

Projeto e análise experimental de um conector de cisalhamento em chapa de aço dentada para estruturas mistas de aço e concreto

Gustavo de Souza Veríssimo⁽¹⁾, Maria Isabel Brito Valente⁽²⁾, José Luiz Rangel Paes⁽³⁾, Paulo Jorge de Sousa Cruz⁽⁴⁾, Ricardo Hallal Fakury⁽⁵⁾

Trabalho recebido em 25/10/2006 e aprovado para publicação em 09/05/2007.

Resumo

Este trabalho apresenta o projeto e os resultados de ensaios *push-out* de um novo conector de cisalhamento constituído por uma chapa de aço dentada para ser usado em elementos estruturais mistos de aço e concreto. O conector, denominado CRESTBOND®, consiste de uma chapa plana de aço estrutural com um recorte simétrico caracterizado por saliências e reentrâncias trapezoidais que proporcionam resistência ao cisalhamento longitudinal e previnem a separação transversal entre o perfil metálico e os componentes de concreto (*uplift*). Além disso, as aberturas no conector facilitam a disposição das barras de armadura transversal ao conector como da resistência do concreto. A instalação dos conectores é simples, podendo ser feita com solda comum, sem a necessidade de equipamentos especiais. O comportamento do novo conector foi analisado e comparado com o dos conectores *Perfobond* e *stud*, avaliando-se a influência de diversas características geométricas e mecânicas em relação à capacidade última e à ductilidade da conexão. Os estudos realizados indicam que o conector Crestbond apresenta um comportamento adequado associado a diversas vantagens construtivas e econômicas.

Palavras-chave: Estruturas mistas. Conector de cisalhamento. Ensaio push-out. Estruturas de aço.

¹ M.Sc. em Engenharia de Estruturas, Professor Assistente do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 36570-000 Viçosa MG - Brasil. E-mail: gustavo@ufv.br

² M.Sc. em Estruturas de Engenharia Civil, Professora Assistente do Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães - Portugal. E-mail: isabelv@civil.uminho.pt

³ Doutor em Engenharia Civil/Estruturas, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 36570-000 Viçosa MG - Brasil. E-mail: jlrangel@ufv.br

⁴ Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães - Portugal, E-mail: pcruz@civil.uminho.pt

⁵ Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno, 842 - 2o. Andar - Centro, 30110-060 - Belo Horizonte - MG - Brasil. E-mail: fakury@dees.ufmg.br

1. Introdução

Nos elementos estruturais mistos de aço e concreto, como vigas e pilares, a ligação entre o perfil de aço e os componentes de concreto conduz a que os dois materiais atuem em conjunto, constituindo uma peça única na resistência aos esforços solicitantes. Para que isso ocorra, é necessário que nas interfaces entre o aço e o concreto se desenvolvam forças longitudinais de cisalhamento, o que pode ser obtido com a utilização de conectores de cisalhamento metálicos. No caso das vigas mistas, além das forças de cisalhamento longitudinais, os conectores estão sujeitos também a forças transversais ao plano da laje de concreto, que tendem a causar a separação entre esta e o perfil metálico (efeito conhecido como *uplift*).

Vários conectores de cisalhamento têm sido propostos e usados nas estruturas mistas atualmente (Leonhardt *et al.* 1987, Zellner 1987, Studnicka *et al.* 2000, Hegger *et al.* 2001, Galjaard e Walraven 2001, Veríssimo 2004, Hauke 2005). No entanto, muitos deles apresentam restrições importantes no que se refere à produção industrial, à instalação e ao próprio comportamento estrutural.

O conector de uso mais difundido na atualidade é o *stud bolt*, um conector tipo pino com cabeça, desenvolvido na década de 1940 pela Nelson Stud Welding (Fig. 1a). O conector *stud bolt* difundiu-se mundialmente em razão da produtividade que proporciona. Todavia, apresenta limitações no caso de conexões sujeitas à fadiga e um inconveniente, que é a necessidade de um equipamento de solda especial, o qual inclui um gerador de 225 kVA no canteiro de obras.

Segundo Leonhardt *et al.* (1987), um conector de cisalhamento ideal é aquele cujo comportamento é caracterizado por deslizamento nulo para cargas de serviço e adequada ductilidade em estado limite último. Portanto, as características de um conector rígido são desejáveis em condições de serviço e as características de um conector flexível são desejáveis em estado limite último. O *stud* é um conector flexível que apresenta deformações consideráveis para cargas de serviço, sendo, portanto, propenso a problemas de fadiga.

No final da década de 1980 a empresa alemã Leonhardt, Andrä and Partners desenvolveu um conector de cisalhamento chamado *Perfobond*, para a construção da terceira ponte sobre o rio Caroni, na Venezuela (Zellner 1987). O *Perfobond* consiste numa chapa plana de aço, com furos circulares, soldada sobre a mesa superior da viga de aço (Fig. 1b), e foi idealizado a partir da necessidade de uso de um conector que não permitisse atrito entre o aço e o concreto e, ao mesmo tempo, só envolvesse deformações elásticas para cargas de serviço. Uma desvantagem deste conector é a dificuldade para o posicionamento da armadura inferior da laje, quando as barras de aço têm de passar por dentro das aberturas.

Neste trabalho são apresentados o projeto e os resultados de ensaios de um novo conector de cisalhamento, denominado Crestbond (Fig. 1c), formado por uma chapa dentada e que se constitui numa alternativa interessante ao *Perfobond*, pois permite

a passagem com facilidade das barras de armadura da laje. O conector Crestbond apresenta um corte simétrico, com saliências e reentrâncias trapezoidais que proporcionam resistência ao cisalhamento longitudinal e previnem a separação transversal entre o perfil metálico e a laje de concreto (*uplift*). Quando um elemento misto com esse tipo de conector é solicitado e a laje tende a deslizar em relação ao perfil de aço, o concreto dentro das aberturas trabalha como um pino virtual no interior da laje, que proporciona resistência ao cisalhamento na direção longitudinal e evita que a laje de concreto se separe transversalmente do perfil metálico, caracterizando o chamado “efeito de pino”. Os resultados dos ensaios são analisados criticamente e comparados com os dos conectores *Perfobond* e *stud*, no que se refere à capacidade última e à ductilidade da conexão.

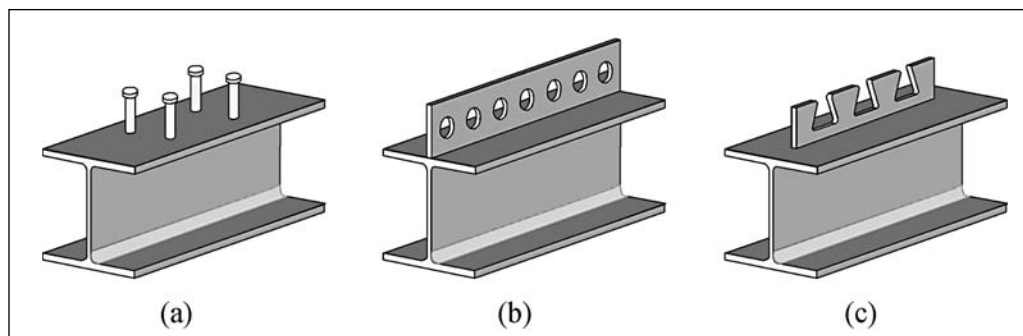


Figura 1: (a) conector *stud*; (b) conector *Perfobond*; (c) conector *Crestbond*.

Da mesma forma que o *Perfobond*, os conectores *Crestbond* apresentam as seguintes vantagens em relação aos conectores *stud*: são facilmente produzidos em grande escala; podem assumir diferentes tamanhos e formas; são facilmente soldados ao perfil metálico sem necessidade de equipamentos especiais e a solda pode ser efetuada tanto na obra como na fábrica. Em termos de capacidade de carga, os conectores *Crestbond* e *Perfobond* propiciam resistência similar à obtida com grupos de *studs*.

Diversos ensaios realizados pelos autores deste trabalho com conectores *Crestbond* e por outros pesquisadores, com o conector *Perfobond*, mostraram que tanto a capacidade de carga como a ductilidade da conexão são influenciadas pela resistência do concreto e pela armadura que passa por dentro, ou no entorno, do conector (Leonhardt *et al.* 1987, Oguejiofor e Hosain 1994). Dessa forma, os conectores em chapa dentada, como o proposto neste trabalho, ou perfurada (*Perfobond*), permitem controlar a capacidade da conexão, variando-se a resistência do concreto e a armadura passante, o que não é possível, por exemplo, com o conector *stud*. No caso do *stud*, quando a resistência ao corte do conector governa o colapso, o aumento na resistência do concreto influencia pouco a capacidade de carga da conexão.

2. Metodologia e programa experimental

2.1 Os ensaios *push-out*

O estudo do comportamento da conexão com conectores *Crestbond* foi realizado por meio de ensaios tipo *push-out*, que permitem caracterizar a relação carga-deslizamento. De acordo com o EUROCODE 4 (2004), o modelo para o ensaio *push-out* consiste de duas pequenas lajes de concreto conectadas a um perfil metálico, conforme mostrado na Fig. 2. Além da geometria do modelo, o EUROCODE 4 (2004) especifica o procedimento a ser seguido no ensaio. Numa primeira fase do ensaio são realizados 25 ciclos de carga/descarga entre patamares de 5% e 40% do valor da carga de ruptura esperada. Na sequência, o ensaio passa a ser controlado pelo deslizamento relativo entre o perfil metálico e a laje de concreto, deslocamento que deve ser medido até que a carga aplicada seja inferior a 80% da carga máxima atingida.

A capacidade de deslizamento δ_u de um corpo-de-prova deve ser tomada como o máximo deslizamento medido para a carga característica (P_{Rk}), como mostrado na Fig. 2. A carga característica P_{Rk} é tomada como a menor carga de colapso, dividida pelo número de conectores, reduzida de 10%. O deslizamento característico δ_{uk} considerado é igual a $0,9\delta_u$.

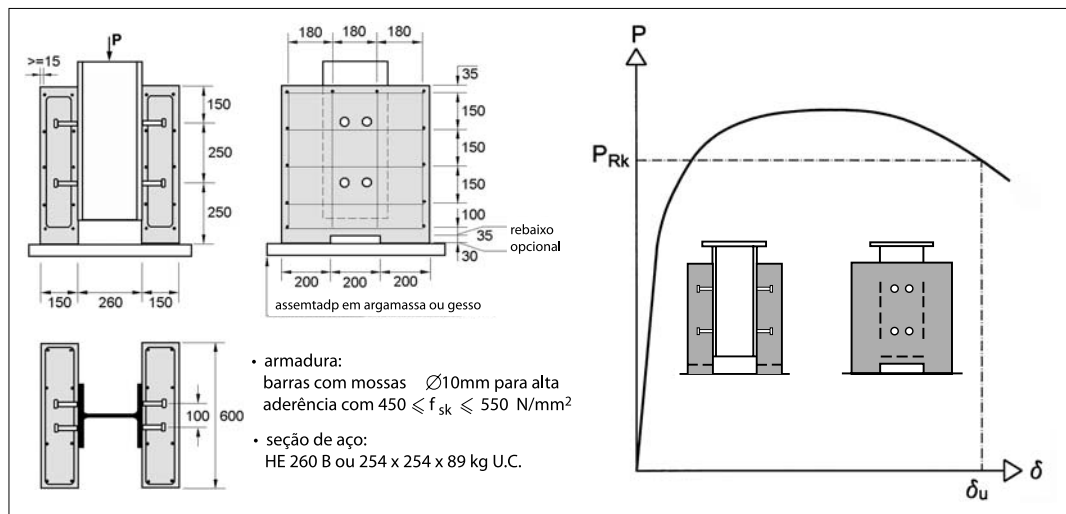


Figura 2: Características de um ensaio *push-out* típico segundo o EUROCODE 4 (2004).

2.2 O programa experimental

O programa experimental consistiu de 26 ensaios *push-out*, agrupados em quatro séries (Tab. 1). As configurações dos conectores utilizados nos ensaios são mostradas na Figura 3.

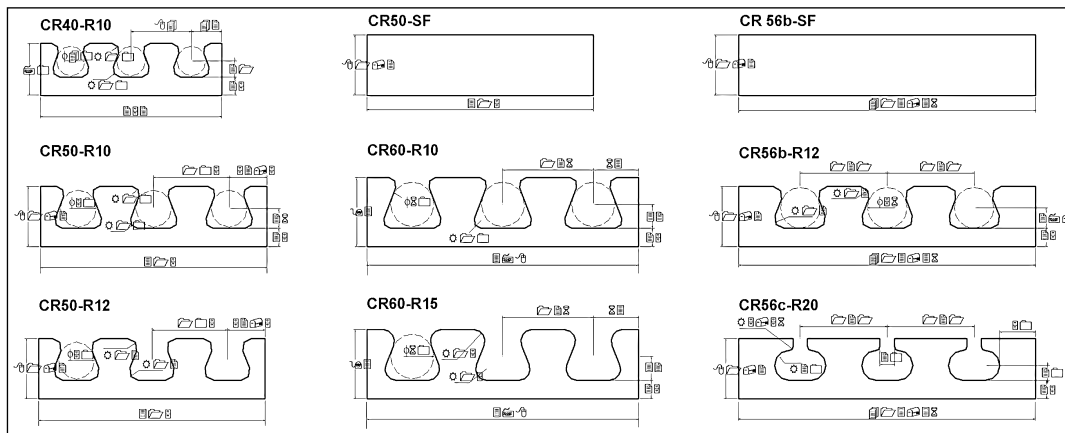


Figura 3: Configurações dos conectores.

Na série A foram testados conectores de três tamanhos, a saber, CR40, CR50 e CR60, com dentes referidos a um círculo inscrito de 40 mm, 50 mm e 60 mm, respectivamente. Nos modelos utilizados nessa série, além do tamanho do conector, variaram-se o raio dos cantos dos dentes e a taxa de armadura, com o objetivo de fazer uma avaliação qualitativa da influência dessas variáveis no comportamento do conector. Um dos modelos ensaiados possuía um conector sem dentes, para possibilitar a avaliação do efeito de pino do concreto no conector *Crestbond*.

As séries B e C são praticamente iguais, exceto pela resistência do concreto. O objetivo nessas séries de ensaios foi caracterizar o comportamento do conector CR56b, cuja configuração foi selecionada a partir dos resultados obtidos da série A, considerando, entre outros fatores, a influência da resistência do concreto. Foram ensaiados pares de modelos, sendo dois sem armadura, dois com armadura de 10 mm, dois com armadura de 12 mm e dois com o conector CR56b-SF, que não possui os dentes.

A série X, com apenas dois corpos-de-prova, foi realizada com o intuito de avaliar a diferença de comportamento entre as versões CR50, CR56b e CR56c.

2.3 Fabricação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram construídos segundo as especificações do EUROCODE 4 (2004) (Fig. 2). A Fig. 4a mostra os conectores já soldados aos perfis de aço, a Fig. 4b, a armadura das lajes e a Fig. 4c, as lajes após a concretagem. As fôrmas das lajes foram construídas com chapas de MDF hidrófugo (Fig. 4c). O concreto foi produzido com brita zero e plastificante, para garantir um bom adensamento.

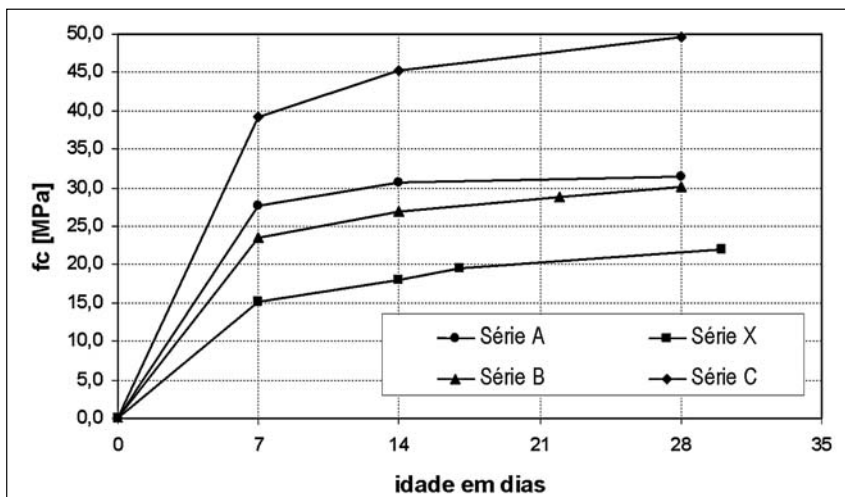


Figura 6: Evolução da resistência do concreto com a idade.

2.5 Montagem dos ensaios e instrumentação

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, em Guimarães, Portugal. Para a aplicação da carga vertical utilizou-se um sistema hidráulico ligado a um atuador com capacidade de 5000 kN. O deslizamento relativo entre as lajes de concreto e o perfil metálico, bem como o *uplift*, foi medido em ambas as lajes em intervalos de tempo regulares, por meio de transdutores de deslocamento. A montagem do ensaio é ilustrada na Figura 7.

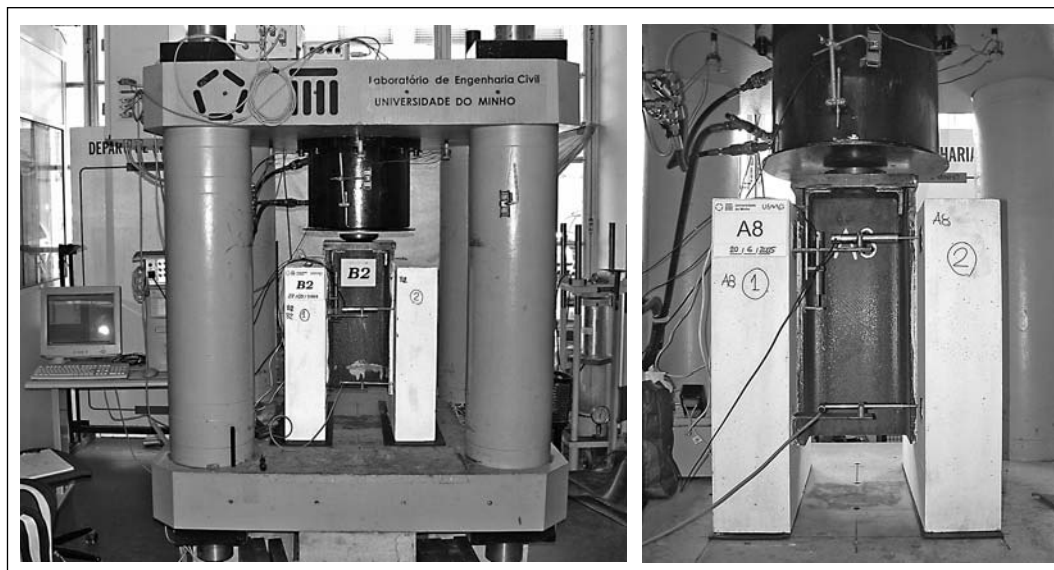


Figura 7 - Estrutura de reação e instrumentação para o ensaio tipo *push-out*.

3. Resultados dos experimentos

Na Tabela 1 são apresentados os valores obtidos da carga característica P_{Rk} e do deslizamento δ_u nos ensaios realizados.

Tabela 1: Resultados dos ensaios realizados.

modelo	conector	idade dias	$f_{c,cil}$ MPa	R mm	armadura no conector	P_{Rk} kN	δ_u mm
A1	CR40-R10	34	31,9	10	-	284,6	9,10
A2	CR50-SF	49	33,0	-	-	174,2	10,90
A3	CR50-R10	50	33,1	10	-	304,5	12,70
A4	CR50-R10	42	32,5	10	ϕ 10 mm	335,0	9,00
A5	CR50-R12	47	32,9	12,5	-	276,0	11,50
A6	CR50-R12	44	32,6	12,5	ϕ 10 mm	332,7	7,60
A7	CR60-R10	49	33,0	10	ϕ 10 mm	378,9	11,10
A8	CR60-R15	47	32,9	15	ϕ 10 mm	389,7	9,70
X1	CR56b-R12	17	19,5	12,5	ϕ 10 mm	323,3	6,60
X2	CR56c-R20	15	18,0	20	ϕ 10 mm	305,9	6,25
B1	CR56b-R12	13	26,6	12,5	-	266,6	9,22
B2	CR56b-R12	13	26,6	12,5	-	275,8	9,30
B3	CR56b-R12	15	27,2	12,5	ϕ 10 mm	313,9	4,71
B4	CR56b-R12	14	26,9	12,5	ϕ 10 mm	338,3	6,58
B5	CR56b-R12	21	28,5	12,5	ϕ 12 mm	340,3	7,20
B6	CR56b-R12	9	24,8	12,5	ϕ 12 mm	334,6	6,15
B7	CR56b-SF	20	28,3	12,5	-	165,3	7,80
B8	CR56b-SF	9	24,8	12,5	-	159,8	11,90
C1	CR56b-R12	17	46,9	12,5	-	325,2	10,74
C2	CR56b-R12	20	48,1	12,5	-	339,8	12,32
C3	CR56b-R12	24	49,1	12,5	ϕ 10 mm	444,3	5,73
C4	CR56b-R12	22	48,7	12,5	ϕ 10 mm	456,0	7,78
C5	CR56b-R12	22	48,7	12,5	ϕ 12 mm	418,5	7,91
C6	CR56b-R12	15	45,9	12,5	ϕ 12 mm	447,2	6,77
C7	CR56b-SF	29	49,7	12,5	-	193,9	10,00
C8	CR56b-SF	26	49,4	12,5	-	195,8	9,23

Notação:

$f_{c,cil}$ = resistência do concreto à compressão medida do corpo-de-prova cilíndrico.

R = raio dos cantos dos dentes (ver Figura 3).

CRxx-Ryy = conector com dentes referidos a um círculo inscrito com xx mm de diâmetro e dentes com raio de curvatura dos cantos igual a yy mm.

CR56b-SF = conector CR56b sem dentes.

Na Fig. 8 são apresentados os resultados para os conectores CR50, CR56b e CR56b-SF.

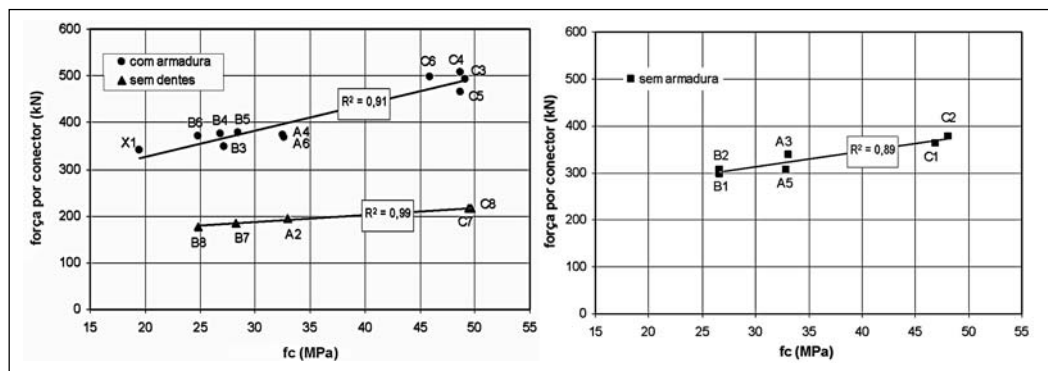


Figura 8: Resultados para conectores CR50, CR56b e CR56b-SF.

4. Análise dos resultados e conclusões

O mecanismo de ruptura observado nos ensaios com o conector CR56b está relacionado à ruptura do concreto. Os conectores e respectivas soldas permanecem intactos no final de cada ensaio. A ruptura dos corpos-de-prova inicia-se com a abertura de uma fissura vertical localizada na zona abaixo do conector, que gradualmente se propaga pelas lajes. Nos modelos sem armadura passante observa-se maior fissuração do concreto das lajes. A armadura passante ajuda no controle da fissuração das lajes (Figura 9).

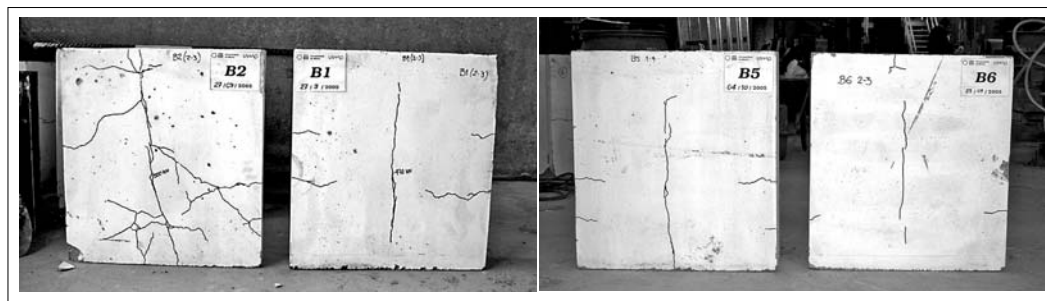


Figura 9: Fissuração das lajes em corpos-de-prova ensaiados.

Na Figura 10 são apresentados resultados dos ensaios com o conector *Crestbond* realizados na Universidade do Minho, juntamente com resultados de ensaios com conectores *stud* e *Perfobond* efetuados na Universidade de Saskatchewan (Oguejiofor e Hosain 1994, Veldanda e Hosain 1992). Observa-se que o conector *Crestbond*, assim como o *Perfobond*, apresenta boa capacidade de retenção de carga após o pico, o que não ocorre com o *stud*. Para a mesma faixa de resistência do concreto, um único conector *Crestbond* apresenta resistência equivalente à de quatro *studs*. Para um acréscimo de 81% na resistência do concreto há um ganho de 35% na capacidade de carga do conector *Crestbond*.

Na Fig. 11 são apresentados resultados de modelos com conector CR56b idênticos, exceto pela resistência do concreto. Observa-se que o aumento da capacidade da conexão é proporcional a três quartos do aumento da resistência do concreto. Quando há armadura passante, a variação da resistência do concreto tem pouca influência na ductilidade da conexão.

Na Fig. 12 são apresentados alguns resultados de ensaios com o conector CR56b, com concretos C20 e C35. Nota-se que o efeito de pino do concreto é bastante significativo, sendo responsável por um acréscimo de 66% na capacidade de carga da conexão, independentemente da resistência do concreto. A introdução da armadura também apresentou influência importante na capacidade da conexão, produzindo um ganho de 29% nos modelos com concreto C20 de 40% nos modelos com concreto C35, demonstrando que, com o aumento da resistência do concreto, ocorre um melhor aproveitamento do efeito da armadura.

Nos ensaios realizados com o conector *Crestbond*, o deslizamento característico quase sempre foi superior ao limite de 6 mm determinado pelo EUROCODE 4 [9], comprovando sua adequada ductilidade. Ficou comprovado também que a ductilidade da conexão cresce com a resistência do concreto quando não há armadura passante.

Os resultados experimentais apresentados na bibliografia e os resultados do programa experimental realizado pelos autores evidenciaram diversos aspectos importantes da conexão com o conector dentado em relação ao que se observa nas conexões com *studs* e *Perfobond*. Esses aspectos dizem respeito a modo de ruptura, carga máxima aplicada durante o ensaio e capacidade de deformação da conexão.

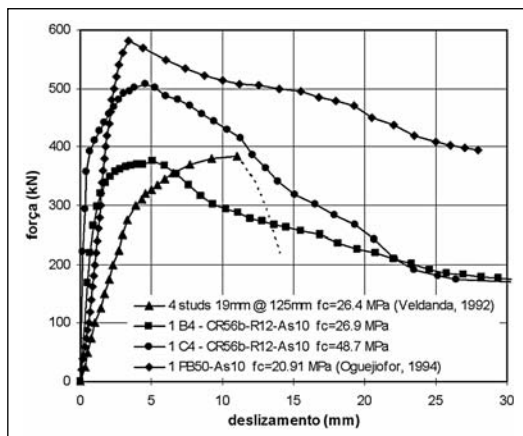


Figura 10: Comportamento típico do conector *Crestbond* em comparação com os conectores *stud* e *Perfobond*.

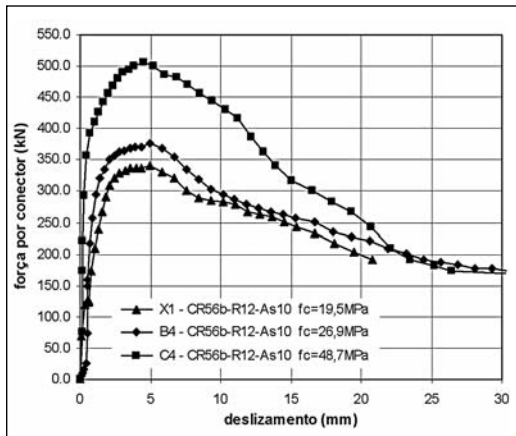


Figura 11: Influência da resistência do concreto no comportamento do conector CR56b.

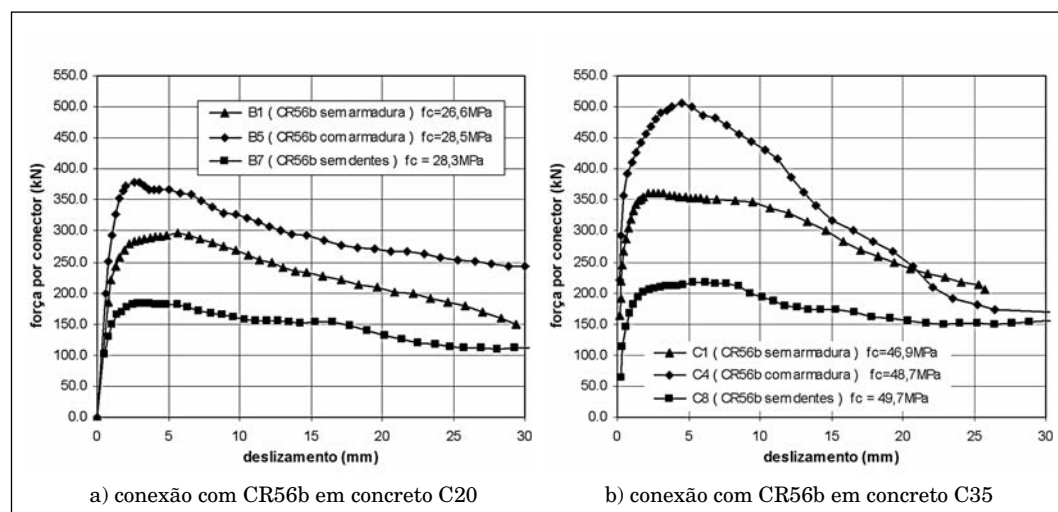


Figura 12: Influência dos furos, da resistência do concreto e da armadura na conexão com CR56b

Em relação ao comportamento identificado para cada tipo de conector, em termos de modos de ruptura, tem-se observado que os *studs* tendem a sofrer ruptura por cisalhamento na base do conector, imediatamente acima do cordão de solda. Por outro lado, o conector *Perfobond* não sofre ele próprio ruptura e tende a provocar elevada fissuração nas lajes de concreto. O conector *Crestbond* apresenta um comportamento intermédio, já que provoca fissuração nas lajes de concreto associada a alguma deformação visível nos dentes do conector. O *Crestbond* apresenta capacidade de carga um pouco menor do que um conector *Perfobond* de dimensões similares. Tanto o *Perfobond* como o *Crestbond* possibilitam aumentar a capacidade resistente da conexão mediante a colocação de uma maior quantidade de armadura transversal.

Em geral, os conectores em chapa contínua apresentam maior rigidez para cargas de serviço do que os *studs* (Valente e Cruz 2004). O limite de proporcionalidade para os conectores em chapa contínua é superior ao que se observa para os *studs*. O deslizamento correspondente à carga máxima nos ensaios com conectores em chapa contínua é menor do que o que se observa para o *stud* e o comportamento pós-pico caracteriza-se por uma perda de carga mais lenta. Como a ruptura não se dá por cisalhamento do conector, a deformação final é muito elevada.

O conector *Crestbond*, bem como o *Perfobond*, oferece a combinação ideal de um conector rígido com um conector flexível, pois proporciona uma conexão rígida para cargas de serviço e exibe um comportamento dúctil em estado limite último.

Os resultados obtidos evidenciam que a escolha de um determinado tipo de conector deve levar em consideração as diferenças de comportamento e uma avaliação das vantagens e desvantagens do seu emprego. Esses aspectos terão implicação direta na resposta do elemento estrutural para o qual o conector é dimensionado e no tipo de carregamento a que este estará sujeito durante a sua vida útil.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes, ao CNPq e à Fapemig, que possibilitaram a realização deste trabalho.

Referências bibliográficas

EUROCODE 4, EN 1994-1-1 (2004) *Design of composite steel and concrete structures*. European Committee for Standardisation (CEN).

Galjaard, H.; Walraven, J.C. (2001). Static tests on various types of shear connectors for composite structures, *Proceedings of International Symposium on Connections Between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, Vol.2, p. 1313-1322.

Hauke, B. (2005). Shear connectors for composite members of high strength materials. *Proceedings of EUROSTEEL 2005 - 4th European Conference on Steel and Composite Structures*, Maastricht, Vol.B, pp. 4.2-57 – 4.2-64.

Hegger, J.; Sedlacek, G.; Döinghaus, P.; Trumpf, H. (2001). Studies on the ductility of shear connectors when using high-strength concrete, *Proceedings of International Symposium on Connections Between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, Vol.2, p. 1024-1045.

Leonhardt, F.; Andrä, W.; Andrä, H.P.; Harre, W. (1987). Neues vorteilhaftes verbundmittel für stahlverbund-tragwerk mit höher dauerfestigkeit (New advantageous shear connection for composite structures with high fatigue strength). *Beton und Stahlbetonbau*, n. 12, p. 325-331.

Oguejiofor, E. C.; Hosain, M. U. (1994). A parametric study of perfobond rib shear connectors, *Canadian Journal of Civil Engineering*, n.21, p. 614-625.

Studnicka, J.; Machacek, J.; Krpata, A.; Svitakova, M. (2000). Perforated shear connector for composite steel and concrete beams. *Proceedings of the Conference Composite Construction in Steel and Concrete IV*, Banff, Alberta, Canada, p. 367-378.

Valente, I.; Cruz, P. (2004). Experimental studies on shear connection between steel and lightweight concrete, *Proceedings of Second International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, Quioto, Japão.

Veldanda, M. R.; Hosain, M. U. (1992). Behavior of perfobond rib shear connectors: push-out tests. *Canadian Journal of Civil Engineering*, n.19, p.1-10.

Veríssimo, G. S. (2004). *Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento*. Projeto de Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte.

Zellner, W. (1987). Recent designs of composite bridges and a new type of shear connectors. *Proceedings of the IABSE/ASCE Engineering Foundation Conference on Composite Construction*, pp.240-252, Henniker, N.H.

Design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures

Abstract

This work presents the design of a new shear connector for steel and concrete composite structures and the corresponding results obtained on push-out tests. This new shear connector, named Crestbond, consists on a steel rib with indented cut shape that provides resistance to longitudinal shear and prevents transversal separation between the concrete slab and the steel profile (uplift). Adding to this, the connector openings cut makes easier the arrangement of transversal reinforcement bars of the concrete. The installation of the connectors is simple and requires only common welding procedure. Due to its load capacity, the indented connector is able to replace a group of stud bolts. Its structural behaviour is analyzed and compared with other existing connectors, like the stud bolt and the Perfobond. The influence of different geometrical and mechanical aspects on the ultimate load capacity and ductility is assessed. The performed studies indicate that the proposed indented connector presents a good mechanical performance, associated with constructive and economical advantages.

Keywords: Composite structures. Shear connector. Push-out test. Steel structures.

1. Introduction

The connection between steel and concrete in composite structures provides the composite behaviour, making the two materials work as a unique piece. The use of shear connectors enhances the development of longitudinal shear forces at the steel-concrete interface. In composite beams, shear connectors are also subjected to tensile forces that act transversely to the concrete slab plane. These forces result from the tendency of separation between the steel beam and the concrete slab (*uplift effect*).

This work summarizes the design and push-out tests results for the proposed shear connector, named Crestbond (Figure 1c). The Crestbond connector has an indented cut form that constitutes a good alternative to Perfobond connector (Figure 1b), because it provides an easier disposition of reinforcement bars. It presents a symmetric cut, with trapezoidal salencies and re-entrant angles, which provide resistance to longitudinal shear forces and prevent the transversal separation between the steel profile and the concrete slab (uplift). The concrete positioned inside the connectors' apertures works as concrete dowels, with a similar behaviour to the one obtained with Perfobond connectors. The experimental tests results obtained for Crestbond connector are critically analysed and compared to the ones obtained for Perfobond and stud bolt (Figure 1a) connectors, regarding the maximum load capacity and the connection ductility.

2. Experimental testing and results analysis

Push-out tests were used to study Crestbond connector behaviour, in order to establish the load-slip relation, according to EUROCODE 4 (2004). The test is controlled by displacement, with measurements of slip between the steel profile and the concrete slab at a constant rate. Lateral displacement between slabs is also measured. The test proceeds until failure, and slip is measured until the load value is at least 80% of the ultimate load.

The experimental program involved the testing of 26 push-out specimens, grouped in four series (Table 1). The connectors' configuration is presented in Figure 3.

Three sizes of Crestbond connector were tested within series A: CR40, CR50 and CR60. The numbers 40, 50 and 60 that figure in previous designations represent the diameter of a circle inscribed in connectors' dents (Figure 3). Series B and C are very similar, except for concrete compressive strength. The objective of these two series was to characterize the connector CR56b, whose configuration was defined from series A results. Series X, with just two specimens, was done with the objective of evaluating the difference between the connectors' versions CR50, CR56b and CR56c.

The Crestbond connectors used in series A were fabricated in Brazil, using 12.5 mm thick plates of USI-CIVIL 300 steel (minimum yielding strength of 359 MPa). The connectors used in series X, B and C were fabricated in Portugal, using 12.0 mm thick plates of S275JR steel (minimum yielding strength of 302 MPa). Reinforcement bars used steel S500 (minimum yielding strength of 500 MPa).

All series were made with normal density concrete. In series A and X concretes C25/30 and C15/20 were used, respectively. In series B and C concretes C20/25 and C35/45 were used, respectively. Figure 6 presents the concrete compressive strength evolution in time for all the concretes used within this work.

The tests results are presented in Table 1. Figure 8 presents results for connectors with dents referred to 50 mm and 56 mm holes.

Figure 10 shows results of tests with Crestbond connector carried out at Universidade do Minho, and results of tests with stud and Perfobond, executed at the University of Saskatchewan (Oguejiofor and Hosain 1994, Veldanda and Hosain 1992). Figure 11 shows the results of identical specimens with CR56b connector, except for the concrete strength and Figure 12 shows the tests results with CR56b connector, using concretes C20/25 and C35/45.

3. Conclusions

Tests done with Crestbond connector showed that the average characteristic slip capacity was greater than the 6 mm limit specified by EUROCODE 4 (2004), which confirms its sufficient ductility. It is verified that the connection ductility grows up with increasing concrete strength when there is no transversal reinforcement.

The experimental results presented in the bibliography and those obtained during this experimental program put in evidence several important differences between the

indented connector, the stud and the Perfobond. These aspects are related to failure mode, maximum load applied during the test and connection deformation capacity.

In relation to the behaviour identified for each connector type failure mode, it has been observed that studs tend to suffer shank shear failure, immediately above the weld. On the other hand, Perfobond connector does not undergo failure itself, but it tends to cause intense cracking in the concrete slabs. The Crestbond connector presents an intermediate behaviour, since it produces concrete slab cracking associated to some visible deformation of the dents. The Crestbond connector exhibits a little lower load capacity than a Perfobond connector of similar dimensions. Both Perfobond and Crestbond connectors make it possible to improve the connection load capacity by increasing the transversal reinforcement.

Usually, Crestbond steel rib connectors show higher stiffness for service loads than studs, in the same way that it is observed for Perfobond (Valente and Cruz 2004). The difference between these connectors stiffness is considerable and it is important to emphasize that the elastic range for steel rib connectors is greater than the one observed for studs. In the same way, the slip correspondent to ultimate load in tests performed with steel rib connectors is lower than for studs. The post peak behaviour is characterized by a slower load loss. As the failure does not occur by connector shearing, the final deformation is very large.

The results obtained have shown that the choice of connector type must take into account the differences in structural behaviour and an evaluation on advantages and disadvantages of its use. These aspects will have direct influence over the structural element response for which the connector is designed and also on the type of loading imposed to the connector along its service life.

