

1 Introdução

Esta tese apresenta a avaliação do comportamento estrutural de conectores de cisalhamento tipo *Perfobond* e *T-Perfobond* em estruturas mistas compostas por dois materiais fundamentais para a concretização de grandes projetos de engenharia: o aço e o concreto armado.

O comportamento de estruturas mistas é baseado na ação conjunta entre o perfil de aço e o concreto armado. Para que isto ocorra, é necessária que na interface aço-concreto desenvolvam-se forças longitudinais de cisalhamento. Ensaio em estruturas mistas mostram que, para baixos valores de carga, a maior parte do cisalhamento longitudinal é desenvolvida na interface por aderência química entre a nata de cimento e a superfície de aço. No entanto, continuando o carregamento, percebe-se que, para cargas mais elevadas, ocorre o rompimento desta aderência e que, uma vez rompida, esta não pode mais ser restaurada. Os valores de carga que provocam a quebra da adesão química são bastante variados, dependendo de fatores tais como: fator água-cimento, desenvolvimento de fissuras, retração do concreto, tensões provocadas pela variação de temperatura, falhas locais de contato entre o concreto e o aço devido a problemas durante a execução, entre outros. Desta forma, exceto em vigas totalmente envolvidas por concreto, pilares mistos e fôrmas de aço com cantos reentrantes, torna-se impraticável levar em conta esses fenômenos no cálculo de sistemas mistos. É necessário, portanto, o uso de conectores de cisalhamento para transmitir o cisalhamento na interface aço-concreto.

Preliminar a todo o tratamento das características comportamentais e dos critérios de projeto do conector de cisalhamento é conveniente dar algumas definições e classificações úteis baseadas nos parâmetros-chaves comportamentais da rigidez, resistência, e ductilidade:

- Rigidez: um conector de cisalhamento realiza a interação total (a interação é "rígida" e nenhum deslizamento ocorre sob tensão na interface aço-concreto) ou a interação parcial (a interação é flexível e o deslizamento ocorre na interface).
- Resistência: quando todo esforço de cisalhamento existente entre a viga de aço e a laje de concreto é transmitido, trata-se de um caso

de interação total. (Os conectores são colocados em número suficiente para desenvolver a resistência máxima à flexão da viga mista.) Entretanto, quando a resistência de cálculo do sistema é muito superior à sollicitação pode-se transmitir parte deste esforço de cisalhamento reduzindo a resistência de cálculo do sistema misto, e neste caso trabalha-se com a Interação Parcial.

- Finalmente, uma conexão é dúctil se sua capacidade de deformação (deslizamento) for adequada para uma redistribuição completa das forças que agem nos conectores individuais.

Os parâmetros comportamentais relevantes para o tipo de análise adotado no projeto (isto é, análise elástica, inelástica, ou plástica) têm que ser consideradas. Em particular, a flexibilidade da interação deve ser considerada nas análises elásticas e inelásticas, que fariam o projeto menos complexo. Entretanto, a suposição simplificada da interação total é satisfatória para a maioria dos conectores de cisalhamento utilizados na prática onde o efeito do deslizamento não é considerado.

1.1. Vigas mistas

1.1.1. Características das vigas mistas

As vigas mistas de aço e concreto consistem em um componente de aço simétrico em relação ao plano de flexão, que pode ser um perfil I (outros perfis, como caixão ou tubular retangular) ou uma treliça, com uma laje de concreto acima de sua face superior, segundo a NBR 8800:2008. Os tipos de lajes previstos são: maciça moldada no local, mista e com pré-laje de concreto pré-moldada. Deve haver ligação mecânica por meio de conectores de cisalhamento entre o componente de aço e a laje, de tal forma que ambos funcionem como um conjunto para resistir à flexão. Em qualquer situação, a flexão ocorrerá no plano que passa pelos centros geométricos das mesas ou dos banzos superior e inferior do componente de aço.

As vigas mistas são empregadas em construções de edifícios e pontes, Figura 1.1 e Figura 1.2, Cosenza & Zandonini (1999).

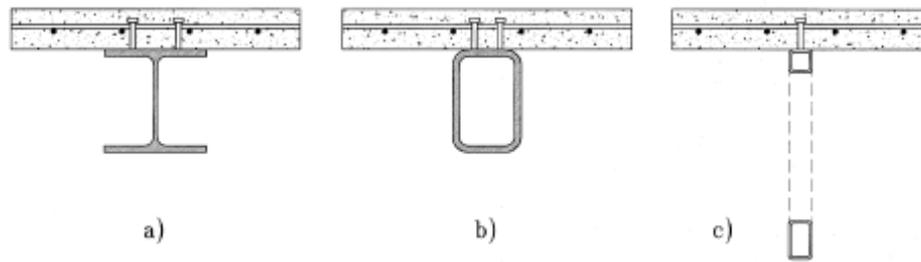


Figura 1.1 – Vigas mistas (a) Seção de aço em I. (b) Seção de aço em caixão. (c) Sistema treliçado.

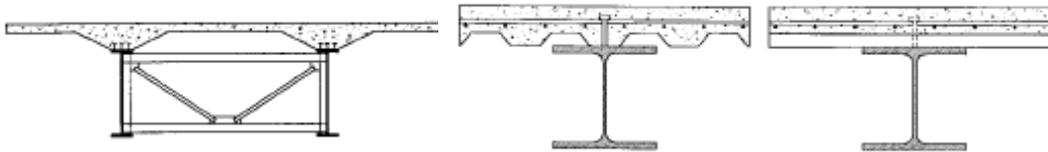


Figura 1.2 – (a) Pontes mistas. (b) e (c) Laje steel deck em sistema de piso

O benefício de se usar o aço estrutural com o concreto é de se aproveitar ao máximo o desempenho de cada material: a tração do aço, e a compressão do concreto, formando assim um sistema mais eficiente se comparado à viga somente de aço. Algumas vantagens da consideração da ação mista em vigas de aço e lajes de concreto são:

- redução do peso global da estrutura e conseqüente alívio nas fundações;
- diminuição da altura dos perfis;
- possibilidade de vencer maiores vãos;
- redução de flechas;
- redução de custos.

As vigas podem ser simplesmente apoiadas ou contínuas. As simplesmente apoiadas contribuem para maior eficiência do sistema misto, pois a viga de aço trabalha predominantemente à tração e a laje de concreto à compressão, embora não seja muitas vezes a solução mais econômica.

1.1.2. Comportamento da viga mista em relação ao cisalhamento na interface

A ação mista é desenvolvida quando dois elementos estruturais são interconectados de tal forma a se deformarem como um único elemento como,

por exemplo, o segundo sistema da Figura 1.3 formado por uma viga de aço biapoiada suportando uma laje de concreto em sua face superior.

Não existindo qualquer ligação na interface, os dois elementos se deformam independentemente e cada superfície da interface estará submetida a diferentes deformações, o que provocará um deslizamento relativo entre elas. Considerando que o elemento de aço esteja interligado ao elemento de concreto por meio de conectores de cisalhamento, com resistência suficiente para resistir ao fluxo de cisalhamento gerado na interface, os dois elementos tenderão a se deformar como um único elemento.

A ligação entre o aço e o concreto é dimensionada em função do diagrama de esforços cortantes longitudinais por unidade de comprimento, conhecido como fluxo de cisalhamento longitudinal. A resultante do diagrama do fluxo de cisalhamento longitudinal é dada em função da máxima força cortante que se pode transmitir através da ligação.

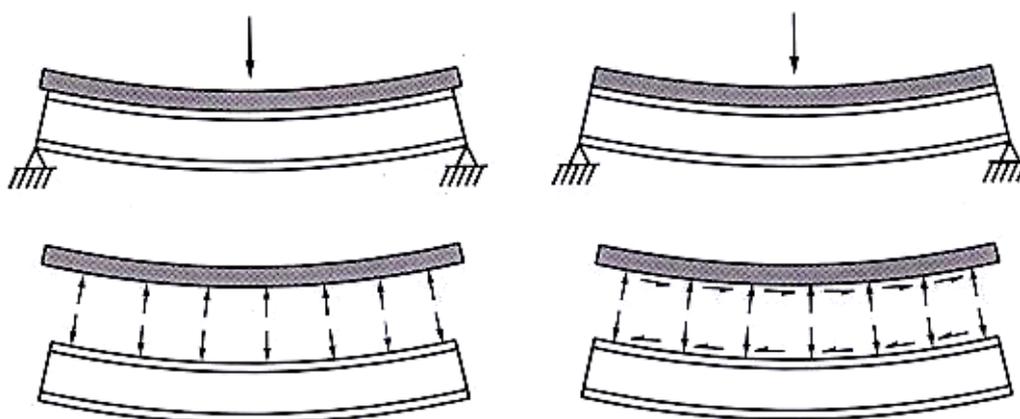


Figura 1.3 – Comparação de vigas fletidas sem ação mista e com ação mista, Queiroz et.al (2001)

O índice que permite avaliar o grau de interação entre laje e perfil, η_i , é determinado pela relação entre o somatório das resistências individuais dos conectores situados entre uma seção de momento fletor máximo e a seção adjacente de momento nulo, já a resultante do fluxo de cisalhamento, tem valor igual a menor resistência oferecida pela laje ou pelo perfil. Quando $\eta_i \geq 1$ a interação é completa e quando $\eta_i < 1$ a interação é parcial.

O fluxo de cisalhamento longitudinal que se gera na interface entre a laje de concreto e a viga de aço, em vigas mistas, é transferido por meio de um

número discreto de pontos, representados pelos conectores de cisalhamento, conforme mencionado em Oehlers (1989). No caso do conector pino com cabeça (stud), as forças de cisalhamento longitudinal são transferidas da laje de concreto para a viga de aço, conforme Figura 1.4.

O fuste do conector é submetido à força de cisalhamento (F_{sh}), distante da mesa do perfil metálico de uma distância z , segundo Oehlers & Park (1992). O produto da força F_{sh} pela correspondente excentricidade z gera um momento M_{sh} . Logo, essas forças atuantes resultam em tensões de cisalhamento e normais aplicadas ao corpo do conector.

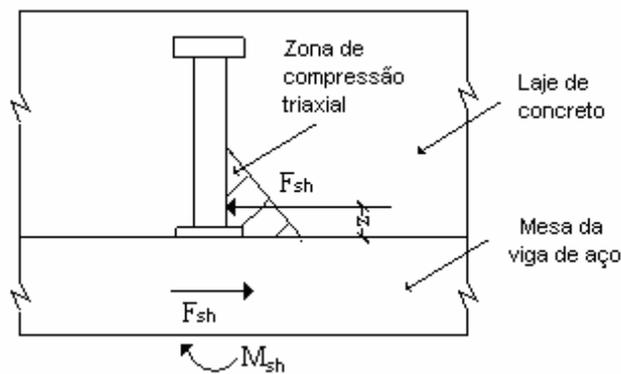


Figura 1.4 – Transferência de forças de cisalhamento longitudinal por meio de conectores *studs*, David (2007).

A magnitude destas tensões não depende somente da força de cisalhamento F_{sh} , mas também da excentricidade, z , que é função da rigidez relativa entre o concreto e o conector. Se a rigidez do concreto é muito maior que a rigidez apresentada pelo conector, a excentricidade, z , tenderá a zero, caso contrário, z tenderá a metade da altura do conector pino com cabeça.

A zona de concreto que se encontra imediatamente em frente ao conector de cisalhamento, denominada zona de compressão triaxial, está sujeita a elevadas tensões de compressão, conforme apresentada na Figura 1.4. Segundo os mesmos autores, existem diversos mecanismos que levam à ruptura do conector pino com cabeça quando da transferência das forças de cisalhamento longitudinal da laje para a viga:

a) quando o concreto for menos rígido quando comparado ao conector, o concreto começa a fissurar antes que o conector plastifique, proporcionado assim o aumento da excentricidade z . Conseqüentemente, as tensões normais no pino do conector aumentarão mais rapidamente que as tensões de cisalhamento, conduzindo o conector à ruptura.

b) se o conector for menos rígido que o concreto, z diminui, reduzindo assim o momento (M_{sh}) no conector. Além disso, a zona de compressão triaxial se reduzirá, diminuindo a altura efetiva do conector, ocasionando assim a ruptura do concreto na zona de compressão triaxial e, conseqüentemente, o aumento de z , já que a rigidez do concreto diminui. A partir daí, retorna-se ao mecanismo de ruptura descrito no item a.

Quanto aos modos de fissuração que podem ocorrer na laje, associados à ruptura do conector de cisalhamento, por conseqüência da redução gradual da resistência e rigidez do concreto na zona de compressão triaxial, destacam-se três tipos, segundo Oehlers (1989):

- fissuração perpendicular à direção longitudinal da viga,
- fissuração que se propaga na direção das bielas de compressão
- fissuração longitudinal à viga, sendo essa a mais nociva ao concreto, tendo como conseqüência a ruptura do conector.

Segundo essa mesma referência, a armadura transversal não impede a ruptura do concreto, porém limita a propagação das fissuras. Os tipos de fissuração estão ilustrados na Figura 1.5.

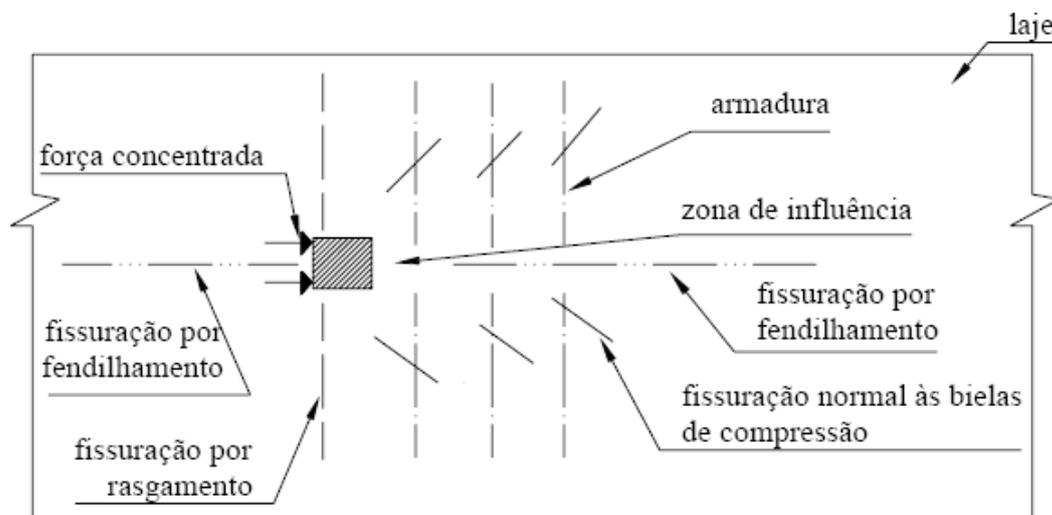


Figura 1.5 – Tipos de fissuração na laje, Kotinda (2006)

Desta forma, recomenda-se que sejam adotadas armaduras transversais com o objetivo de se limitar a propagação da fissura longitudinal na região onde se encontram as linhas de conectores de cisalhamento. Esta armadura deverá ser uniformemente distribuída ao longo do vão da viga, posicionada na face inferior da laje e calculada de acordo com o modelo de treliça de Morsh.

De acordo com a NBR 8800:2008 a fissuração da laje, causada por cisalhamento, na região adjacente à viga de aço, paralelamente a esta, deve ser controlada por armadura adicional, transversal à viga, a não ser que se demonstre que as armaduras necessárias para outros fins, devidamente ancoradas, sejam suficientes para esta finalidade. A referida armadura, denominada armadura de costura, deve ser espaçada uniformemente ao longo do comprimento, entre as seções de momento máximo positivo e momento nulo nas regiões com momento positivo, ou entre as seções de momento máximo negativo e momento nulo nas regiões com momento negativo.

A área da seção desta armadura, A_s , não pode ser inferior a 0,2% da área da seção de cisalhamento do concreto por plano de cisalhamento (plano A-A na Figura 1.6) no caso de lajes maciças ou de lajes mistas com nervuras longitudinais ao perfil de aço e 0,1% no caso de lajes mistas com nervuras transversais, não sendo em nenhum caso inferior a 150 mm²/m. Deve-se ainda atender, para cada plano de cisalhamento longitudinal, tanto nas regiões de momentos positivos quanto nas de momentos negativos, às seguintes condições, Cosenza & Zandonini (1999):

$$v \leq v1 \quad (1.1)$$

Onde: v é a força de cisalhamento longitudinal de projeto

$$v = \frac{q_u}{s} \quad (1.2)$$

E $v1$ (força de cisalhamento longitudinal de cálculo) o menor entre:

$$v1 = 2,5 \cdot \eta \cdot A_{cv} \cdot \tau_u + A_{efv} \cdot f_{ysr} + v_{sd} \quad (1.3)$$

$$v1 = 0,2 \cdot \eta \cdot A_{cv} \cdot f_c + \frac{v_{sd}}{\sqrt{3}} \quad (1.4)$$

Onde:

q_u é a resistência do conector de cisalhamento;

s é o espaçamento entre os conectores

A_{cv} é a área de cisalhamento do concreto no plano considerado, por unidade de comprimento (mm²/mm);

A_{efv} é a área da armadura transversal disponível na seção da laje considerada (corte A-A da Figura 1.6) por unidade de comprimento (mm²/mm);

η é o fator que considera a densidade do concreto, para concreto normal

$\eta=1$;

τ_u é a resistência ao cisalhamento dada por $0,25.f_{ct}$;

f_{ct} é a resistência a tração do concreto dada por $0,21.(f_{ck})^{2/3}$; sendo f_{ck} a resistência característica do concreto a compressão (MPa);

v_{sd} é a contribuição da forma de aço no caso do *steel-deck*;

f_{ysr} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura dada por f_y/γ_s , f_y é a resistência ao escoamento do aço e γ_s é o coeficiente de ponderação do aço igual a 1,15;

f_c é a resistência de cálculo à compressão do concreto dada por f_{ck}/γ_c , γ_c é o coeficiente de ponderação do concreto igual a 1,50;

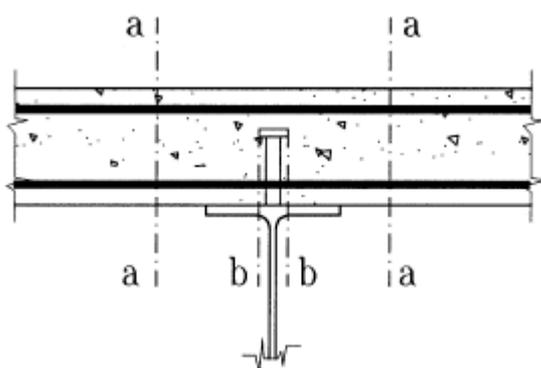


Figura 1.6 – Superfície típica de falha ao cisalhamento, Cosenza & Zandonini (1999)

1.2. Motivação

O emprego de estruturas mistas já é bastante difundido em vários países, e vem sendo a cada ano mais comum no Brasil.

A motivação para desenvolvimento de novos produtos para a transferência de cisalhamento em estruturas mistas é relacionada a assuntos que envolvem particular tecnologia, necessidades econômicas ou estrutural de projetos específicos. Neste contexto, alguns outros conectores de cisalhamento alternativos são propostos para estruturas mistas, o *T-Perfobond* (Figura 1.7). Este conector deriva do conector *Perfobond* acrescentando a componente da mesa ao conector, trabalhando como um bloco. A motivação por desenvolver este conector *T-Perfobond* é combinar a alta resistência do conector tipo bloco com alguma ductilidade e resistência ao levantamento que surge dos furos do *Perfobond*.

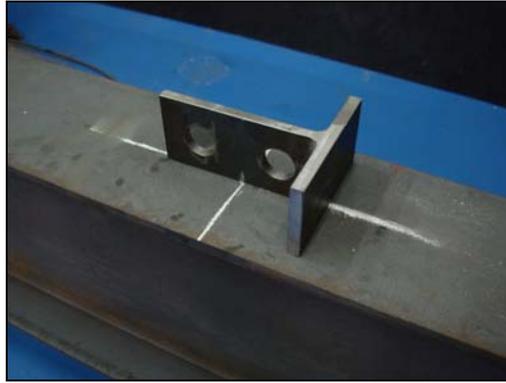


Figura 1.7 – Conector proposto: *T-Perfobond*.

1.3. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver e caracterizar um conector de cisalhamento, o *T-Perfobond*, que possui alta capacidade de carga e deslizamento, sendo portanto um conector dúctil.

Para avaliar a eficiência de tal conector, foi necessário o estudo do comportamento estrutural do conector *Perfobond*, já que este compõe uma parte do conector proposto.

Uma série de ensaios experimentais do tipo *push-out* com conectores *Perfobond* e *T-Perfobond* foi realizada. O ensaio *push-out*, definido no EUROCODE 4 (2005), é um ensaio padrão para analisar e caracterizar o comportamento da ligação entre o aço e o concreto. Este tipo de ensaio foi realizado neste trabalho por ser apropriado para estudar a resistência e características de tais conectores e possibilitar uma comparação com trabalhos realizados por outros autores.

Neste trabalho foi analisado o projeto ideal dos ensaios de *push-out*, variando o tipo de apoio, com ou sem o neoprene na base, e variando sua espessura. Verificou-se que dependendo da espessura adotada, esta tem grande influência no comportamento e, conseqüentemente, nos resultados dos ensaios.

Através dos ensaios de *push-out*, foi possível determinar a capacidade de carga máxima do conector, a capacidade de deformação e a relação carga-deslizamento, antes e depois que a carga máxima é atingida. Os valores de carga máxima e deslizamento máximo são importantes para o projeto de vigas mistas, pois estes determinam o possível modo de falha.

Os ensaios de *push-out* simulam o comportamento do aço e concreto da viga mista. No entanto, a distribuição de carga ao longo da viga mista não é a

mesma que ocorre nos ensaios de *push-out*, que é de forma direta. Em uma viga mista, o fluxo de cisalhamento na interface aço-concreto varia ao longo da viga e depende da distribuição da carga. Além disso, em uma viga mista, as deformações dos conectores alteram o fluxo da força de cisalhamento, havendo uma diminuição da força máxima de cisalhamento e redistribuição da mesma. Portanto, foi importante verificar se os resultados obtidos dos ensaios de *push-out* são adequados para serem utilizados em análises de viga mista. Pela primeira vez no país, um ensaio em escala real foi realizado para verificar o comportamento do conector *T-Perfobond* numa simulação de uma estrutura real, verificando sua capacidade de deformação, sua ductilidade e sua capacidade de carga. O ensaio, cuja dimensões foram 9,0m de vão, com laje de 2,30m de largura e 0,12m de espessura, foi realizado no Laboratório de Estruturas da PUC-Rio, com carregamento distribuído. Com este ensaio de flexão da viga mista foi possível verificar os resultados dos *push-out*, e analisar a transferência dos esforços entre os elementos estruturais.

Como alternativa aos ensaios em escala real, os quais são bastante onerosos, a modelagem numérica através dos Elementos Finitos foi adotada afim de verificar a aplicação dos conectores aqui estudados em vigas mistas, variando o espaçamento entre os conectores e, conseqüentemente, o grau de interação.

A intenção deste trabalho foi analisar o conector *T-Perfobond*, através de ensaios de *push-out*, ensaio em escala real e em uma modelagem numérica.

1.4. Estrutura do documento

Esta tese começa com o presente capítulo, onde o escopo do trabalho, as motivações e os objetivos são estabelecidos.

A primeira parte deste estudo, apresentada no Capítulo 2, é dedicada a revisão bibliográfica. São apresentados alguns tipos de conectores de cisalhamento, os ensaios usuais para obter a caracterização destes, as características de viga mista e seu comportamento em relação ao cisalhamento na interface entre seus elementos, perfil de aço e laje de concreto.

O Capítulo 3 descreve a campanha experimental dos ensaios de *push-out* realizados com os conectores *Perfobond*, *T-Perfobond* e *T*. É apresentado em duas etapas. A primeira etapa é dedicada a campanha experimental realizada na Universidade de Coimbra, em Portugal, que é composta por quarenta e seis

ensaios. A segunda etapa apresenta uma nova geometria do conector *T-Perfobond*, que foi analisado através de seis ensaios do tipo *push-out*. Neste capítulo apresenta-se além das descrições da preparação dos ensaios, os resultados obtidos e suas conclusões.

No Capítulo 4 apresenta-se o ensaio experimental de uma viga mista em flexão. A viga em questão tem 8,8m de vão livre e uma laje de concreto com espessura de 120mm e 2,30m de largura. Nesta viga são instalados seis conectores de cisalhamento do tipo *T-Perfobond*, e foi dimensionada para interação parcial. São apresentadas a montagem do ensaio, os resultados obtidos e uma avaliação teórica da resistência.

A modelagem numérica utilizada neste trabalho é apresentado no Capítulo 5. Apresenta-se um breve estudo das mesas dos conectores *T-Perfobond* com ênfase na sua capacidade de deformação. Descreve-se também a modelagem numérica de uma viga mista no qual abrange o estudo do emprego dos conectores *Studs*, *Perfobond* e *T-Perfobond* em quantidades variadas.

A discussão dos resultados são apresentados no Capítulo 6. É descrito uma comparação dos resultados dos ensaios de *push-out* com as equações teóricas existentes e são apresentadas novas propostas de equações para o dimensionamento dos conectores aqui apresentados. Uma comparação do resultado do ensaio em escala real da viga mista com o resultado obtido do *push-out* é apresentada.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as considerações finais deste trabalho sob forma de suas principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Os anexos presentes no final deste volume apresentam:

Anexo A: Dimensionamento da armadura transversal.

Anexo B: Dimensionamento da viga mista do ensaio em escala real segundo o EUROCODE 4 (2005).

Anexo C: Verificação dos momentos e tensões atuantes no ensaio em escala real.

Anexo D: Tabela dos dados de comparação entre o ensaio *push-out* e ensaio escala real.