particularidades, são referentes a: TP – *T-Perfobond*, TPU – *T-PerfobondUnconnected*, AR – Armadura passante nos furos.

Pretendia-se à partida que o conector TPU fosse fabricado sem qualquer soldadura a ligar o banzo do conector ao perfil metálico. No entanto, devido a um lapso no processo de fabrico, todos os conectores vieram iguais, ou seja, todos TP. Assim sendo os perfis tiveram de ser alterados, recorrendo ao corte da soldadura, obtendo assim conectores em que apenas 70%, em média, de cada metade dos banzos se encontra desligada do perfil metálico. Esta alteração não trouxe grande transtorno para o objetivo desta tese visto que, grande parte do banzo acabou por ficar desconectado, acabando-se assim por poder averiguar na mesma a influência desta alteração como era pretendido à partida.

Os conectores foram fabricados a partir de perfis IPE360 em aço S275 (tensão de cedência de 275 MPa, de acordo com EN10025). A secção adotada, para acoplar os conectores, é um perfil HEA200 em aço S275 (tensão de cedência de 275 MPa, de acordo com EN10025).

As armaduras ordinárias têm 10 mm de diâmetro ($\varnothing 10$). As armaduras passantes nos furos dos conectores são de 10 mm ou 16 mm de diâmetro. Todas são em aço A500NR (tensão de cedência de 500 MPa, de acordo com a EN10025).

A classe de resistência dos betões utilizados é, de acordo com o Eurocódigo 2 (CEN, 2004), C20/25 e C25/30 que correspondem a uma resistência característica em provetes cilíndricos, f_{ck} , de 25 MPa e 30 MPa respetivamente.

Os provetes ensaiados, foram criados tendo em conta o especificado no Anexo B do Eurocódigo 4, para ensaios Push-out. A Figura 3.3 mostra o provete *standard* indicada pelo Eurocódigo 4, assim como a posição dos conectores, perfil metálico e lajes de betão armado.

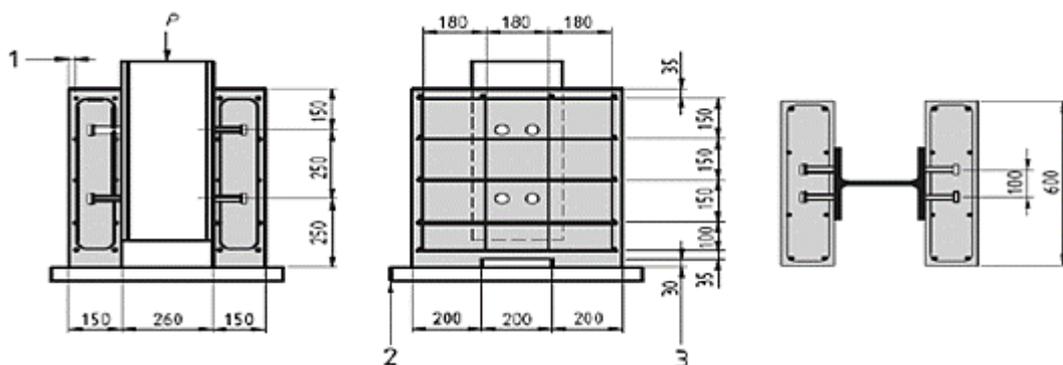


Figura 3.3 - Provede de ensaio “*standart*” (Eurocodigo 4, 2004)

Apresentam-se em seguida as dimensões, e respetivos posicionamento, dos conectores utilizados, Figura 3.4, Figura 3.5 e Quadro 3.1, bem como a geometria dos provetes de ensaio utilizados, Figura 3.6.

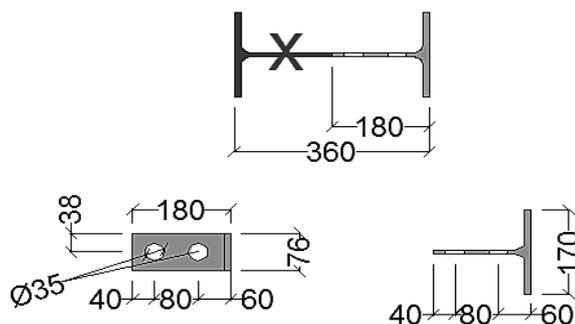


Figura 3.4 - Características geométricas dos conectores (em milímetros)

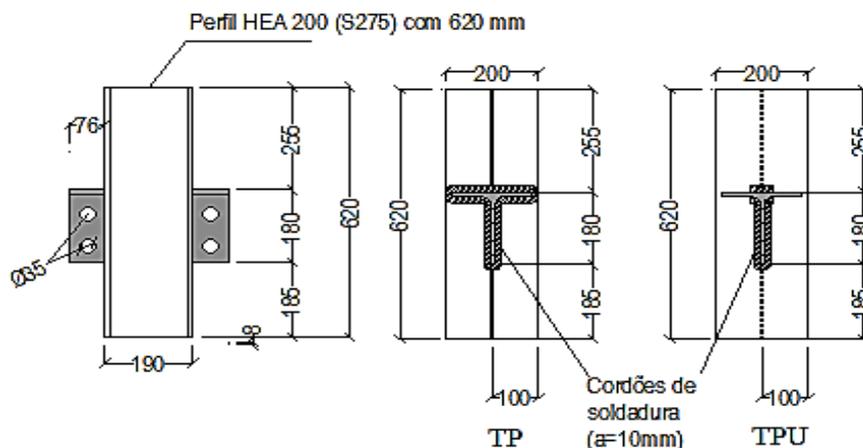


Figura 3.5 - Posição dos conectores no perfil metálico (em milímetros)

Quadro 3.1 – Características geométricas dos ensaios

| Classe do betão | Conector | Laje de betão | | | | Conector | | | | |
|-----------------|----------|---------------|------------|----------|----------|----------|--------|-----------------|------------------|-----|
| | | t_c (mm) | h_c (mm) | l (mm) | h (mm) | AR (mm) | D (mm) | t_{alma} (mm) | t_{banzo} (mm) | n |
| C20/25 e C25/30 | TP | | | | | - | | | | |
| | TPU | 150 | 600 | 180 | 76 | - | 35 | 8 | 12,7 | 2 |
| | TPU_AR10 | | | | | 10 | | | | |
| | TPU_AR16 | | | | | 16 | | | | |

No Quadro 3.1, t_c representa a espessura da laje de betão (mm), h_c representa a largura da laje de betão (mm), l representa o comprimento do conector (mm), h representa a altura do conector (mm), t representa a espessura da chapa do conector (mm), AR representa o diâmetro da armadura passante no furo do conector (mm), D representa o diâmetro dos furos do conector (mm) e n representa o número de furos do conector.

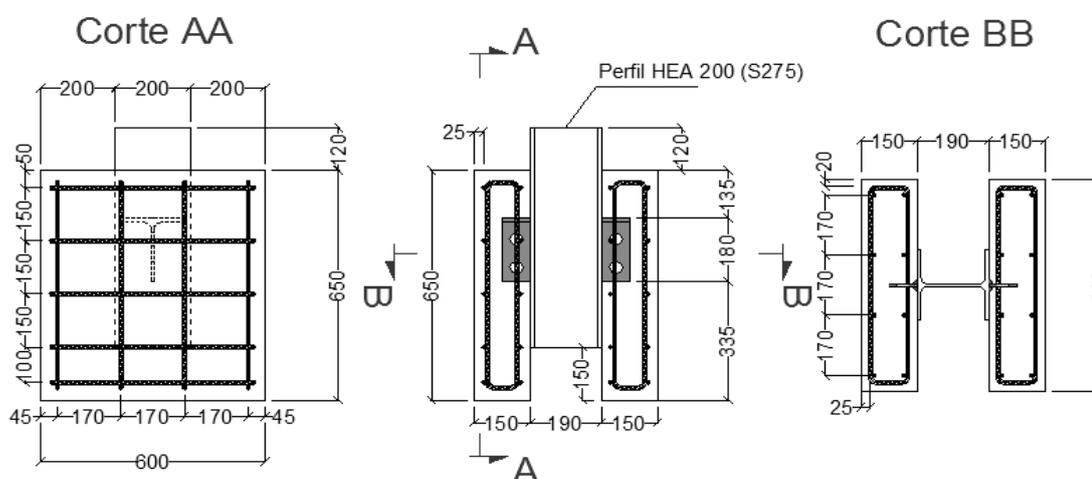


Figura 3.6 - Geometria dos provetes de ensaio (em milímetros)

3.3 Procedimento adotado para o ensaio *push-out*

Os protótipos foram ensaiados em posição normalizada e dentro das recomendações prescritas pelo EUROCODE 4 (2004). O carregamento foi aplicado por uma prensa hidráulica mediante dois procedimentos:

- Numa primeira fase do ensaio, composto pela fase cíclica, foram aplicados 15 ciclos de carga/descarga (controlada pela força) entre as cargas correspondentes a 5% e 40% da carga de rutura expectável.
- Seguidamente, o controle foi feito por deslocamento relativo e com diferentes velocidades, como ilustra a Figura 3.7. A carga foi aplicada monotonicamente até ao colapso.

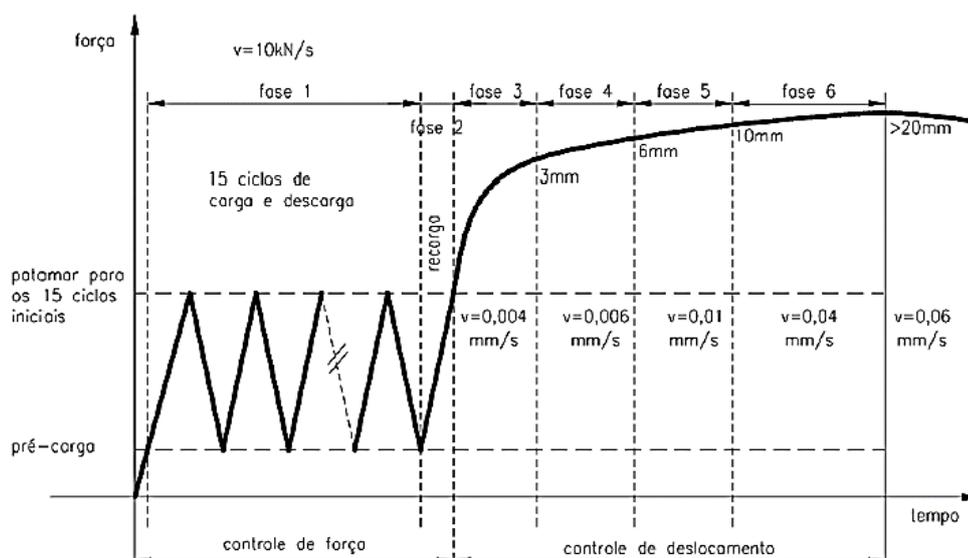


Figura 3.7 - Esquema de controlo de carga do ensaio *push-out* (Vianna 2009 [9])

3.4 Equipamentos utilizados nos ensaios

Os ensaios foram efetuados recorrendo ao equipamento disponível no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Foi utilizada uma prensa hidráulica de 5000 kN e um sistema de aquisição de dados TML TDS-601, com capacidade para 10 canais, em todos os ensaios.

Os equipamentos referidos anteriormente são apresentados na Figura 3.8.

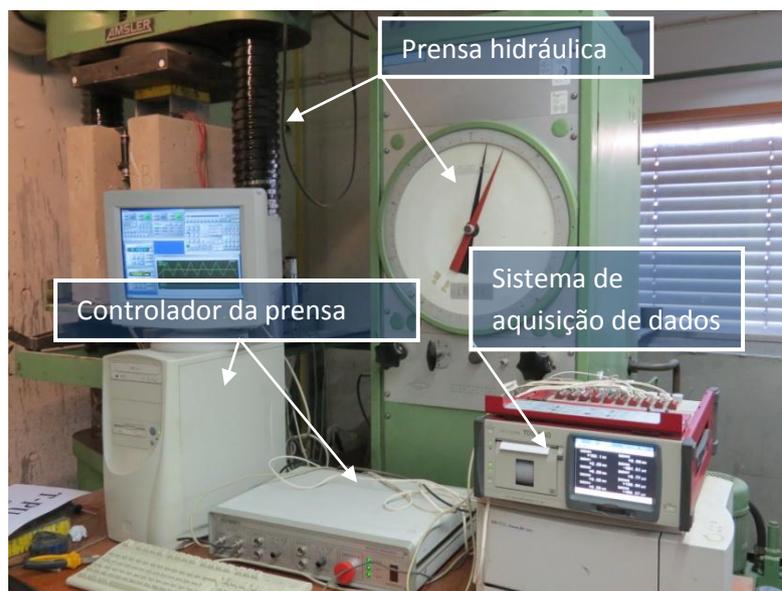


Figura 3.8 - Prensa hidráulica e sistema de aquisição de dados

3.5 Instrumentação dos provetes

A instrumentação dos conectores teve como principal objetivo avaliar as propriedades mecânicas, nomeadamente a carga que leva à plastificação do conector, no caso de ser atingida a fase plástica.

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

- Transdutores de deslocamento (defletómetros ou LVDT's), para avaliar os deslocamentos entre a laje de betão e o conector, assim como o efeito de *uplift*.
- Extensómetros unidireccionais (FLA-6-11) e rosetas de extensómetros (FRA-5-11) para medição das extensões dos conectores em estudo como ilustra a Figura 3.10, Figura 3.11 e Figura 3.12.

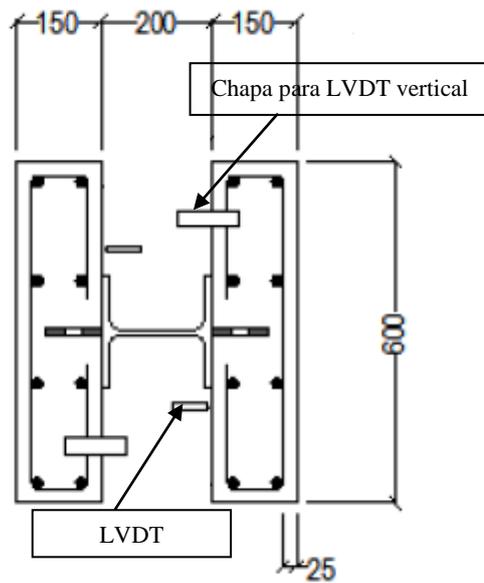


Figura 3.9 - Colocação dos LVDT's

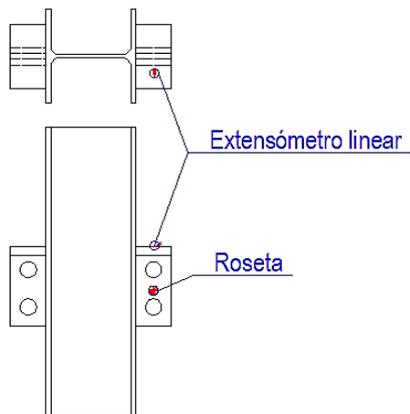


Figura 3.10 - Localização das rosetas e extensómetros em todos os provetes



Figura 3.11 - Colocação dos extensómetros

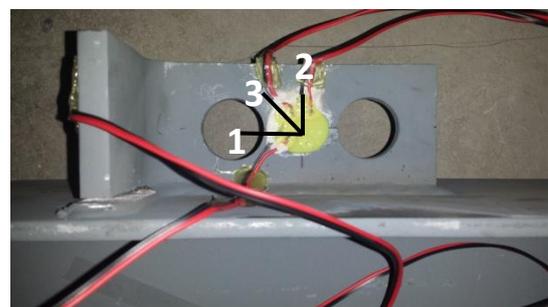


Figura 3.12 – Colocação das rosetas

3.6 Avaliação da resistência última e capacidade de deslizamento

De acordo com a cláusula B.2.5 do Eurocódigo 4, a resistência última característica, P_{Rk} , da conexão deve ser considerada a mínima de três ensaios sobre provetes teoricamente idênticos e reduzida de 10%. Uma vez que apenas foi realizado um ensaio para cada tipologia de conector, a resistência última da conexão é tomada como a obtida experimentalmente reduzida de 10%.

$$P_{Rk} = 0,9P_{\text{teste}}$$

Em que P_{teste} é o valor obtido para a resistência última do ensaio.

A capacidade de escorregamento de um provete, δ_u , é considerada igual ao escorregamento máximo medido ao nível da carga característica, como indicado na Figura 3.13.

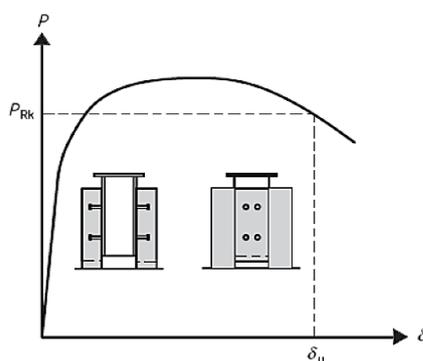


Figura 3.13 - Capacidade de deslizamento δ_u (Eurocódigo 4, CEN 2004)[12]

A capacidade de escorregamento característica, δ_{uk} , é considerada igual ao valor mínimo dos ensaios, δ_u , reduzido de 10%.

A capacidade de deslizamento relativo entre o perfil e as lajes de betão, assim como o efeito de *uplift*, foram medidos instrumentando os provetes com LVDT's, já apresentados na Figura 3.9.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados um total de oito ensaios divididos em dois grupos, com betão de diferentes classes, como anteriormente referido. Os resultados obtidos nos ensaios serão comparados tendo vários objetivos em vista, sendo eles:

- Comparar as características do conector TP com as do conector TPU, proposto nesta dissertação;
- Analisar os ganhos de resistência e ductilidade com a presença ou não de armadura passante nos furos do conector TPU;
- Observar a influência da variação da classe do betão no comportamento do conector TPU.

4.1 Resultados experimentais

A resistência à compressão do betão foi determinada com provetes cúbicos de 15x15x15cm obtendo-se um valor médio de 36,19MPa para o betão 1, e 44,53MPa para o betão 2.

Sendo que posteriormente, no estudo de modelos analíticos, será necessária a resistência do betão em provetes cilíndricos, passou-se então ao cálculo da mesma a partir da equação (4.1), proposta por Montoya *et al.* (1991).

$$f_{ck,cyl} = 0,8 \times f_{ck,cube} \quad (4.1)$$

Onde o valor característico da resistência à compressão do betão é obtido a partir da equação (4.2), segundo o Eurocódigo 2.

$$f_{ck,cube} = f_{cm,cube} - 8 \quad (4.2)$$

Apresenta-se em seguida, Quadro 4.1, as classes de betão, e respetivos valores de resistência, pertencentes a cada betonagem.

Quadro 4.1 - Características do Betão

| 1ª betonagem - 3/Jun | | | | | | |
|-----------------------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Cubo | Dia | fc,cubes (MPa) | fcm,cube (MPa) | fck,cube (Mpa) | fck,cyl (MPa) | Classe betão |
| 1 | 30/Out | 37,19 | | | | |
| 2 | 06/Nov | 34,12 | 36,19 | 28,19 | 22,6 | C20/25 |
| 3 | 13/Nov | 37,26 | | | | |
| 2ª betonagem - 11/Jun | | | | | | |
| 1 | 13/Nov | 41,28 | | | | |
| 2 | 17/Nov | 45,19 | 44,53 | 36,53 | 29,2 | C20/25 |
| 3 | 19/Nov | 47,13 | | | | |

O Quadro 4.2 mostra os resultados obtidos para cada conector. Em cada ensaio *push-out* foram estudados dois conectores iguais, que se distinguem por conector A e conector B, como ilustra a Figura 4.1. No final da nomenclatura de cada conector segue-se também um número que indica a série de ensaios a que pertence, sendo 1 e 2 correspondente aos betões C20/25 e C25/30 respetivamente.

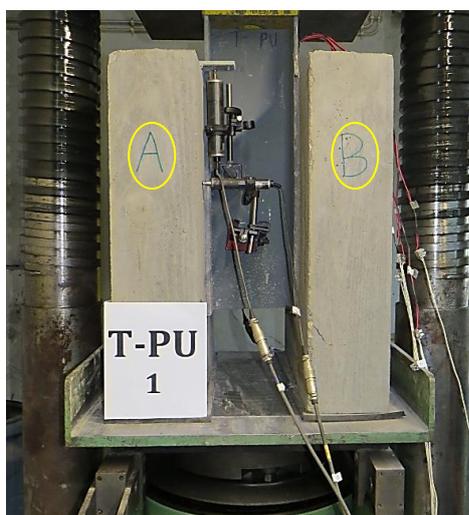


Figura 4.1 – Distinção dos conectores de cada ensaio

Quadro 4.2 - Resultado dos ensaios push-out

| Classe do betão | 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 |

Efetuada uma rápida análise do Quadro 4.2, pode constatar-se que todos os conectores, à exceção do TP da primeira série e dos TPU_AR16 de ambas as séries, apresentam um comportamento dúctil.

A Figura 4.2 apresenta as curvas carga-deslocamento resultantes dos ensaios com conectores *T-Perfobond* com betão C20/25 e 25/30.

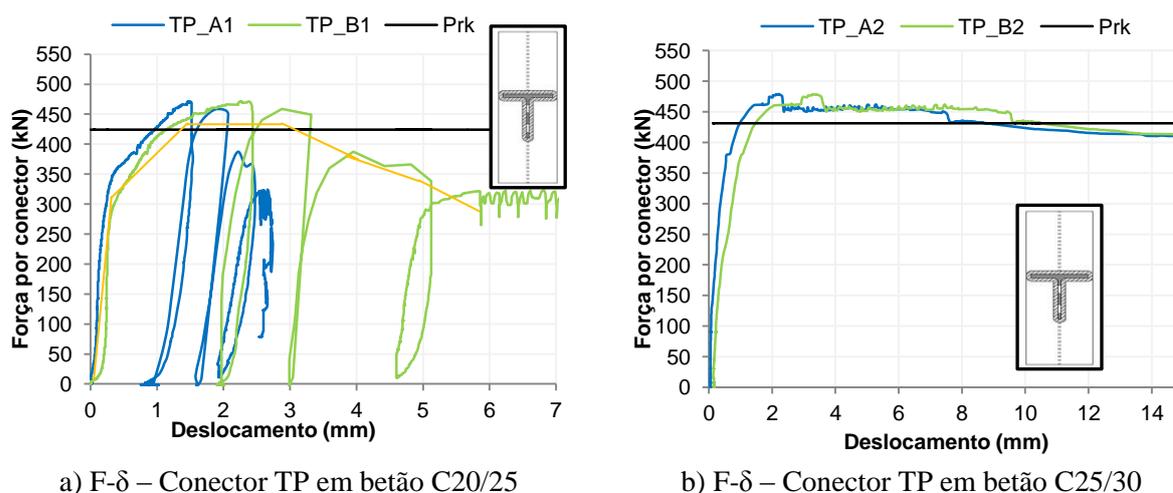


Figura 4.2 - Curva carga/deslocamento para o conector *T-Perfobond*

O Ensaio apresentado na Figura 4.2, em particular o gráfico a), foi o primeiro ensaio realizado, servindo como teste para os restantes. Neste ensaio aplicou-se, indesejavelmente, uma série de cargas e descargas repentinas, levando o provete a carregamentos bruscos. Com isto o gráfico apresentou resultados um pouco distorcidos onde é possível notar-se, numa linha desenhada a laranja, um comportamento parecido com o que seria de esperar se o ensaio tivesse corrido como desejado. Assim, conclui-se que o conector não apresenta um comportamento dúctil.

Quanto ao ensaio correspondente ao gráfico b), Figura 4.2, pode ver-se que correu da forma desejada, dando gráficos bastante parecidos para os dois conectores ensaiados. Pode também constatar-se que, os conectores TP presentes nesse ensaio apresentaram um comportamento dúctil. Este comportamento, para este tipo de conectores, vai de encontro aos estudos efetuados por outros autores uma vez que, estes concluía nos seus estudos que, o conector TP não apresentava um comportamento dúctil. Esta discordância pode acontecer devida às características dos conectores utilizados por outros autores, serem diferentes das utilizadas nestes ensaios.

Comparando a carga última obtida para cada ensaio, do conector TP, chega-se a um aumento muito pequeno, cerca de 1,8%, com a variação da classe de betão.

A Figura 4.3 apresenta os resultados obtidos para as curvas carga-deslocamento dos ensaios pertencentes ao conector TPU sem armadura.

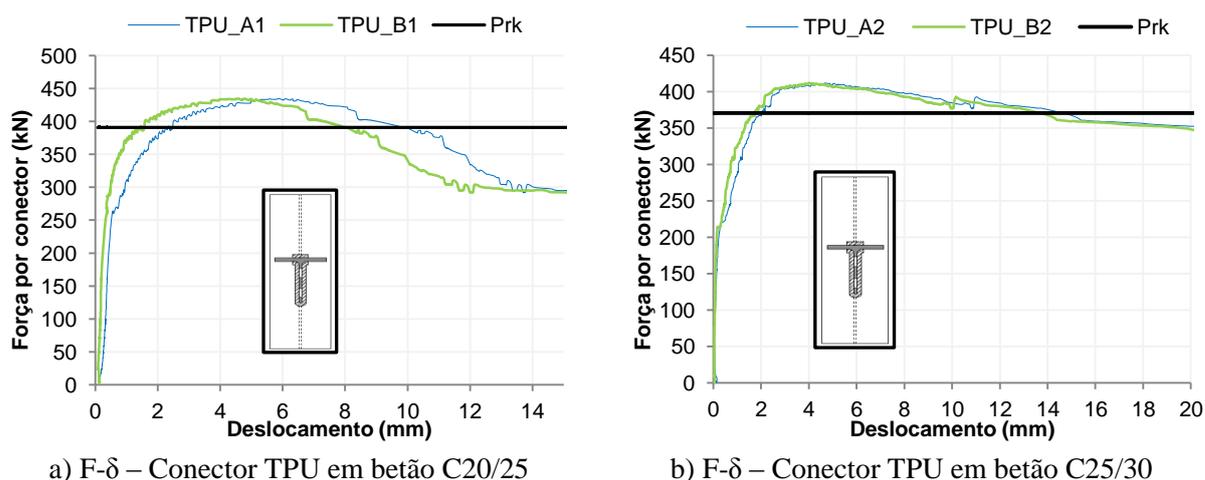


Figura 4.3 - Curva carga/deslocamento para o conector *T-PerfobondUnconnected*

Tal como no segundo ensaio do conector TP, Figura 4.2 b), também os ensaios correspondentes ao conector TPU correram bastante bem. Foram obtidos gráficos bastante

parecidos para os conectores presentes em cada ensaio chegando-se á conclusão de que o conector TPU em ambos os ensaios apresentou um comportamento dúctil. Quanto á carga última obtida nos ensaios do conector TPU, esta teve um decréscimo de 5,2%, com o aumento da classe de betão.

Na Figura 4.4, apresenta-se os resultados obtidos para as curvas carga-deslocamento dos ensaios pertencentes ao conector TPU com armadura de 10 milímetros de diâmetro.

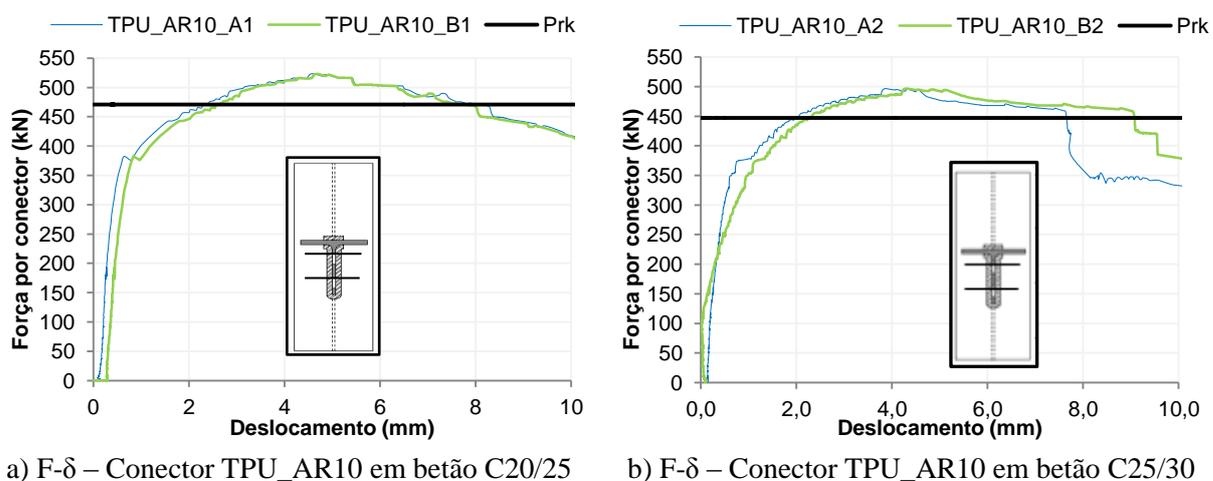
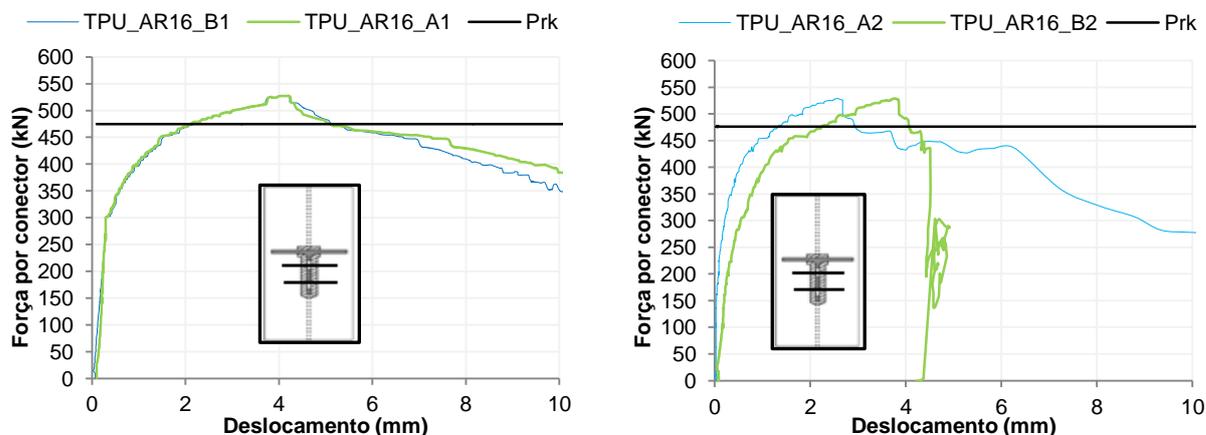


Figura 4.4 - Curva carga/deslocamento para o conector *T-PerfobondUnconnected* com armadura de 10 milímetros

Observando os gráficos, presentes na Figura 4.4, chega-se á conclusão de que o conector TPU, com a presença de armadura passante nos furos de 10 milímetros, apresenta um comportamento dúctil tanto com betão C20/25 como C25/30. Novamente se nota uma diminuição da carga última de 5,1%, aquando do aumento da classe de betão.

Apresentam-se em seguida, Figura 4.5, os gráficos pertencentes aos ensaios realizados com o conector TPU com armadura transversal passante nos furos de 16 milímetros.



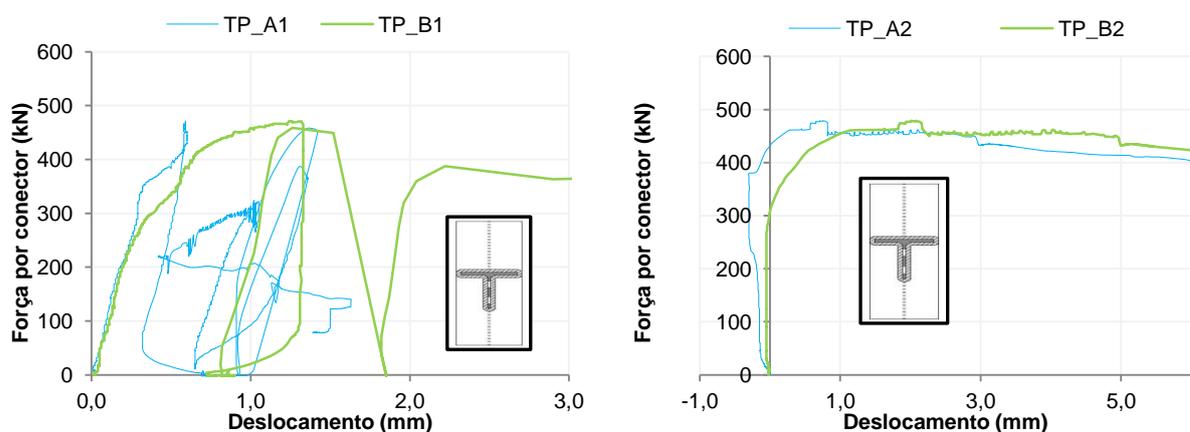
a) F- δ – Conector TPU_AR16 em betão C20/25

b) F- δ – Conector TPU_AR16 em betão C25/30

Figura 4.5 - Curva carga/deslocamento para o conector *T-PerfobondUnconnected* com armadura de 16 milímetros

O conector *T-PerfobondUnconnected*, com armadura de 16 mm, representado na Figura 4.5, apresenta uma diminuição da capacidade de deslizamento, não podendo ser considerado com comportamento dúctil. A rigidez da armadura de reforço, de 16mm, fez reduzir a utilidade do conector fazendo com que o seu comportamento se aproximasse do desempenho de um conector tipo bloco. Quanto ao aumento da classe de betão, verifica-se que não existe grande variação na capacidade de carga.

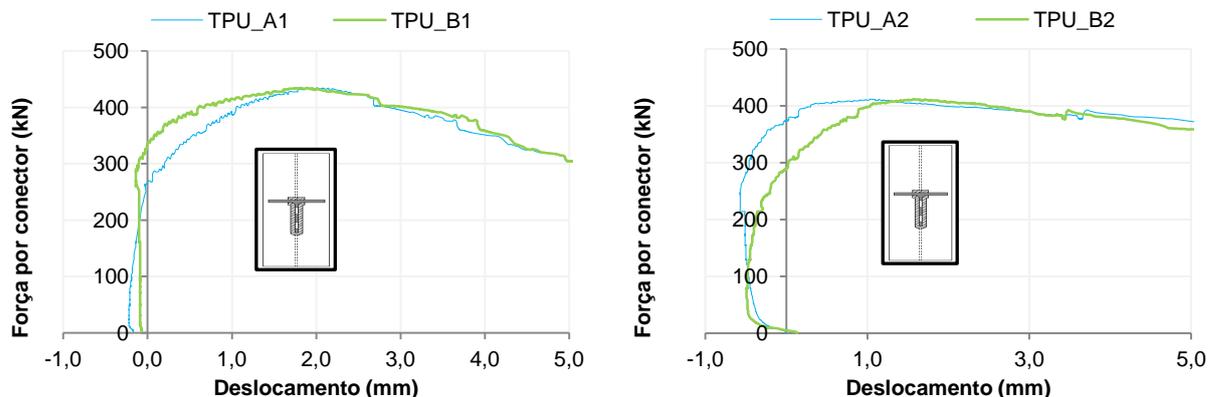
Apresenta-se em seguida, na Figura 4.6, Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 as curvas obtidas nos ensaios experimentais para o fenómeno de *uplift*.



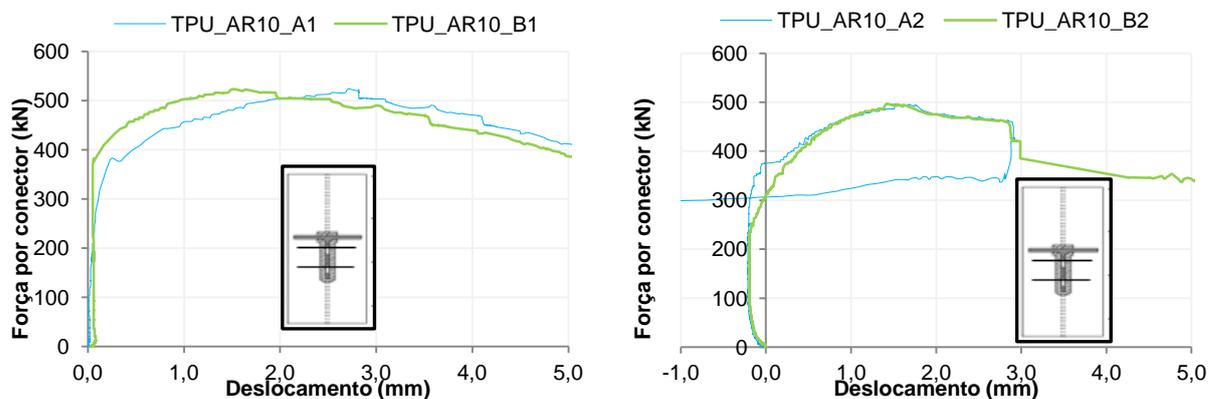
a) Carva/*uplift* Conector TP em betão C20/25

b) Carva/*uplift* Conector TP em betão C25/30

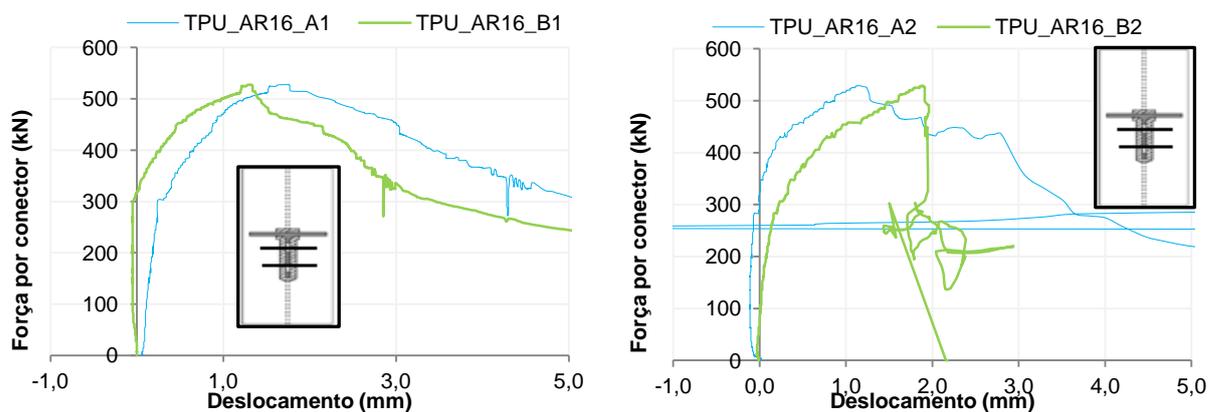
Figura 4.6 - Curva Carva/*uplift* do conector *T-Perfobond*



a) Carva/uplift Conector TPU em betão C20/25 b) Carva/uplift Conector TPU em betão C25/30
 Figura 4.7 - Curva Carva/uplift do conector *T-PerfobondUnconnected*



a) Carva/uplift Conector TPU_AR10 em betão C20/25 b) Carva/uplift Conector TPU_AR10 em betão C25/30
 Figura 4.8 - Curva Carva/uplift do conector *T-PerfobondUnconnected* com armadura de 10 milímetros



a) Carva/uplift Conector TPU_AR10 em betão C20/25 b) Carva/uplift Conector TPU_AR10 em betão C25/30
 Figura 4.9 - Curva Carva/uplift do conector *T-PerfobondUnconnected* com armadura de 16 milímetros

Pode observar-se que alguns gráficos apresentam valores de deslocamento negativos. Este acontecimento deve-se ao facto do posicionamento do transdutor de deslocamentos horizontal não estar alinhado com o centro geométrico do conector na direção horizontal, apenas sendo na direção vertical, o que faz com que exista uma excentricidade entre o conector e o aparelho de medição. O deslocamento negativo resulta de uma rotação relativa entre as lajes de betão e o perfil metálico com o aumento da carga. Este acontecimento pode ser minimizado aproximando o mais possível os LVDT's do conector, ou alma do perfil metálico.

Verifica-se que o fenómeno de *uplift* pode ser desprezado em todos os ensaios visto que em média, para a carga máxima atingida em cada conector, obteve-se um valor de *uplift* de 1,5mm. Tal conclusão seria já de esperar, visto todos os conectores apresentam furos na sua composição com o objetivo de diminuir o *uplift*.

Seguem-se na Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13 os resultados obtidos pelos extensómetros lineares (Figura 3.11), colocados nos banzos de todos os conectores.

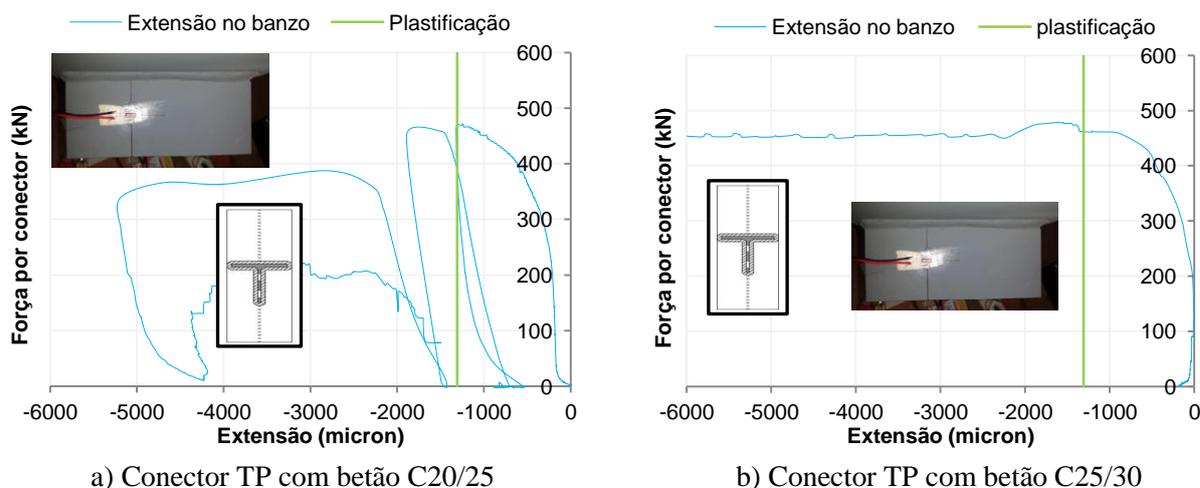
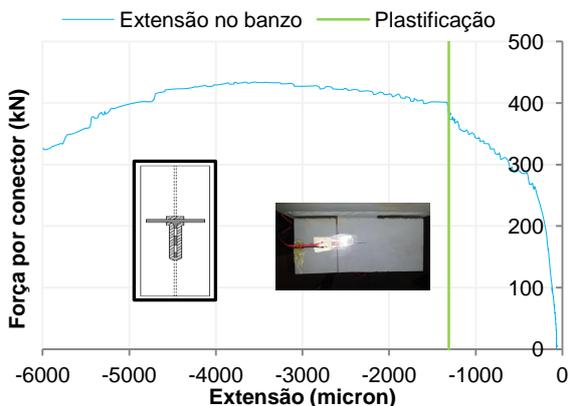
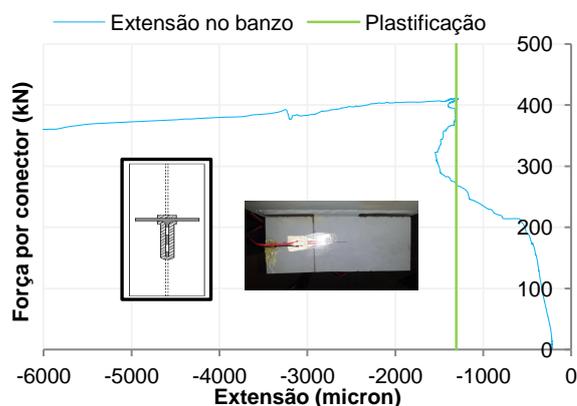


Figura 4.10 - Extensão no banzo do conector *T-Perfobond*

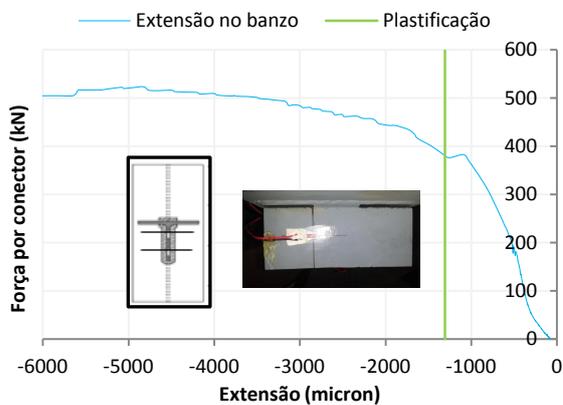


a) Conector TPU com betão C20/25

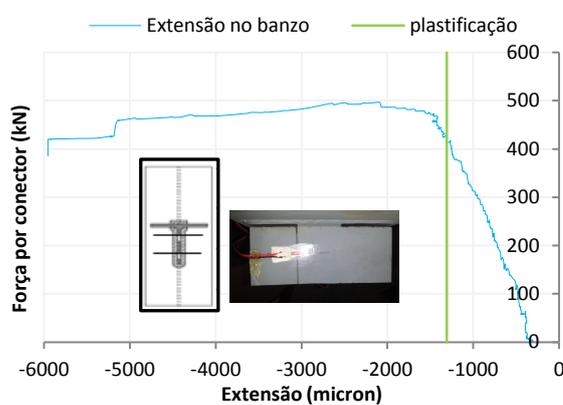


b) Conector TPU com betão C25/30

Figura 4.11 - Extensão no banzo do conector *T-PerfobondUnconnected*

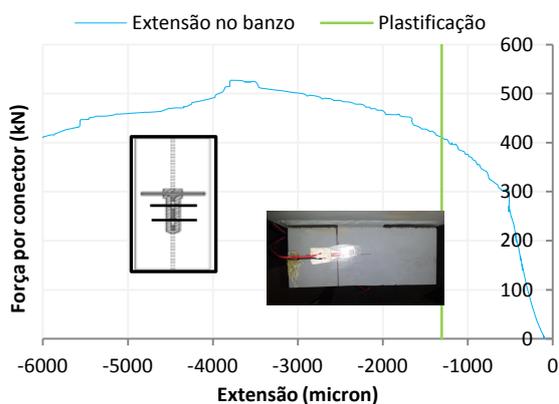


a) Conector TPU_AR10 com betão C20/25

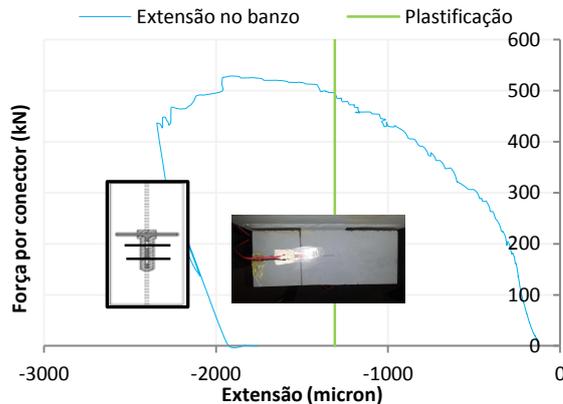


b) Conector TPU_AR10 com betão C25/30

Figura 4.12 - Extensão no banzo do conector *T-PerfobondUnconnected* com armadura de 10 milímetros



a) Conector TPU_AR17 com betão C20/25



b) Conector TPU_AR16 com betão C25/30

Figura 4.13 - Extensão no banzo do conector *T-PerfobondUnconnected* com armadura de 16 milímetros

Tendo em conta o apresentado nos gráficos anteriores, correspondentes aos extensómetros colocados no banzo dos conectores, pode concluir-se que todos os banzos plastificaram na zona dos extensómetros. De notar que todas as curvas força versus extensão, a certo ponto, se aproximam da horizontal, aumentando a extensão sem aumento significativo da força, sendo este um comportamento indicativo da plastificação. A plastificação do banzo pode também ser confirmada aquando do desmantelamento dos protótipos no final dos ensaios.

De notar, que os conectores TPU sem armadura e com armadura de 10 milímetros, apresentaram uma evolução suave da deformação no banzo do conector. Já a presença da armadura de 16 milímetros não possibilitou tanta deformação, gerando uma queda brusca da carga, característico de uma rotura da ligação em bloco.

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos nas rosetas de extensómetros colocadas na alma dos conectores, Figura 4.14 à Figura 4.19.

Sempre que possível serão apresentados o gráfico referente á Tensão de von Mises respetiva a cada conector. A referida tensão foi obtida a partir da seguinte equação, equação (4.3).

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (4.3)$$

Onde:

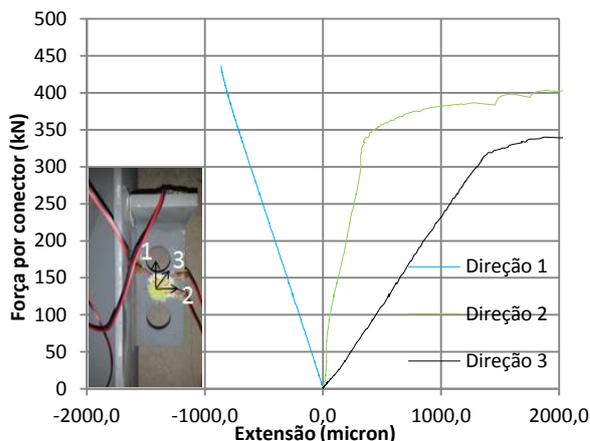
$$\varepsilon_1 = 0,5 \times (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + 0,5 \times \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\gamma_{xy})^2}$$

$$\varepsilon_2 = 0,5 \times (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) - 0,5 \times \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\gamma_{xy})^2}$$

$$\sigma_1 = [E(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)] / (1 - \nu^2)$$

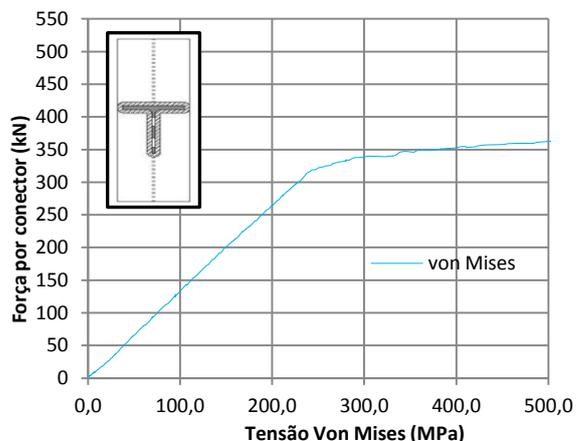
$$\sigma_2 = [E(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)] / (1 - \nu^2)$$

$$\tan 2\theta = (\gamma_{xy}) / (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})$$

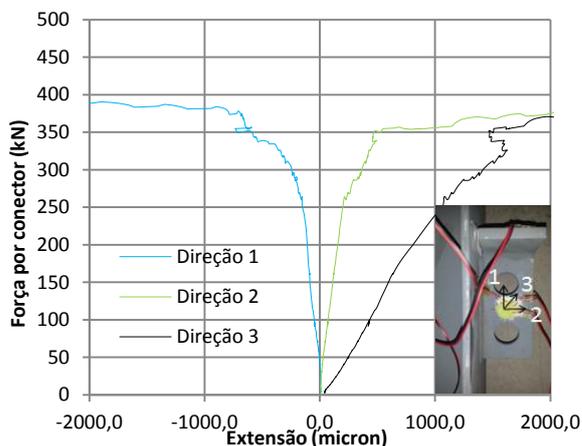


a) Curva Força versus extensão

Figura 4.14 – Resultados da roseta na alma do conector TP em betão C20/25

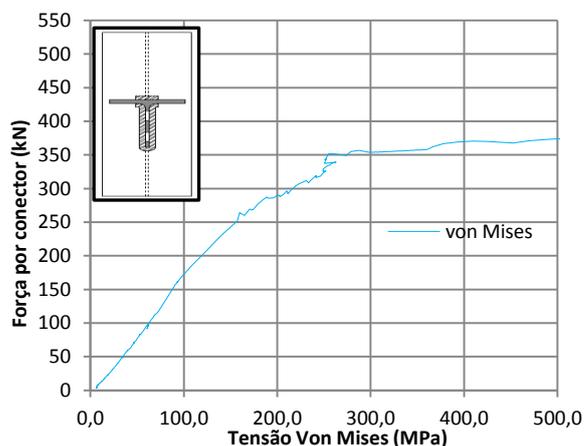


b) Curva Força versus Tensão de von Mises

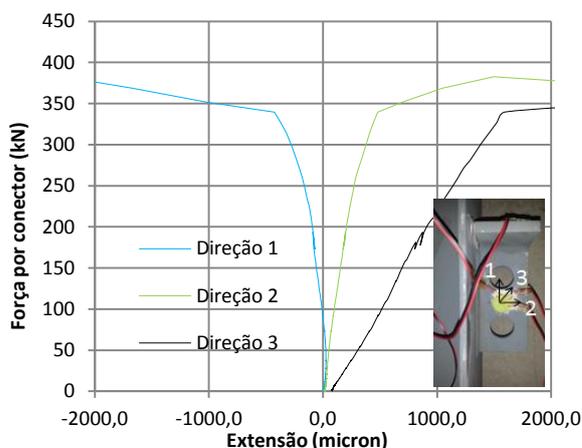


a) Curva Força versus extensão

Figura 4.15 – Resultados da roseta na alma do conector TPU em betão C20/25

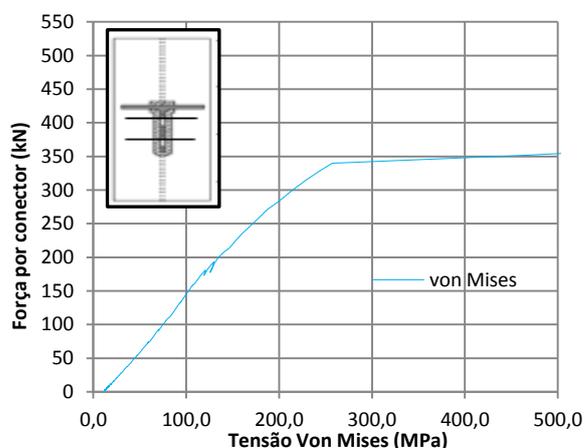


b) Curva Força versus Tensão de von Mises

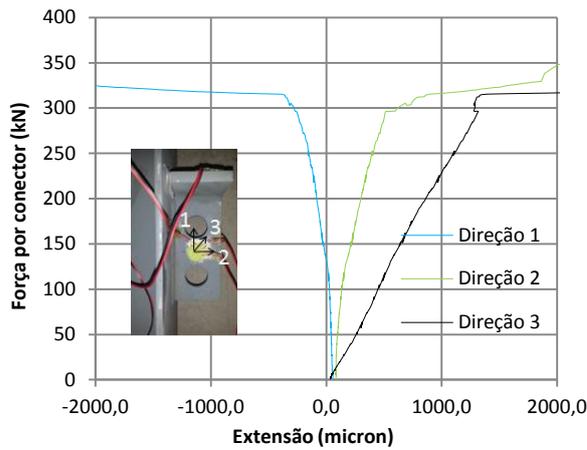


a) Curva Força versus extensão

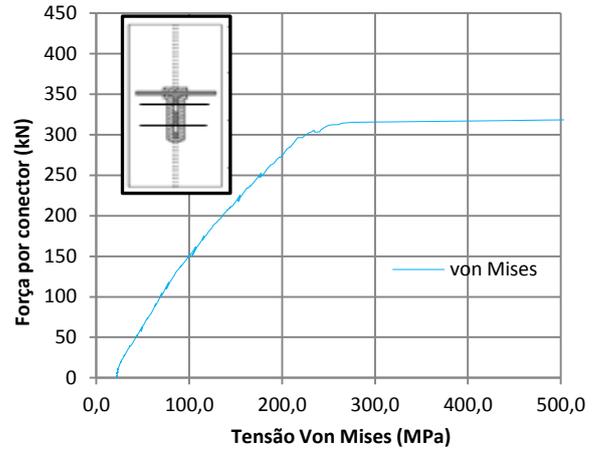
Figura 4.16 – Resultados da roseta na alma do conector TPU-AR10 em betão C20/25



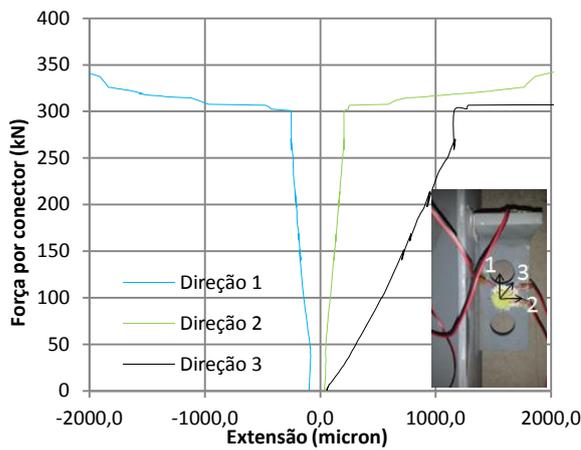
b) Curva Força versus Tensão de von Mises



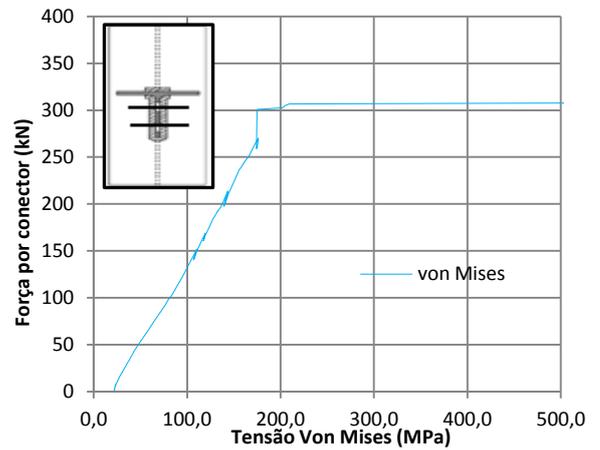
a) Curva Força versus extensão
 Figura 4.17 – Resultados da roseta na alma do conector TPU-AR10 em betão C25/30



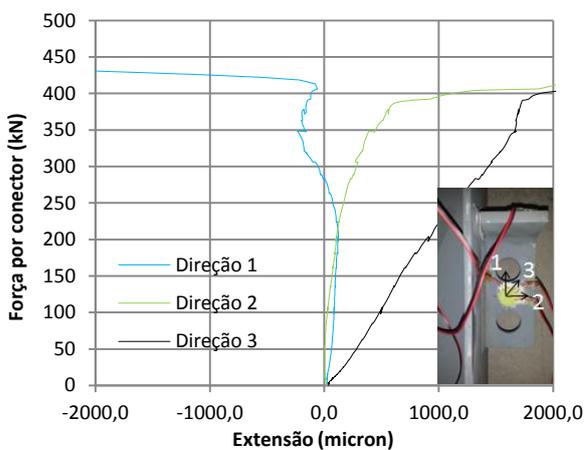
b) Curva Força versus Tensão de von Mises



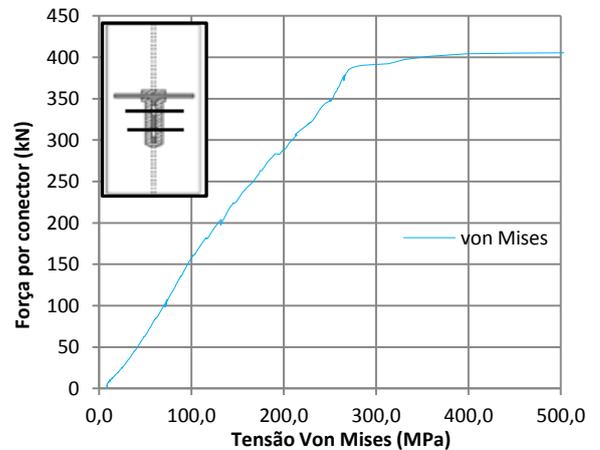
a) Curva Força versus extensão
 Figura 4.18 – Resultados da roseta na alma do conector TPU-AR16 em betão C20/25



b) Curva Força versus Tensão de von Mises



a) Curva Força versus extensão
 Figura 4.19 – Resultados da roseta na alma do conector TPU-AR16 em betão C25/30



b) Curva Força versus Tensão de von Mises

Tendo em conta os gráficos apresentados anteriormente, relativos às rosetas de extensómetros presentes na alma dos conectores entre os furos, de um modo geral pode concluir-se que todos os conectores plastificaram no local onde as rosetas foram colocadas. Todos os gráficos relativos às tensões de von Mises apresentaram uma curva que em certo ponto se aproxima da horizontal, sendo este comportamento indicativo da plastificação. Todos os conectores plastificaram antes mesmo de se atingir a carga máxima dos ensaios.

O facto de todos os conectores terem plastificado pode ser confirmado também através do ângulo que as direções da roseta fazem com as direções principais de deformação. Na altura em que se atinge a plastificação da alma do conector, os eixos principais de deformação sofrem uma pequena rotação, alterando assim o ângulo que estes fazem com os eixos da roseta. Esta rotação pode ser verificada, a título de exemplo na figura seguinte, Figura 4.20.

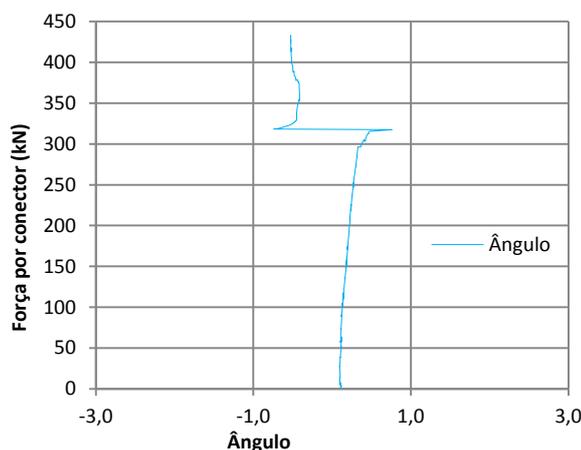


Figura 4.20 – Ângulo ente as direções da roseta e as principais do conector TPU_AR10 com betão C25/30

Nos gráficos da Figura 4.18, os valores obtidos pelos extensómetros a partir de 250kN não foram confiáveis, inibindo qualquer tipo de análise ou conclusão.

As rosetas pertencentes aos conectores TP e TPU em betão C25/30 não apresentaram valores aceitáveis desde o início dos ensaios. Este facto, com a leitura de resultados nestas rosetas, terá ocorrido possivelmente devido a uma colagem defeituosa das mesmas ou até mesmo devido a algum problema na betonagem dos provetes.

4.2 Estudo da influência dos principais parâmetros

Para que se possa comparar a influência dos principais parâmetros, de uma forma mais perceptível, os gráficos em seguida apresentados serão referentes a média entre os dois conectores estudados em cada ensaio, conector A e B.

4.2.1 Influência do tipo de conector

Sendo o conector *T-PerfobondUnconnected* um conector inovador, proposto nesta dissertação, e o conector *T-Perfobond* proposto anteriormente por outros autores, apresentam-se em seguida, na Figura 4.21, as curvas F- δ pertencentes a ambos de forma a comparar as características de cada um.

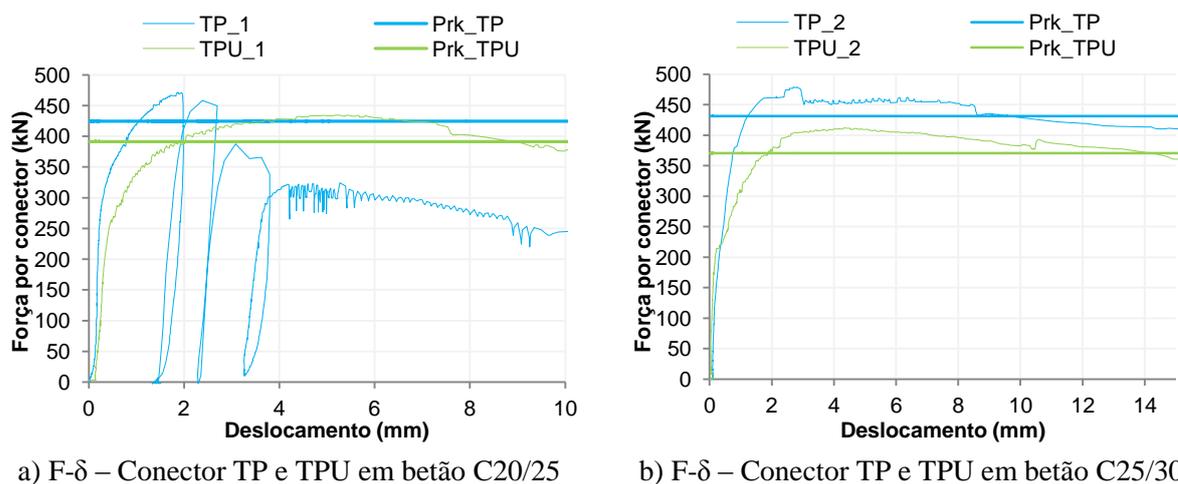


Figura 4.21 – Curvas carga/deslocamento para o conector *T-Perfobond* e *T-PerfobondUnconnected*

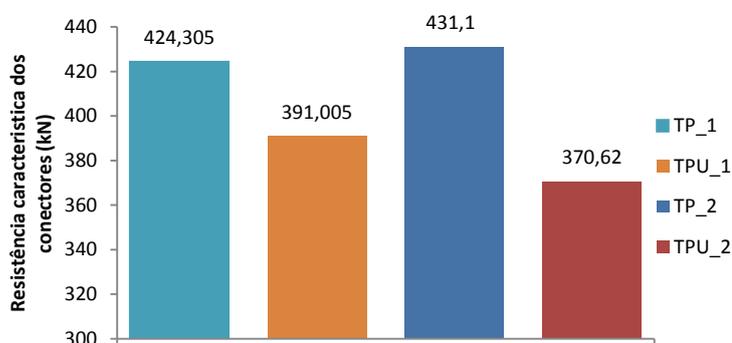


Figura 4.22 – Resistência dos conectores

Nota-se que o conector *T-PerfobondUnconnected* apresenta menores valores de capacidade de carga, menos 8% e 14% aproximadamente, para cada betão respetivamente.

Quanto à capacidade de deformação, o conector TPU apresenta sempre melhor comportamento podendo ser considerado um conector dúctil em ambos os betões.

Verifica-se assim que a alteração proposta nesta dissertação ao conector TP, transformando-o em TPU não colocando soldadura entre o banzo do conector e o banzo do perfil metálico onde este está acoplado, aumenta a capacidade de deformação deste sem que se perca grande capacidade de carga e obtendo assim um conector dúctil de acordo com o Eurocodigo 4 (2005). Este facto deve-se fundamentalmente à formação de um mecanismo plástico no banzo dos conectores, antes ou acompanhando o colapso do betão, transferindo para a ligação a ductilidade daquele mecanismo.

4.2.2 Influência da resistência do betão

Com o objetivo de se aferir a influência da resistência do betão nos conectores estudados, comparou-se os resultados obtidos para a primeira e segunda série de ensaios. Na primeira série, a resistência média do betão foi de 36MPa, e na segunda série foi de 44MPa, correspondendo a um aumento de 18%.

Apresenta-se em seguida, Figura 4.23 até Figura 4.26, os gráficos F- δ correspondentes a todos os ensaios para ambos os betões.

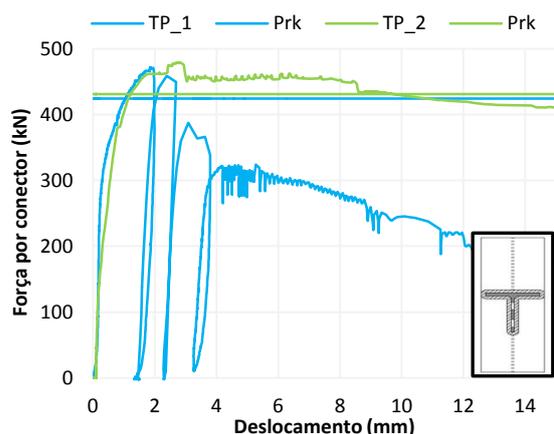


Figura 4.23 – Curva F- δ do conector TP em betão C20/25 e C25/30

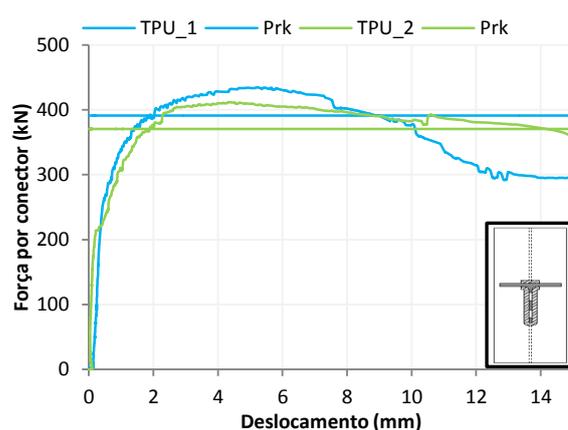


Figura 4.24 - Curva F- δ do conector TPU em betão C20/25 e C25/30

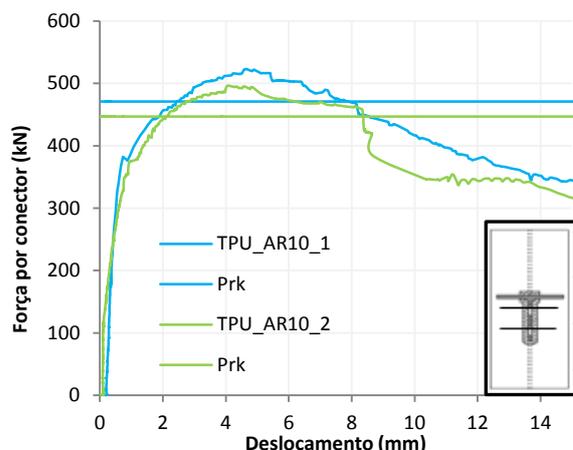


Figura 4.25 - Curva F- δ do conector TPU_AR10 em betão C20/25 e C25/30

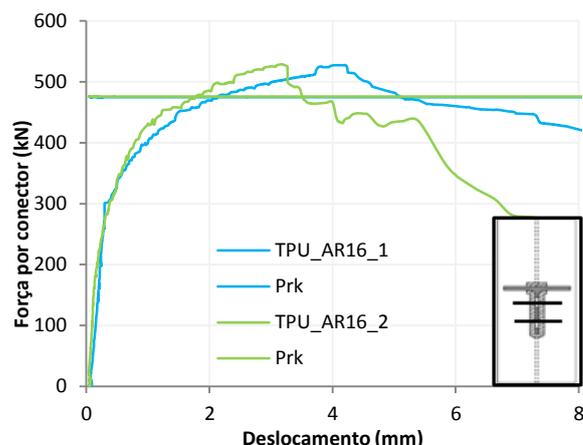


Figura 4.26 - Curva F- δ do conector TPU_AR16 em betão C20/25 e C25/30

Quadro 4.3 – Resultados obtidos experimentalmente

| Conector | P_{rk} (kN) | δ_u (mm) |
|----------|---------------|-----------------|
| TP_1 | 424,31 | 2,85 |
| TP_2 | 432,10 | 9,68 |
| TPU_1 | 391,01 | 8,99 |
| TPU_2 | 370,62 | 14,29 |

| Conector | P_{rk} (kN) | δ_u (mm) |
|------------|---------------|-----------------|
| TPU_AR10_1 | 471,15 | 7,77 |
| TPU_AR10_2 | 446,90 | 8,34 |
| TPU_AR16_2 | 475,90 | 5,16 |
| TPU_AR16_1 | 474,90 | 3,51 |

De um modo geral, tendo em conta os gráficos apresentados nas figuras anteriores, o aumento da classe de betão não levou a um aumento na capacidade de carga dos conectores, sendo que em alguns casos houve até uma diminuição desta. Este facto pode dever-se à baixa diferença entre a resistência média dos betões utilizados na primeira e segunda série de ensaios, mas sobretudo pelo facto de o colapso da ligação envolver plastificação da parte metálica.

Quanto à capacidade de deformação, esta aumentou em todos os conectores à exceção do conector TPU_AR16.

4.2.3 Influência da armadura nos furos

De modo a constatar a influência da armadura passante nos furos do conector em estudo, foram realizados ensaios com o conector *T-PerfobondUnconnected* sem armadura e com armadura de dois diâmetros diferentes (10mm e 16mm). Apresentam-se em seguida, Figura 4.27 Figura 4.28, os gráficos F- δ pertencentes aos referidos ensaios.

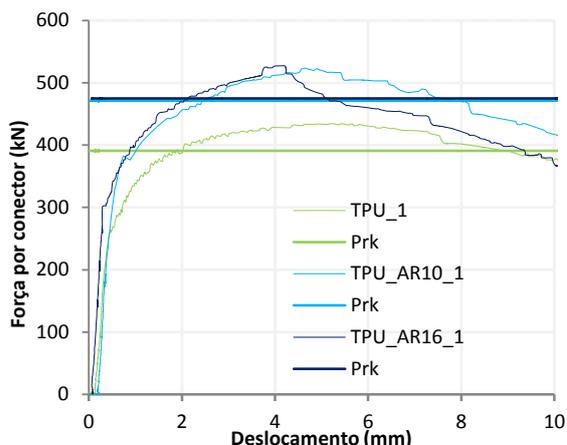


Figura 4.27 - Curva F- δ do conector TPU com e sem armadura nos furos em betão C20/25

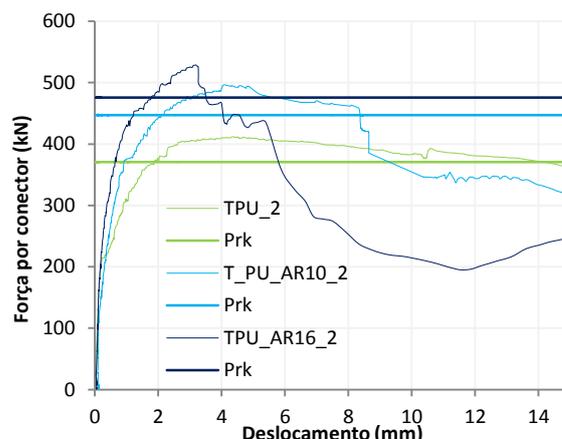


Figura 4.28 - Curva F- δ do conector TPU com e sem armadura nos furos em betão C25/30

A colocação de armadura no conector é acompanhada de um aumento significativo da capacidade de carga da ligação, de aproximadamente 17% em ambos os betões. Quanto ao aumento do diâmetro da armadura passante nos furos, este apenas aumenta a capacidade de carga da ligação no betão C25/30, somente 6%, mantendo-se quase com o mesmo valor no betão C20/25.

A ductilidade do conector diminuiu com a presença de armadura e aumento do diâmetro da mesma, levando mesmo a que a ligação deixe de ser dúctil no caso da armadura de 16 mm. Apresenta-se no Quadro 4.4, com melhor detalhe, os resultados obtidos nos ensaios do conector *T-PerfobondUnconnected* com e sem armadura, onde se pode conferir o aumento de capacidade de carga e diminuição da ductilidade.

Quadro 4.4 – Influência da armadura no conector *T-PerfobondUnconnected*

| Conector | 1ª série (C20/25) | | 2ª série (C25/30) | |
|----------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | P_{teste} (kN) | δ_u (mm) | P_{teste} (kN) | δ_u (mm) |
| TPU | 434,45 | 8,985 | 411,80 | 14,29 |
| TPU_AR10 | 523,5 | 7,77 | 496,56 | 8,335 |
| TPU_AR16 | 527,67 | 5,155 | 528,78 | 3,51 |

Segundo Vianna (2009) e Figueiredo (2012), a existência de armadura passante nos furos do conector *T-Perfobond*, não só aumenta a capacidade de carga do conector, mas também a sua capacidade de deslizamento. No entanto, sendo que o conector *T-PerfobondUnconnected* apresenta os banzos desligados do perfil metálico, é o próprio banzo que confere a ductilidade à ligação, sendo que a armadura passante nos furos apenas aumenta a sua capacidade de carga.

4.3 Modo de rotura

O modo de rotura iniciou-se com o aparecimento de uma fissura de corte longitudinal na laje, semelhante em todos os ensaios, que se estendia da extremidade inferior do conector ate a base da laje de betão. A fissura em questão surge um pouco antes de se atingir a carga máxima do conector e aumenta de espessura à medida que o ensaio decorre.

Apresenta-se em seguida, Figura 4.29 e Figura 4.30, a fissura em questão correspondente ao conector TP em betão C25/30, numa fase inicial, e ao conector TPU em betão C25/30, numa fase mais avançada, semelhantes às que apareceram em todos os ensaios.



Figura 4.29 – Fissura inicial de corte do TP em betão C25/30



Figura 4.30 – Fissura de corte em fase mais avançada, do TPU em betão C25/30

Em todos os ensaios, muito próximo da carga máxima, surgem fissuras em volta do conector, como que a rotura de um bloco de betão, seguidas pelo aparecimento de fissuras com inclinação de 45° que se estendem desde a parte superior dos conectores ate aos cantos superiores das lajes.



Figura 4.31 - Modo de rotura intermedio do conector TP em betão C25/30

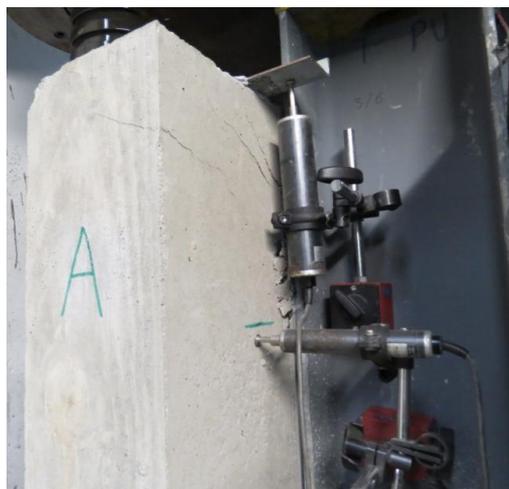


Figura 4.32 - Modo de rotura intermedio do conector TPU em betão C20/25



Figura 4.33 - Modo de rotura intermedio do conector TPU_AR10 em betão C25/30



Figura 4.34 - Modo de rotura intermedio do conector TPU_AR16 em betão C20/25

Os ensaios com a presença de armadura passante nos furos, apresentaram um modo de rotura um pouco mais destrutivo com o aparecimento de fissuras de 45° que se estendiam desde o conector aos cantos inferiores da laje. Surgiram também algumas fissuras na zona das armaduras de reforço, à medida que o carregamento prosseguia e a armadura começava a ser tracionada, chegando a existir o destacamento de betão na zona destas.

Por fim, os conectores foram retirados das lajes de betão com o auxílio da prensa, que levou os ensaios um pouco mais longe, para facilitar o desmantelamento, sendo necessária a

utilização de um macaco hidráulico e um alicate de corte no caso dos conectores com armadura passante nos furos.

Comparando o conector TP com o conector TPU após os ensaios, pode ver-se que houve uma deformação muito maior no banzo do conector TPU, Figura 4.35. Quanto à alma dos conectores, pôde ver-se que também estas plastificaram. Exemplo disso é a Figura 4.36.



a) Conector TP_B em betão C25/30



b) Conector TPU_B em betão C25/30

Figura 4.35 – Plastificação do banzo dos conectores TP e TPU após o ensaio



a) Alma do conector TP_B em betão C25/30



b) Alma do conector TPU_B em betão C20/25

Figura 4.36 – Plastificação da alma dos conectores TP e TPU após o ensaio

Após o desmantelamento, notou-se a presença de um aglomerado de betão em forma de cone, Figura 4.37, em volta de todos os conectores bem como, após a retirada deste, a presença dos cilindros de betão no interior dos furos, Figura 4.36 a).



a) Cone de betão no conector TPU_AR10_B b) Cone de betão no conector TPU_AR16_B
Figura 4.37 – Cone de betão nos conectores TPU_AR10_B e TPU_AR16_B em betão C20/25

Os banzos e a alma dos conectores com armadura passante nos furos também plastificaram. No entanto o conector TPU_AR16 sofreu menos deformação quando comparado com o conector TPU_AR10 como se pode ver pela Figura 4.37. Verificou-se também que todas as armaduras de reforço plastificaram.



a) Armadura de reforço do conector TPU_AR10_B em betão C20/25 b) Armadura de reforço do conector TPU_AR16_A em betão C20/25

Figura 4.38 – Plastificação das armaduras de reforço

Ao observar as lajes após o desmantelamento, nota-se claramente a fissura de corte do betão e a falta de betão que ficou agarrado aos conectores. Na Figura 4.39 e Figura 4.40 apresentam-se duas lajes, após o desmantelamento, representativas de todos os ensaios.



Figura 4.39 – Laje do conector TP em betão C25/30



Figura 4.40 – Laje do conector TPU_AR10 em betão C20/25

5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

5.1 Comparação com resultados experimentais obtidos por outros autores

No Quadro 5.1 apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente por Vianna (2009) e Figueiredo (2012), para o conector TP, de forma a se poderem comparar com os resultados obtidos nesta dissertação. Os resultados não poderão ser comparados de forma direta visto que os conectores *T-Perfobond* não têm a mesma geometria, nem a classe de betão utilizada é a mesma. No entanto, dará para ter uma ideia se os valores obtidos se encontram perto dos valores de outros autores.

Quadro 5.1 - Comparação com os resultados experimentais de Vianna (2009) e Figueiredo (2012) para o conector *T-Perfobond*

| Conector | | P_{teste} (kN) | P_{rk} (kN) | δ_u (mm) | δ_{uk} (mm) | $f_{cm, cubos}$ (Mpa) |
|-------------------|----------------|---------------------|------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|
| TP_1 | | 471,45 | 424,31 | 2,85 | 2,565 | 36,19 |
| TP_2 | | 480,11 | 432,10 | 9,68 | 8,712 | 44,53 |
| Vianna (2009) | TP_2F_120_IN_B | 714,68 | 643,21 | 4,2 | 3,78 | 53,91 |
| Figueiredo (2012) | TP2F | 545,9 | 491,31 | 4,5 | 4,045 | 31,44 |

Os resultados obtidos nos ensaios do conector TP são bastante aceitáveis quando comparados com os resultados de outros autores. O conector de Vianna (2009) apresenta capacidade de carga muito superior pois, para além de a resistência média do betão utilizado ser superior, o conector foi fabricado a partir de um perfil IPN340 que apresenta maiores espessuras de alma e banzo que o perfil IPE360. Já o conector apresentado por Figueiredo (2012) apresenta maior capacidade de carga pois, mesmo sendo fabricado a partir de um perfil IPE300 e o betão ser de resistência inferior, o comprimento do conector é de 300mm, em vez de 180mm, e o diâmetro dos furos de 30 mm, em vez de 35 mm, o que lhe confere maior resistência.

A maior ductilidade apresentada pelo conector TP_2, estudado nesta dissertação, poderá dever-se às menores dimensões do conector quando comparado com os restantes, o que lhe permite plastificar mais facilmente e atingir maiores deformações, o que aliás ficou patente nas imagens após rotura e retirada do betão envolvente.

Sendo o *T-PerfobondUnconnected* um conector inovador, não existem resultados experimentais obtidos por outros autores para utilizar como forma de comparação. No entanto, existem conclusões tiradas por outros autores sobre a variação da armadura nos furos, no caso do conector *T-Perfobond*, que podem ser comparadas com o comportamento do TPU quando exposto a tal variação.

Vianna (2009) concluiu, no estudo dos conectores T-Perfobond (invertidos segundo a autora), que o aumento do diâmetro de armadura de 12mm para 16mm não apresenta vantagens pois, diminuiu tanto a capacidade como a ductilidade dos conectores ensaiados, como se pode constatar no Quadro 2.5. Esta conclusão vai ao encontro dos resultados obtidos para os conectores TPU_AR10 e TPU_AR16, que também não apresentaram ganhos significativos na capacidade de carga e apresentaram perda de ductilidade com o aumento do diâmetro de armadura.

Figueiredo (2012) terá também concluído que a colocação de armadura nos furos do conector *T-Perfobond* lhe confere maior capacidade de carga não aumentando significativamente a sua capacidade de deslizamento (Quadro 2.8), tal como foi verificado nos ensaios do conector TPU com e sem armadura.

5.2 Comparação com modelos analíticos

No Capítulo 2 foram apresentadas equações teóricas para o cálculo da capacidade do conector *T-Perfobond*, que serão aqui lembradas comparando os resultados obtidos por estas com os resultados obtidos experimentalmente.

As equações existentes para o cálculo da resistência última dos conectores T-Perfobond são as propostas por Vianna (2009), equação (2.11) e (2.12), e pelo Eurocodigo 4 (2001), equação (2.9).

Tendo em conta que todos os betões utilizados apresentam resistência característica inferior a 30 MPa em provetes cilíndricos, das equações propostas por Vianna (2009) apenas será utilizada a equação (2.11).

O Quadro 5.2 - Resultados experimentais versus teóricos apresenta a comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os modelos teóricos referidos.

Quadro 5.2 - Resultados experimentais versus teóricos

| Classe do betão | Conector | P_{teste} (kN) | P_{rk} (kN) | Vianna (2009) (kN) | EC4 (bloco) (kN) |
|-----------------|----------|---------------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| C20/25 | TP | 471,450 | 424,310 | 118414,042 | 444,292 |
| | TPU | 434,450 | 391,010 | 118414,042 | 444,292 |
| | TPU_AR10 | 523,500 | 471,150 | 118414,042 | 444,292 |
| | TPU_AR16 | 527,670 | 474,900 | 118414,042 | 444,292 |
| C25/30 | TP | 480,110 | 432,100 | 157068,812 | 574,041 |
| | TPU | 411,800 | 370,620 | 157068,812 | 574,041 |
| | TPU_AR10 | 496,560 | 446,900 | 157068,812 | 574,041 |
| | TPU_AR16 | 528,780 | 475,900 | 157068,812 | 574,041 |

Pode concluir-se que os resultados obtidos a partir da equação proposta por Vianna (2009), apresentam discrepâncias bastante grandes, obtendo-se valores muito superiores e até mesmo descabidos. Desta forma não é seguro utilizar esta equação, no dimensionamento de conectores com estas características, visto que esta apenas apresenta resultados acertados colocando as características exatas dos ensaios de Vianna (2009). A própria equação proposta por esta autora apresenta na sua constituição constantes com valores arredondados. Valores estes com os quais, substituindo as restantes incógnitas, com as características dos ensaios de Vianna (2009), não se consegue obter valores nem próximos dos obtidos por esta autora. Exemplo disso é o Quadro 5.3 que apresenta os valores obtidos para o cálculo da resistência do conector TP-2F-AR-IN-10-16 de Vianna (2009) a partir da equação com as constantes em valor exato e arredondado. Apresenta-se também a equação (5.1), que corresponde à equação (2.11) com valores exatos.

$$q_u = -425113,486 - 16,692 \times (h_{sc} t_{sc} f_{ck}) + 84,49 \times (A_{sc} \sqrt{f_{ck}}) \quad (5.1)$$

Quadro 5.3 – Cálculo da capacidade de carga do conector TP-2F-AR-IN-10-16 de Vianna (2009)

| Características do conector TP-2F-AR-IN-10-16 | | | |
|---|------|--|---------|
| f_{ck} (MPa) | 29 | h_{sc} (mm) | 76,2 |
| t_{sc} (mm) | 12,2 | A_{sc} (mm ²) | 1924,23 |
| Equação com constantes exatas (kN) | | Equação com constantes arredondadas (kN) | |
| 389,16 | | -4612,71 | |

Pode ver-se que, com pequenas alterações na equação proposta por Vianna (2009), os resultados obtidos variam bastante, obtendo-se valores descabidos. A equação em questão apenas apresenta valores aceitáveis com as características exatas do conector apresentado no

quadro 5.3, podendo apenas variar a resistência do betão. O valor obtido a partir da equação com as constantes exatas, foi então comparado por Vianna (2009) com o valor da resistência última de cálculo, P_{rd} , obtida a partir da equação (5.2), obtendo um erro de 0%. Os referidos valores podem ser confirmados no Quadro 2.5, P_{rk} , e no Quadro 5.4, P_{rd} .

$$P_{rd} = \frac{f_u}{f_{ut}} \times \frac{P_{rk}}{\gamma_v} \quad (5.2)$$

Onde:

f_u é a tensão de escoamento última mínima do aço do conector;

f_{ut} é a tensão última real do conector;

γ_v é o coeficiente de segurança parcial da ligação submetida a corte ($\gamma_v = 1,25$)

Quadro 5.4 – Resultados analíticos de Vianna (2009)

| Eq. | Série | Protótipo | fck MPa | (A) | (B) | (C) | (D) | Prd Exp | Prd prev | Exp / Prd prev |
|-----|-------|-------------------|------------|--------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------------------|
| | | | | Bloco | Perfobond | Armad | Cilindros | | | |
| (2) | 5 | TP-2F-AR-IN-10-12 | 25,7 | 477,01 | 23891,75 | 314159,27 | 9754,89 | 279,50 | 279,50 | 1,00 |
| | | TP-2F-AR-IN-10-16 | 29 | 538,26 | 26959,56 | 314159,27 | 10362,27 | 389,16 | 389,16 | 1,00 |
| | | TP-2F-AR-IN-12-16 | 26 | 482,58 | 24170,64 | 314159,27 | 9811,66 | 420,75 | 420,75 | 1,00 |

A equação proposta pelo Eurocodigo 4 (2001), apesar de apresentar resultados aceitáveis, também não é a mais indicada para estes conectores. Mais uma vez, o aumento da resistência característica do betão na equação é proporcional ao aumento da capacidade de carga do conector, resultante da equação. Esta equação torna-se incompatível com estes conectores pois, tem em conta uma rotura pelo betão implicando que, com o aumento da classe de betão a resistência da ligação aumente também. No entanto, o aumento da resistência do betão nos ensaios experimentais não levou a um aumento da capacidade de carga do conector. Este facto leva a crer que a capacidade de carga do conector *T-Perfobond* com estas características (espessura de banzo e alma mais finas que facilita a sua deformação), depende da rotura não pelo betão mas pela plastificação do próprio conector.

Importante referir que no cálculo da resistência com a equação do bloco, não foi utilizado o fator de segurança visto estar-se a realizar uma comparação com valores experimentais.

Quanto aos resultados obtidos, por ambas as fórmulas, para os conectores TPU com armadura, são iguais aos obtidos sem armadura pois, nas equações utilizadas, não existe nenhuma parcela que tenha em conta a quantidade de armadura passante nos furos.

6 PROPOSTA DE UM MODELO ANALITICO PARA O CONECTOR T-PERFOBONDUNCONNECTED

Quando ligações, como as que aqui foram estudadas, são submetidas a ensaios *push out*, existem várias formas de se atingir a rotura do ensaio. A ligação irá ceder sempre pela parte mais fraca, que poderá ser constituída por um conjunto de vários componentes da mesma. Isto é, se por exemplo no caso dos conectores T-perfobond o betão for muito fraco, a ligação ao ser carregada irá ceder por rotura do betão, sem levar o próprio conector ao limite da sua carga.

No caso dos conectores *T-PerfobondUnconnected* estudados, existiu sempre uma plastificação tanto do banzo como da alma do conector. Isto significa que, para que o conector cedesse, foi necessário aplicar uma força que permitisse que, pelo menos, o banzo e a alma do conector plastificassem. Assim sendo é possível calcular a força necessária para que o banzo e a alma do conector plastifiquem em separado e somar a resistência de ambas obtendo uma boa noção do valor da resistência do conector.

A força necessária para que o banzo dos conectores TPU plastifique, é obtida tendo em conta o momento plástico da secção transversal que compõe o banzo do conector. Esta força é obtida tendo em conta a Figura 6.1, a equação (6.1) e a equação (6.6). De notar que as linhas de rotura representadas na

Figura 6.1

Figura 6.1 são compatíveis com as observações experimentais.

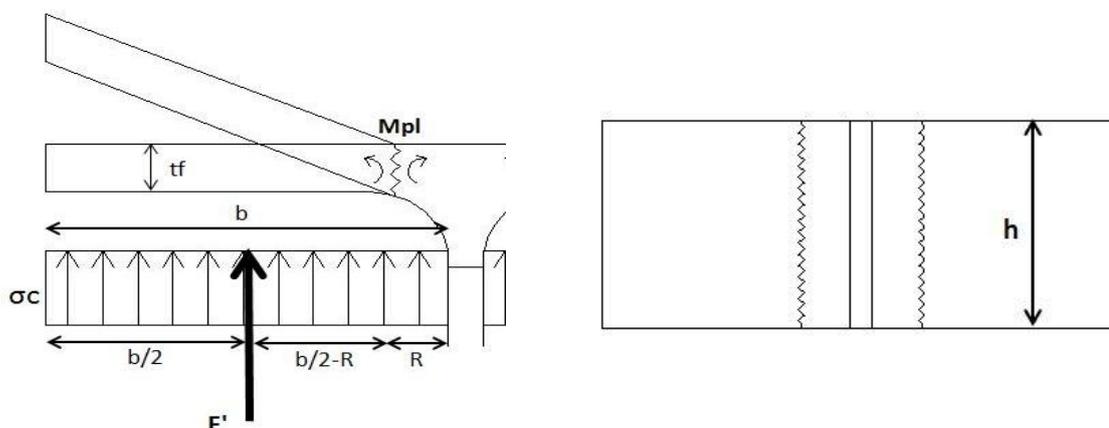


Figura 6.1 - Plastificação do banzo do conector

$$F_{Banzo} = 2 \times F' \quad (6.1)$$

Em que a força F' é o valor mínimo entre a resistência do betão, equação (6.2), e a resistência do aço, equação (6.3).

Equação da resistência do betão:

$$F'_1 = f_{ck,cyl.} \times h \times b \quad (6.2)$$

Equação da resistência do aço:

$$\begin{aligned} F'_2 \times \left(\frac{b}{2} - R\right) &= M_{pl} \Rightarrow \\ \Rightarrow F'_2 \times \left(\frac{b}{2} - R\right) &= 0,25 \times h \times t_f^2 \times f_y \Rightarrow \\ \Rightarrow F'_2 &= \frac{0,25 \times h \times t_f^2}{\left(\frac{b}{2} - R\right)} \times f_y \end{aligned} \quad (6.3)$$

Das equações anteriores obtém-se:

$$F_{Banzo} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2f_{ck,cil.} \times h \times b \\ \frac{0,5 \times h \times t_f^2}{\left(\frac{b}{2} - R\right)} \times f_y \end{array} \right. \quad (6.4)$$

Quanto à força necessária para que a alma do conector plastifique quando solicitada ao corte, é obtida tendo em conta a Figura 6.2 e a equação (6.7).

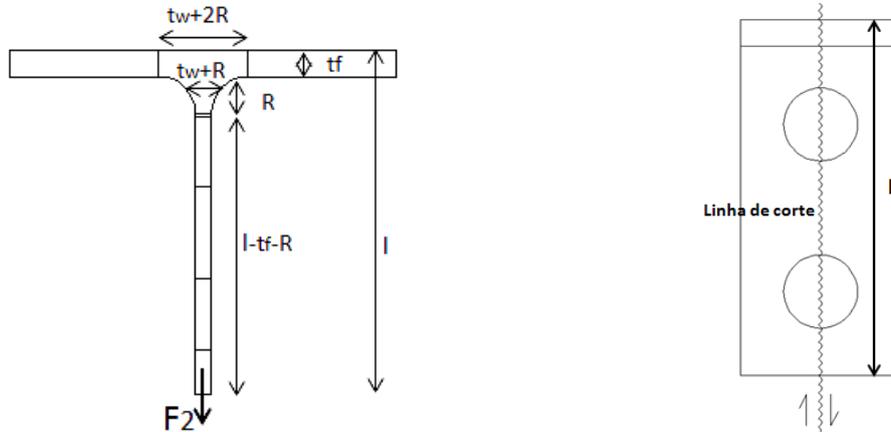


Figura 6.2 – Plastificação do banzo solicitado ao corte

$$A_v = (l - t_f - R - n\emptyset) \times t_w + (t_w + R) \times R + (t_w + 2R) \times t_f \quad (6.5)$$

$$F_{Alma} = A_v \times \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (6.6)$$

Sendo que ambas as forças podem ser somadas, a capacidade de carga do conector pode então ser estimada a partir da seguinte equação.

$$F_{Total} = F_{Banzo} + F_{Alma} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{Total} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2f_{ck,cil.} \times h \times b + \frac{A_v}{\sqrt{3}} \times f_y \\ \left(\frac{h \times t_f^2}{(b-2R)} + \frac{A_v}{\sqrt{3}} \right) \times f_y \end{array} \right. \quad (6.7)$$

No Quadro 6.1 apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente e analiticamente a partir das equações propostas. Pode constatar-se que o banzo na equação proposta tem uma contribuição para a capacidade de carga do conector, de cerca de 22%. A alma do conector ao corte apresenta uma contribuição muito maior, cerca de 78% da capacidade de carga total do conector.

Quadro 6.1 – Valores obtidos a partir da equação proposta

| Conector | $f_{ck,cyl}$ (MPa) | P_{teste} (kN) | F_{Banzo} | | F_{Alma} | | F_{Total} (kN) |
|----------|--------------------|------------------|-------------|-------|------------|-------|------------------|
| | | | (kN) | (%) | (kN) | (%) | |
| TPU_1 | 22,60 | 434,45 | 74,91 | 22,12 | 263,75 | 77,88 | 338,66 |
| TPU_2 | 29,20 | 411,80 | 74,91 | 22,12 | 263,75 | 77,88 | 338,66 |

Do Quadro 6.1 conclui-se também que o valor da capacidade de carga obtida, a partir da equação proposta, é cerca de 20% inferior ao valor obtido nos ensaios experimentais. Isto poderá dever-se ao facto de, na equação proposta, se utilizar os valores da tensão de cedência do aço, f_y , quando na realidade existem zonas do conector que poderão ter atingido a tensão última à tração do aço, f_u (tensão ultima à tração de 430 MPa para aço S275, de acordo com EN10025). Certamente existirão também outras componentes, presentes nos ensaios, que não foram tidas em conta na equação, e que terão conferido resistência ao conector, contribuindo também para a diferença entre os resultados, pelo lado da segurança.

Na Figura 6.3 apresenta-se a comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos a partir das equações propostas, utilizando os valores de f_y e f_u . Pode concluir-se que o valor obtido experimentalmente se encontra entre os valores obtidos analiticamente. Desta forma a equação proposta apresenta resultados bastante aceitáveis e dentro da segurança podendo servir para efetuar uma boa estimativa da resistência dos conectores *T-PerfobondUnconnected*.

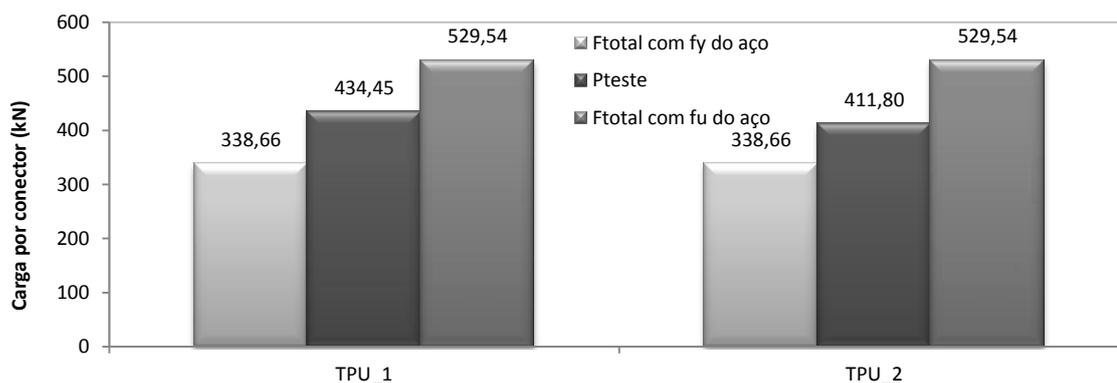


Figura 6.3 - Comparação entre resultados analíticos e experimentais

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Introdução

A presente dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de um conector inovador, o *T-PerfobondUnconnected*, que apresentasse as mesmas características em termos de capacidade de carga que o conector *T-Perfobond*, já existente, melhorando a sua capacidade de deslizamento, com o intuito de se obter um conector dúctil.

No capítulo 1 foi feita uma pequena introdução ao tema deste trabalho apresentando o conceito de estruturas mistas, os objetivos e a estrutura deste documento.

A revisão bibliográfica, apresentada no capítulo 2, mostra o desenvolvimento constante dos tipos de conectores utilizados em estruturas mistas. A necessidade de criar um conector eficiente terá levado à descoberta do conector *stud*, em 1954, sendo este o mais difundido da atualidade. No entanto, com o evoluir das estruturas, são necessários conectores que apresentem maior capacidade de carga e melhor comportamento, levando à procura de conectores com melhores características que os *stud*. No capítulo em questão foram apresentados conectores como o “X-HVB” da *Hilti*, *Crestbond*, *Perfobond* e *T-Perfobond*.

O procedimento dos ensaios experimentais, para avaliar as características dos conectores *T-Perfobond* e *T-PerfobondUnconnected*, apresenta-se no capítulo 3. Foram realizados 8 ensaios divididos em duas series com betões de diferentes características resistentes.

No capítulo 4 foram apresentados os resultados experimentais e as correspondentes curvas força-deslocamento, força-extensão e força-tensão de *von Mises*. Foi também avaliada a influência da variação de vários parâmetros como o tipo de conector, a presença de armadura nos furos e a classe do betão utilizado.

No capítulo 5, realizou-se uma comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os valores obtidos a partir das equações propostas por Vianna (2009) e pelo Eurocodigo 4 (2001) para o conector.

No capítulo 6 é desenvolvido um modelo e proposta uma equação para o cálculo da capacidade resistente do conector tendo em conta uma rotura da ligação envolvendo a plastificação do aço

7.2 Conclusões

O desenvolvimento deste trabalho levou a conclusões bastante interessantes sobre o comportamento dos conectores estudados que em tudo foram ao encontro das conclusões obtidas por outros autores que estudaram conectores comparáveis.

Com a realização dos ensaios, e avaliando as respetivas curvas força-deslocamento, concluiu-se que tanto os conectores *T-Perfobond* como os *T-PerfobondUnconnected*, aqui estudados, apresentaram comportamento dúctil, permitindo um dimensionamento plástico e mais económico, à exceção do conector TP em betão C20/25 e do conector TPU_AR16 em ambos os betões.

A conclusão de que até mesmo o conector TP em betão C25/30 apresentou comportamento dúctil, leva a outra conclusão de que, por vezes em conectores *T-Perfobond* fabricados a partir de perfis com certas espessuras de alma e de banzo, é possível obter um conector com capacidade resistente elevada e ao mesmo tempo dúctil. Este facto seria de esperar, pois uma ligação deste tipo com um conector de alma e banzo muito finos levaria a deformações do próprio conector, levando à ductilidade da ligação.

Concluiu-se também 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 dessa armadura, o aumento da capacidade de carga já não é tão significativo; cerca de 6%. Quanto à ductilidade, esta característica diminui com a colocação de armadura e com o aumento da mesma deixando mesmo o conector TPU_AR16 de ser dúctil em ambos os betões.

O aumento da classe de betão não terá trazido 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 (2001), chegou-se a conclusão de que as equações referidas não serão as mais indicadas para conectores com estas características, pois têm em conta uma rotura por parte do betão. No entanto estas equações poderão ser utilizadas, para conectores tipo TPU, quando comparadas com equações, como a

proposta nesta dissertação, que tenham em conta uma rotura da ligação por plastificação do conector. Neste caso a resistência do conector será considerada a mais pequena entre as duas equações.

Da expressão proposta nesta dissertação, conclui-se que esta leva a valores próximos dos obtidos experimentalmente para os conectores TPU. Sendo esta uma boa forma de se estimar a capacidade de carga, pelo lado da segurança, de conectores deste tipo.

7.3 Propostas para trabalhos futuros

Com o desenvolvimento deste trabalho, após a realização de vários ensaios e de analisar todos os resultados, surgiram varias ideias que poderão trazer benefícios para um melhor conhecimento e aperfeiçoamento do comportamento deste tipo de ligações.

Sugere-se, para trabalhos futuros:

- A utilização de células de carga individuais para cada laje, a fim de se aferir a carga exata que é transferida para um dos conectores presentes em cada ensaio;
- Realizar um maior número de ensaios, para o estudo de conectores *T-Perfobond* variando as espessuras do banzo e da alma;
- A realização de ensaios utilizando o *T-PerfobondUnconnected* com valores de resistência de betão mais distintos, para uma melhor análise da variação da ductilidade e capacidade de carga do conector;
- Utilizando a mesma tipologia de conectores efetuar uma variação da altura do conector para se analisar o ganho de resistência e a influência na ductilidade
- Utilizando os conectores ensaiados, efetuar uma modelação numérica de modo a complementar o trabalho realizado;
- Através de um maior número de ensaios e de regressões múltiplas, corrigir a equação proposta de modo serem obtidos resultados mais aproximados;
- Efetuar ensaios à escala real de modo a aferir o comportamento dos conectores *T-PerfobondUnconnected* inseridos em vigas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros

- Calado, L. e Santos, J., “Estruturas Mistas de Aço e Betão”, IST Press, Lisboa, 2009.
- Jonhson, R.P., “Composite Structures of Steel and Concrete”, Volume 1, Blackwell Scientific Publications, Oxford, Second Edition, 1994 (em Inglês).
- Montoya, P., Meseguer, A. e Morán, F., “Hormigón Armado”, Volume 1, Edição Gustavo Gilli, Barcelona, 1991, 3ª Edição (em Espanhol)

Artigos em Conferências

- Vianna *et al* (2012) apresentado no I Congresso Luso Africano de Construção Metálica Sustentável (2012)

Artigos em Revista

- Ahn, J. H., Kim, S. H., Jeong, Y. J., “Shear behaviour of *Perfobond* rib shear connector under static and cyclic loadings”, Magazine of Concrete Research, 2008, Vol.60, pp. 347-357.
- Ahn, J. H., Lee, C. G., Won, J. H., Kim, S. H., “Shear resistance of the *Perfobond*-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement”, Journal of Constructional Steel Research, 2010, Vol. 66, pp.1295-1307.
- Al-Darzi, S. Y. K., Chen, A. R., Liu, Y. Q., “Finite Element Simulation and Parametric Studies of “*Perfobond*” Rib Connector”, American Journal of Applied Sciences, 2007, 4 (3), pp. 122-127.
- Cruz, P. J. S., Valente, M. I. B., Veríssimo, G., Paes, J. L. R., Fakury, R., “Desenvolvimentos recentes no domínio da conexão aço-concreto no contexto de estruturas mistas”, Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto: Anais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 20p, 2006.
- Cosenza, E.; Zandonini, R. “Composite construction”. Structural Engineering Handbook, Ed. Chen Wai-Fah, Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- Costa-Neves, L. F., Figueiredo, J. P., Vellasco, P. C. G. da S., Vianna, J. Da Cruz, “Perforated shear connectors on composite girders under monotonic loading: An experimental approach”, Engineering structures, 2013, Vol. 56, pp. 721-737.
- Macháček, J., Studnicka, J., “Perforated shear connector”, Steel and Composite Structures, 2002, Vol. 2, No. 1, pp. 51-66.

- Medberry, S. B., Shahrooz, B.U, “*Perfobond* shear connector for composite construction”, AISC Engineering Journal, 2002, vol. 56, No. 1, pp.2-12.
- Martins, J. P. S. C., Costa Neves, L. F., Vellasco, P. C. G. S., “Experimental evaluation of the structural response of *Perfobond* shear connectors”, Engineering structures, 2010, Vol. 32, pp. 1976-1985.
- Oguejiofor, E.C. e Hosain, M. U., “Behaviour of *Perfobond* rib shear connectors in composite beams: full-size tests”, Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, N°19, pp. 224-235.
- Oguejiofor, E. C., Hosain, M. U., “A parametric study of *Perfobond* rib shear Connectors”, Canadian Journal of Civil Engineering, 1994; Vol. 21, pp. 614-625.
- Oguejiofor, E.C., Hosain, M.U, “Numerical analysis of “*push-out*” specimens with “*Perfobond*” rib connectors”, Computers and Structures, 1997, Vol. 62, Número 4, pp. 617-624.
- Tristão, G. A., Neto, J. M, “Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço concreto com análise da resposta numérica”, 2001.
- Ushijima, Y., Hosaka, T., Watanabe, H., Tachibana, Y., Hiragi, H., “An Experimental Study on Shear Characteristics of “*Perfobond*” Strip and its Rational Strength Equations, in Eligehausen, R., editor, Proceedings of the International Symposium on Connections between Steel and Concrete, Stuttgart, University of Stuttgart, 2001, pp. 1066-1075.
- Vellasco, P. C. G. S., Andrade, S. A. L., Ferreira, L. R. O., “Semi-Rigid Composite Frames with “*Perfobond*” and T-rib Connectors Part 1: Full Scale tests”, Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63, pp. 263-279.
- Verissimo, G. S., Valente, I., Paes, J. L. R., Cruz, P. J. S., Fakury, R. H., “Design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures”, in Cruz, P. J. S., Fangopol, D. M., Costa Neves, L. F., editors, Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost, IABMAS’06, Porto, Portugal, 2006.
- Verissimo, G.S.; Oliveira, A.F.N.; Fakury, R.H.; Rodrigues, F.C.; Paes, J.L.R.; Valente, I.; Cruz, P.J.S. Avaliação do desempenho de umconector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto. CMNE/CILAMCE 2007, Porto, Portugal, 2007.
- Vianna, J. C., Costa Neves, L. F., Vellasco, P. C. G. S., Andrade, S. A. L., “Estudo Comparativo de Conectores de Corte para Estruturas Mistas de Aço e Betão”, Construção Magazine, 2007, N° 23, pp. 23-30.
- Vianna, J. C., Costa Neves, L. F., Vellasco, P. C. G. S., Andrade, S. A. L., “Experimental assessment of “*Perfobond*” and T-”*Perfobond*” shear connectors’ structural response”, Journal of Constructional Steel Research, 2008, Vol. 65, pp. 408-421.
- Vianna, J. C., Costa Neves, L. F., Vellasco, P. C. G. S., Andrade, S. A. L., “Experimental study of *Perfobond* shear connectors in composite construction”, Journal of Constructional Steel Research, 2013, Vol. 81, pp. 62-75.

Zellner, W., “Recent designs of composite bridges and new type of shear connectors”,
Proceedings of the IABSE/ASCE Engineering Foundation Conference on Composite
Construction, Henniker NH, 1987, pp. 240-252.

Teses de Mestrado/Doutoramento

Martins, J.P.S.C., “Avaliação do Comportamento Estrutural de Conectores em Estruturas Mistas:
o *Perfobond*”, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Portugal, 2008.
Vianna, J.C “Avaliação do Comportamento Estrutural de Conectores *Perfobond* e *T-Perfobond*
para Vigas Mistas. Tese de Doutorado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2009.
Figueiredo, J. P.M., “Conectores *Perfobond* submetidos a carregamento Monotónico e cíclico”,
Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Portugal, 2012.

Especificações

AISC – Specification for Structural Steel Buildings. Chicago (IL): American Institute of Steel
Construction, Inc., 2005.
CEN – Eurocode N° 2 – Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for
Building – European Standard EN 1992-1-1, Commission of the European Communities,
Bruxelas, 2004.
CEN – Eurocode N° 3 – Design of steel Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for
Building – European Standard EN 1993-1-1, Commission of the European Communities,
Bruxelas, 2004.
CEN – Eurocode N° 4 – Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1-1: General
Rules and Rules for Building – European Standard EN 1994-1-1, Commission of the
European Communities, Bruxelas, 1994.
CEN – Eurocode N° 4 – Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1-1: General
Rules and Rules for Building – European Standard EN 1994-1-1, Commission of the
European Communities, Bruxelas, 2004.
CSA (2001) CAN/CSA-16-01, Limit States Design of Steel Structures, Canadian Standart
Association, Rexdale, Ontario.