

7

Considerações finais

7.1.

Introdução

Este trabalho teve como objetivo geral desenvolver uma investigação teórica e experimental sobre os conectores de cisalhamento *Perfobond* e propor uma nova geometria de conector, denominado de *T-Perfobond*.

No Capítulo 1 foi apresentada a introdução deste trabalho, abordando o comportamento das estruturas mistas, a motivação para o desenvolvimento desta pesquisa, os objetivos e a estrutura deste documento.

A revisão bibliográfica, apresentada no Capítulo 2, mostrou que melhoras no sistema de ligação vêm sendo feitas desde o início do século passado. O desenvolvimento de conectores mecânicos eficientes progrediu lentamente até que em 1954 surgiram os *Studs*, como uma inovação significativa, e sendo este atualmente uns dos conectores de uso mais difundido na Europa e nos EUA. No entanto, a busca por novas tecnologias como alternativa aos *Studs* vem ocorrendo até aos dias de hoje. Dentre os conectores apresentados neste capítulo estão os tipo *U*, tipo *T*, o *Perfobond* e o *Crestbond*.

No Capítulo 3 foi apresentada a campanha experimental dos ensaios de *push-out* realizada para avaliar os conectores *Perfobond* e *T-Perfobond*. A primeira etapa foi realizada na Universidade de Coimbra, Portugal, e foi composta por 44 ensaios. Avaliou-se os conectores *Perfobond*, *T-Perfobond* e *T*. A segunda etapa, composta de 8 ensaios, foi realizada na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil. Esta etapa foi programada em função dos resultados obtidos da primeira, na qual se projetou um novo conector *T-Perfobond*, sendo este mais flexível. Foi realizado um total de 52 ensaios do tipo *push-out*.

No Capítulo 4 foi apresentado o programa experimental para o ensaio em escala real de uma viga mista. A escolha do conector de cisalhamento que compôs o ensaio foi em função dos resultados dos ensaios *push-out*. Optou-se pelo conector do ensaio TP-2F-AR-IN-12-16-B, que utilizou armaduras passantes de 16mm nos furos e estribo de 12mm, pois este apresentou melhor

comportamento quanto a ductilidade e a capacidade de carga. O comprimento adotado para o ensaio foi de 9,0m de comprimento. As dimensões da laje de concreto foram de 2,25m de largura e 12cm de espessura.

No Capítulo 5 foram apresentadas as simulações numéricas realizadas neste trabalho. Foram desenvolvidos modelos numéricos bidimensionais e tridimensionais. O modelo bidimensional foi adotado na simulação da mesa do conector *T-Perfobond* para verificar a capacidade de deformação do conector, para que com estes resultados, pudesse ser proposta uma nova geometria para o *T-Perfobond*.

O modelo tridimensional foi adotado na simulação do ensaio em escala real que foi realizada para verificar o comportamento dos conectores *Perfobond*, *T-Perfobond* e *Studs*. As vigas consideradas tiveram um vão de 5490mm em perfil laminado I com altura de 305mm (12"x 6" x 44 lb/ft BSB) e a laje de concreto teve 120mm de espessura e 1220mm de largura. A laje foi longitudinalmente armada com quatro barras superiores e quatro barras inferiores de 8mm. A armadura transversal incorporada na superfície superior e inferior foi de 12,7mm a cada 152mm, e 12,7 a cada 305mm, respectivamente.

Uma discussão das equações propostas existentes para a resistência dos conectores *Perfobond* foi apresentada no Capítulo 6. A que melhor se ajustou aos conectores *Perfobond* estudados neste trabalho foi a equação proposta por Al-Darzi et al. (2007). A partir desta equação e com uma análise de regressão múltipla, apresentou-se uma equação com coeficientes ajustados a qual proporcionou resultados mais aproximados.

Para o novo conector proposto neste trabalho, o *T-Perfobond*, primeiramente foram comparados os resultados obtidos dos ensaios experimentais com os resultados da equação apresentada na versão anterior do EUROCODE 4 (2001) para o conector bloco. Em todos os casos a equação existente mostrou-se não conservadora, sendo contra a segurança. Seus valores previstos foram superiores aos valores experimentais. Uma regressão múltipla foi realizada a fim de se propor uma equação ajustada para a resistência do conector *T-Perfobond* nas duas posições consideradas nos ensaios.

Neste capítulo apresentou-se também uma comparação do ensaio em escala real com o ensaio de *push-out*, avaliando a força atuante no conector. Concluiu-se que a força de compressão no ensaio em escala real é superior a força equivalente num ensaio de *push-out*.

No Capítulo 6 também foi apresentado um estudo econômico dos conectores deste trabalho. Realizou-se um estudo no qual foram dimensionadas

vigas mistas com laje de 120 mm para vãos distintos (6, 9 e 12 m). Os conectores avaliados foram os *Perfobond*, *T-Perfobond*, *T* e o de uso mais comum, os Studs.

7.2.

Principais conclusões

Diversos autores vêm apresentando trabalhos numéricos e experimentais dentro desta linha de pesquisa, percebendo-se assim que o estudo de vigas mistas não é uma novidade, e que continua motivando a busca por novas tecnologias que atendam não só melhoras sob o ponto de vista estrutural, mas também atendam necessidades econômicas nas construções mistas.

Os resultados da campanha experimental dos ensaios de *push-out* serviram para avaliar as diferenças do comportamento estrutural entre os conectores *Perfobond*, *T-Perfobond* e *T* em termos de suas capacidades de carga e deformação, bem como quanto ao modo de ruína. Os conectores tipo *T-Perfobond* possuem maior capacidade de carga e maior rigidez do que os conectores *Perfobond*. A vantagem de se utilizar este tipo de conector é este ser produzido a partir de perfis laminados, não sendo necessário produzir um novo elemento de ligação específico. Os conectores *T-Perfobond* produzidos em Portugal, a partir do perfil IPN340, ao contrário dos restantes tipos de conectores, não apresentou um comportamento dúctil, sendo por isso necessário proceder a um dimensionamento elástico, logo menos econômico. Já os conectores *T-Perfobond*, produzidos no Brasil, a partir de um perfil HP200x53, adotando armaduras nos furos, apresentaram comportamento dúctil, permitindo portanto um dimensionamento plástico.

Com o ensaio em escala real foi possível avaliar o comportamento do conector *T-Perfobond* num ensaio de flexão. O projeto da viga mista adotou um dimensionamento para interação parcial. No ensaio, como era previsto, a falha foi condicionada pelo deslizamento na interface aço-concreto, no qual se localizou em um dos lados da viga, e esta apresentou grande capacidade de deformação vertical. O deslizamento na interface mostrou ter grande influência na rigidez da viga mista, conforme há um aumento no deslizamento, há perda de rigidez do sistema.

Através do ensaio, comprovou-se que as maiores concentrações de tensões ocorrem nas extremidades das vigas, portanto os conectores instalados nas extremidades apresentam maiores deformações.

Em relação às vigas mistas, observou-se que o momento resistente experimental foi praticamente igual ao previsto no dimensionamento pela análise plástica. Com isso, foi possível concluir que o modelo de plastificação total foi considerado satisfatório para dimensionamento de viga mista com conectores tipo *T-Perfobond*.

A partir do resultado obtido da simulação numérica da mesa do conector *T-Perfobond*, foi proposto o novo *T-Perfobond* fabricado a partir do perfil HP200x53 que se mostrou mais dúctil do que o primeiro *T-Perfobond* proposto em Portugal.

O modelo tridimensional adotado na simulação do ensaio em escala real permitiu adotar várias distribuições dos conectores, variando assim o número de conectores e espaçamento. As curvas carga versus deslizamento dos conectores (obtidas dos ensaios de *push-out*) foram utilizadas como dados de entrada para os elementos de mola não linear. O modelo se mostrou efetivo em termos de prever a resposta de carga e deflexão para vigas sujeitas a cargas concentradas, o deslizamento longitudinal na interface aço-concreto, a força de cisalhamento no conector e o modo de falha (falha do conector ou da laje de concreto por esmagamento). Foi capaz também de investigar as vigas com interação total ou parcial ao cisalhamento.

Da regressão múltipla realizada a fim de se propor uma equação ajustada para a resistência do conector *T-Perfobond* conclui-se que para o conector *T-Perfobond* com a mesa sujeita a compressão, a equação leva em consideração a contribuição do bloco do conector e do *Perfobond*, sendo que a maior contribuição é do bloco. Já na equação proposta para os conectores *T-Perfobond* na posição invertida, não há contribuição do bloco. Verificou-se que através da regressão, apenas as parcelas que contribuem para a resistência do *Perfobond* foram efetivas. As equações propostas apresentaram uma boa aproximação para os conectores aqui estudados. Ressalta-se que as equações propostas tanto para o *Perfobond*, como para o *T-Perfobond*, devem ser consideradas para calcular valores de resistências de conectores que se enquadrem nos modelos aqui apresentados.

Quanto aos ensaios de *push-out*, estes comprovaram ser adequados para analisar a capacidade do conector de cisalhamento, já que através destes ensaios é possível prever tanto a capacidade de carga como a capacidade de deformação do conector.

Relativamente aos aspectos econômicos, concluiu-se que o preço do conjunto de conectores numa viga não é fundamental na composição do preço

total, pois não ultrapassa, nas geometrias estudadas, 2 a 6 % do valor total de fabricação da estrutura.

Foi ainda possível concluir que estes conectores, para além das possíveis vantagens estruturais e tecnológicas, podem conduzir ainda a vantagens econômicas. De fato, a comparação do custo total de incorporação de cada um dos tipos de conectores estudados, relativamente ao caso padrão dos conectores tipo Stud, permitiu concluir que, para as geometrias estudadas, os conectores mais econômicos foram os *Perfobond* e *T-Perfobond*, com uma economia de até 33%, e com tendência para uma economia ligeiramente superior para maiores vãos.

As vantagens estruturais e construtivas de utilizar os tipos de conectores alternativos apresentados nesse trabalho estão relacionadas com a alta resistência que oferecem, sendo necessários menos conectores por viga, quer se considere interação total, quer parcial. Este fato pode ainda possibilitar interação total onde com outro tipo de conectores fosse conseguida apenas interação parcial. A sua colocação, porque é muito mais espaçada do que a dos *Studs*, pode ser discreta, sendo especialmente adequados em intervenções de reforço de estruturas existentes, o que não seria possível com *Studs*. Por outro lado, a solda corrente evita equipamentos especiais de solda com elevada potência elétrica, necessários para instalar os *Studs*. São facilmente produzidos em qualquer fábrica de estruturas metálicas.

Outra vantagem dos conectores tipo *Perfobond* ou *T-Perfobond* refere-se ao seu comportamento à fadiga, já que o detalhe é muito mais favorável do que o correspondente aos *Studs*, trazendo vantagens não apenas em estruturas submetidas à ação de tráfego, mas também no caso de ações sísmicas.

7.3.

Principais contribuições do presente trabalho

Dentre as contribuições em função da investigação teórica e experimental sobre os conectores de cisalhamento realizada neste trabalho, destacam-se:

- A partir da geometria estudada e dos resultados dos ensaios de *push-out* com os conectores *Perfobond*, foi possível propor uma nova geometria de conector, o *T-Perfobond*, apresentando alta capacidade de carga e de deformação, sendo portanto um conector dúctil.

- Foi feita pela primeira vez a modelagem numérica com conectores *Perfobond* e *T-Perfobond*. A modelagem numérica possibilitou a otimização da forma do conector *T-Perfobond*, bem como avaliar o espaçamento entre os conectores numa viga mista.

- O ensaio em escala real permitiu: a comparação com os modelos teóricos elástico e plástico adotados para o dimensionamento de uma viga mista; a avaliação da distribuição de tensões na viga; e a comparação com os ensaios de *push-out* de forma a validar tal ensaio.

- Pela primeira vez o conector *T-Perfobond* foi avaliado através dos ensaios de *push-out* e ensaio em escala real, sendo também a primeira vez adotado para momentos positivos.

- O estudo de custos mostrou que os conectores propostos neste trabalho são economicamente viáveis para utilização em vigas mistas.

- Os resultados dos ensaios de *push-out* juntamente com uma análise de regressão múltipla permitiram o desenvolvimento das fórmulas de cálculo para os conectores. Para os conectores *Perfobond* foi proposta uma equação ajustada à equação de Al-Darzi e tal. (2007). Pela primeira vez foi proposta uma fórmula de cálculo para os conectores *T-Perfobond*.

7.4.

Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que os conectores *Perfobond* e *T-Perfobond* são viáveis para a utilização em elementos estruturais mistos de aço e concreto.

A partir dos resultados dos ensaios e da simulação numérica várias conclusões foram obtidas e algumas questões ainda devem ser esclarecidas, especialmente com os conectores *T-Perfobond*, por ser o novo conector proposto neste trabalho.

Todos os ensaios experimentais de *push-out* realizados consideraram conectores sem furos, com dois furos e quatro furos do mesmo diâmetro. Nestes ensaios sempre houve a resistência frontal do conector. Sugere-se a execução de outros ensaios, variando-se o número de aberturas e eliminando-se a resistência frontal, afim de permitir uma avaliação mais precisa do desempenho dos pinos de concreto e verificar assim a resposta da equação proposta no Capítulo 6.

Neste trabalho, a altura do conector variou juntamente com a altura da laje. Para obter efetivamente a influência destas alturas, deve-se realizar um estudo mais aprofundado. Para isto, seria interessante fazer ensaios adicionais com protótipos similares admitindo duas características: variação da altura do conector com laje de espessura constante, e variação da espessura da laje mantendo a altura do conector. Assim, verifica-se além da excentricidade do conector, a área de concreto ao cisalhamento.

Um estudo interessante seria também a utilização dos conectores T-*Perfobond* em lajes de aço incorporadas. Neste trabalho foram estudados apenas lajes sólidas de concreto armado.

Apenas um ensaio em escala real foi realizado neste trabalho afim de verificar a utilização do T-*Perfobond* numa viga mista. Os resultados obtidos foram suficientes para validar tal conector. No entanto, para conclusões mais precisas, sugere-se que na continuidade da pesquisa deste conector, sejam realizados pelo menos três ensaios em escala real.

Outra pesquisa importante seria estudar o comportamento de dois T-*Perfobond* dispostos em paralelo com as mesas dos conectores em lados opostos. Nesta condição é provável que haja sobreposição dos campos de tensões, e em consequência disso, a resistência de dois conectores pode não ser simplesmente o dobro de um conector isolado.

Na questão da modelagem numérica, seria interessante simular o ensaio em escala real realizado neste trabalho pelo Método dos Elementos Finitos. Este modelo possibilitaria a comparação com os resultados obtidos experimentalmente de forma a validar o modelo. Com isto, possibilitaria a execução de estudos paramétricos, permitindo variar os tipos dos conectores, bem como a quantidade e o espaçamento dos mesmos, com custos inferiores aos exigidos por um programa experimental.

Por fim, uma investigação mais precisa no desempenho do conector T-*Perfobond* sob carregamentos dinâmicos seria também importante, visto que na prática, por exemplo, as lajes de edifícios de estacionamento estão sujeitas a ciclos de carregamento e descarregamento, no qual a totalidade da sobrecarga pode ser atingida.