

Congresso de
CONSTRUÇÃO METÁLICA
e Mista

Luis Simões da Silva | Elsa Caetano | Paulo Piloto
Carlos Martins | Tiago Abecasis



CONCEPÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM NOVO CONECTOR PARA ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E BETÃO

Gustavo Veríssimo^a, Isabel Valente^b, José Luiz Rangel Paes^a, Paulo Cruz^b e Ricardo Fakury^c

^a Universidade Federal de Viçosa, Brasil

^b Universidade do Minho, Portugal

^c Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

Resumo. Neste trabalho são apresentadas a concepção e a análise experimental de um conector para estruturas mistas de aço e betão, denominado CRESTBOND. O comportamento do conector foi estudado a partir de ensaios de corte directo, designadamente, de tipo *push-out*. Com este ensaio, é possível avaliar a capacidade de carga da conexão, a sua ductilidade e observar modos de rotura, considerando-se o efeito de diversas variáveis. Os resultados demonstram que o conector proposto apresenta um comportamento adequado, com elevada rigidez para cargas de serviço e boa ductilidade em estado limite último, constituindo-se numa alternativa a conectores como os pernos de cabeça e o Perfobond.

1 Introdução

As estruturas mistas de aço e betão têm sido cada vez mais utilizadas na construção civil das últimas décadas. As vantagens dos sistemas mistos são bem conhecidas e advêm do facto de que o aço e o betão, nesses sistemas, podem trabalhar à tracção e à compressão, respectivamente, obtendo-se o melhor desempenho de ambos.

Nas estruturas mistas, a ligação entre o aço e o betão proporciona o comportamento misto, fazendo com que os dois elementos estruturais funcionem como se fossem praticamente um elemento único. Para que isso ocorra, são instalados conectores metálicos capazes de absorver as forças longitudinais de corte que se desenvolvem na interface entre o aço e o betão. No caso das vigas mistas, além das forças de corte longitudinais, os conectores estão também sujeitos a forças transversais ao plano da laje de betão, que tendem a causar a separação entre esta e o perfil metálico (efeito conhecido como *uplift*).

Actualmente, têm sido propostos e usados nas estruturas mistas vários tipos de conector [1-5]. Vários deles apresentam restrições importantes no que se refere à produção industrial, à instalação e ao próprio comportamento estrutural, motivo pelo qual este tema permanece como objecto de estudo.

O conector de uso mais difundido na actualidade é o perno de cabeça, desenvolvido na década de 40 pela *Nelson Stud Welding* (Fig. 1a). Este conector difundiu-se mundialmente em resultado

da produtividade que proporciona. Todavia, apresenta alguns inconvenientes, tais como o baixo desempenho à fadiga e a necessidade de equipamentos especiais para a sua aplicação.

No final da década de 80, a empresa alemã Leonhardt, André and Partners desenvolveu um conector chamado *Perfobond*. Esse conector consiste numa chapa plana de aço com aberturas circulares, soldada sobre o banzo superior da viga de aço (Fig. 1b) e foi idealizado a partir da necessidade de um conector que apresentasse um desempenho sob condições de fadiga, superior ao do perno de cabeça. Uma desvantagem do *Perfobond* é a dificuldade no posicionamento da armadura inferior da laje, quando os varões têm que passar no interior dos furos do conector.

Neste trabalho, são apresentados o projecto e os resultados de ensaios de um conector, denominado *Crestbond* (Fig. 1c), desenvolvido por VERISSIMO [5]. O *Crestbond* é obtido a partir do corte simétrico de uma chapa plana de aço, formando uma crista com saliências e reentrâncias trapezoidais que proporcionam resistência ao corte longitudinal e previnem a separação transversal entre o perfil metálico e a laje de betão (*uplift*).

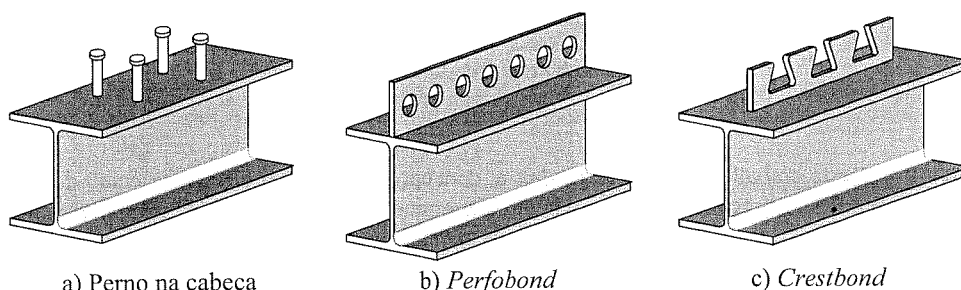


Fig. 1: Conectores

No caso de conectores em chapa contínua perfurada, como o *Crestbond* e o *Perfobond*, o betão dentro das aberturas trabalha como um pino virtual atravessado dentro do conector. Quando o elemento misto é solicitado, esses pinos resistem ao corte proporcionando resistência nas direcções longitudinal e transversal. Como o betão se encontra confinado na região das aberturas dos conectores, a resistência desses pinos virtuais é bastante significativa.

O *Crestbond* apresenta as seguintes vantagens em relação aos pernos de cabeça: é facilmente produzido em grande escala; pode assumir diferentes tamanhos e formas; é facilmente soldado ao perfil metálico sem necessidade de equipamentos especiais e a soldadura pode ser efectuada tanto em obra como em fábrica. Em termos de capacidade de carga, o *Crestbond* apresenta resistência equivalente à que é obtida com grupos de vários pernos. Em relação ao *Perfobond*, o *Crestbond* apresenta como vantagem os furos abertos que facilitam a disposição dos varões de armadura transversal.

Os ensaios realizados com o *Crestbond* demonstram que, tanto a capacidade de carga como a ductilidade da conexão são influenciadas pela resistência do betão e pela armadura que passa no interior ou na proximidade do conector [5]. O mesmo se observa com o *Perfobond* [1,6]. Os conectores em chapa dentada ou perfurada permitem controlar a capacidade resistente da conexão, variando-se a resistência do betão e a armadura passante, o que não é possível, por exemplo, com o conector de tipo perno. No caso do perno, quando a resistência ao corte do conector governa a rotura da conexão, o aumento na resistência do betão influencia pouco a respectiva capacidade de carga.

Nos tópicos seguintes apresenta-se o programa experimental constituído de 26 ensaios tipo *push-out* realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho com o conector *Crestbond*. Os resultados dos ensaios são analisados criticamente e comparados com os dos conectores *Perfobond* e perno.

2 Metodologia e programa experimental

2.1 Os ensaios *push-out*

Para o estudo do comportamento estrutural do conector *Crestbond*, adoptaram-se as especificações da norma europeia EN 1994-1-1:2004 [7] para ensaios de tipo *push-out*.

O modelo para o ensaio *push-out* consiste em duas lajes de betão ligadas a um perfil metálico, conforme se mostra na Fig. 2. Além da geometria do modelo, a EN 1994-1-1:2004 [7] especifica o procedimento a ser seguido durante o ensaio. Numa primeira fase são realizados 25 ciclos de carga/descarga entre patamares de 5% e 40% do valor da carga de rotura esperada. Na sequência, o ensaio passa a ser controlado pelo deslizamento relativo entre o perfil metálico e a laje de betão. Esse deslocamento deve ser medido até que a carga aplicada seja inferior a 80% da carga máxima atingida.

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

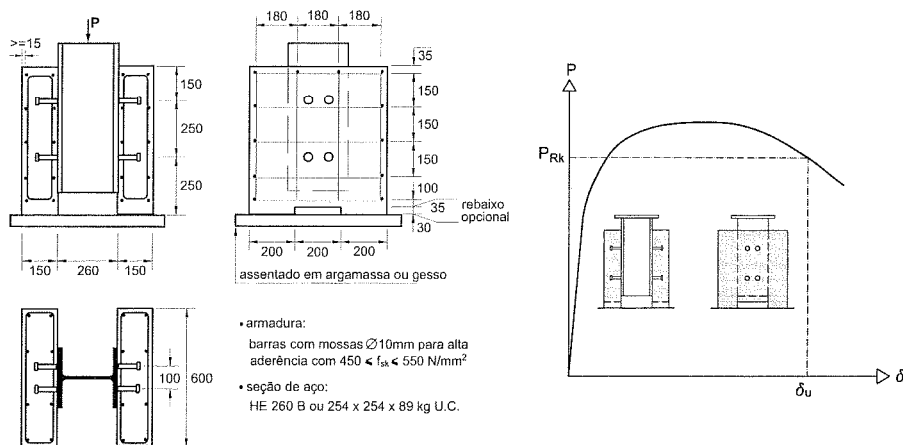


Fig. 2: Características de um ensaio *push-out*, segundo a EN 1994-1-1:2004 [7]

2.2 O programa experimental

O programa experimental consistiu em 26 ensaios *push-out*, agrupados em quatro séries denominadas A, X, B e C (ver tabela 1). As configurações dos conectores utilizados nos ensaios são ilustradas na Fig. 3.

Na série A foram testados conectores *Crestbond* com dentes referidos a um círculo inscrito de 40 mm, 50 mm e 60 mm, respectivamente (CR40, CR50 e CR60). Nos modelos estudados nessa série, além do tamanho do conector variou-se o raio dos cantos dos dentes e a percentagem de armadura, com o objectivo de avaliar qualitativamente a influência dessas variáveis no comportamento do conector. Um dos modelos ensaiados possuía um conector sem dentes, para possibilitar a avaliação do efeito de cavilha no betão localizado no interior das aberturas do conector dentado (ver Fig. 6c).

Em função dos resultados obtidos na série A, o protótipo CR50 foi redesenhado, aumentando-se a base dos dentes e modificando-se os dentes extremos para que tivessem a

mesma base dos dentes internos. Esse novo protótipo foi denominado CR56b e foi validado nos ensaios da série X.

As séries B e C foram praticamente iguais entre si, excepto pela resistência do betão. Ambas consistiram em 08 modelos, cada uma, e tiveram por objectivo caracterizar o comportamento do conector CR56b. Foram ensaiados pares de modelos sem armadura, com armadura de 10 mm, com armadura de 12 mm e com o conector CR56b-SF, que não possuía dentes.

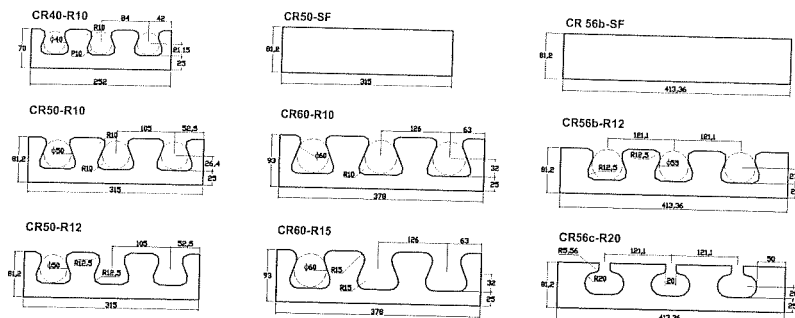


Fig. 3: Configurações dos conectores ensaiados

2.3 Características dos modelos

Na Fig. 4 é apresentada a configuração de um dos modelos testados com conector CR56b, com armadura passando por dentro das aberturas do conector. Nos modelos sem armadura são suprimidas as barras transversais na região do conector (ver Fig. 6a).

Em todos os modelos, as lajes possuíam alguma armadura transversal. Em alguns deles, existiam varões transversais antes e depois do conector, tal como representado nas Figs. 5a e 5c. Nos outros, além dessa armadura externa existiam também varões transversais localizados no interior do conector, como mostrado na Fig. 5b.

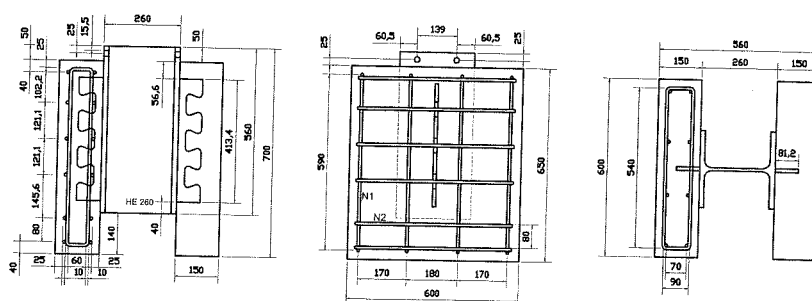


Fig. 4: Configuração de um modelo com conector CR56b com armadura passante

2.4 Propriedades dos materiais utilizados

Os conectores utilizados na série A foram fabricados no Brasil, com chapas de 12,5 mm de aço USI-CIVIL 300 ($f_y = 359$ MPa). Os conectores utilizados nas séries X, B e C foram fabricados em Portugal, com chapas de 12,0 mm de aço S 275 JR ($f_y = 324$ MPa). Para as armaduras foi utilizado aço S500 ($f_y = 500$ MPa). As séries A e X foram confeccionadas com betão C25/30 e as séries B e C com betões C20/25 e C35/45, respectivamente.

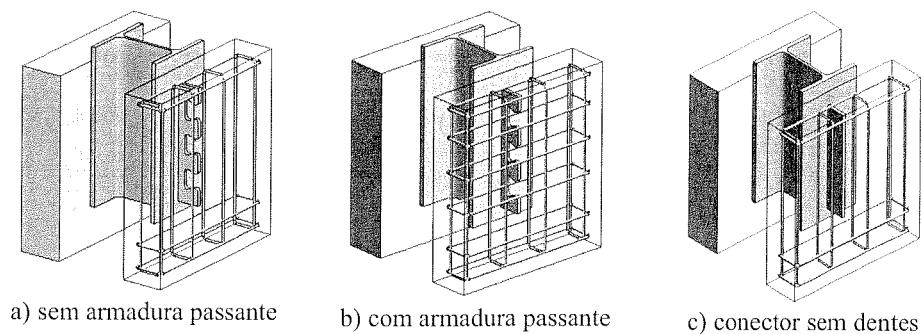


Fig. 5: Configurações dos modelos

2.5 Montagem dos ensaios e instrumentação

Para a aplicação da carga vertical utilizou-se um actuador com capacidade de 5000 kN. O deslizamento relativo entre as lajes de betão 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 Fig. 6.

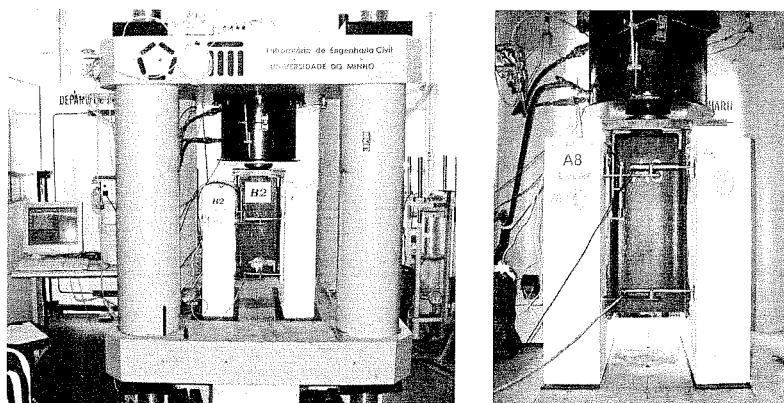


Fig. 6: Estrutura de reacção e instrumentação para o ensaio tipo *push-out*

3 Resultados

Na tabela 1 são apresentados os resultados dos ensaios realizados, em termos de valor característico da capacidade de carga e de deslizamento último. Apresenta-se ainda os valores de resistência à compressão obtidos em provetes cilíndricos, testados à data do respectivo ensaio.

4 Análise dos resultados e conclusões

O mecanismo de rotura observado nos ensaios com o *Crestbond* está relacionado com a rotura do betão. Os conectores e os respectivos cordões de soldadura permanecem intactos ou quase intactos no final de cada ensaio. A rotura dos provetes tem início com a abertura de

uma fenda vertical na zona abaixo do conector. À medida que o carregamento é incrementado, essa fenda propaga-se pela laje na direcção longitudinal até à separação total da laje em duas metades (Fig. 7).

Os resultados da série A evidenciaram que existe uma relação praticamente linear entre a resistência do *Crestbond* e o diâmetro de referência das aberturas trapezoidais (Fig. 8).

Na Fig. 9 pode-se observar a relação força-deslizamento para conectores CR40, CR50 e CR60, relacionados a diâmetros de referência de 40, 50 e 60 mm, respectivamente, todos com armadura passante.

A resistência do conector com dentes (CR50) aumenta muito significativamente em relação ao sem dentes (CR50-SF), em função do efeito de pino no betão associado à armadura passante. O aumento do diâmetro dos furos parece influenciar a capacidade resistente, mas não afecta a ductilidade ou o comportamento pós-pico. As curvas força-deslizamento para os modelos A1, A4 e A8, com conectores CR40, CR50 e CR60, respectivamente, apresentam o mesmo aspecto. A relação força-deslizamento mantém-se, apesar da variação do diâmetro dos

Tabela 1: Resultados dos ensaios realizados

| Modelo | Conector | Idade (dias) | $f_{c,cit}$ (MPa) | R (mm) | Armadura | 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 | CR50b-R12 | 17 | 19,5 | 12,5 | ϕ 10 mm | 323,3 | 6,60 |
| X2 | CR50c-R20 | 15 | 18,0 | 20 | ϕ 10 mm | 305,9 | 6,25 |
| B1 | CR50b-R12 | 13 | 26,6 | 12,5 | - | 266,6 | 9,22 |
| B2 | CR50b-R12 | 13 | 26,6 | 12,5 | - | 275,8 | 9,30 |
| B3 | CR50b-R12 | 15 | 27,2 | 12,5 | ϕ 10 mm | 313,9 | 4,71 |
| B4 | CR50b-R12 | 14 | 26,9 | 12,5 | ϕ 10 mm | 338,3 | 6,58 |
| B5 | CR50b-R12 | 21 | 28,5 | 12,5 | ϕ 12 mm | 340,3 | 7,20 |
| B6 | CR50b-R12 | 9 | 24,8 | 12,5 | ϕ 12 mm | 334,6 | 6,15 |
| B7 | CR50b-SF | 20 | 28,3 | 12,5 | - | 165,3 | 7,80 |
| B8 | CR50b-SF | 9 | 24,8 | 12,5 | - | 159,8 | 11,90 |
| C1 | CR50b-R12 | 17 | 46,9 | 12,5 | - | 325,2 | 10,74 |
| C2 | CR50b-R12 | 20 | 48,1 | 12,5 | - | 339,8 | 12,32 |
| C3 | CR50b-R12 | 24 | 49,1 | 12,5 | ϕ 10 mm | 444,3 | 5,73 |
| C4 | CR50b-R12 | 22 | 48,7 | 12,5 | ϕ 10 mm | 456,0 | 7,78 |
| C5 | CR50b-R12 | 22 | 48,7 | 12,5 | ϕ 12 mm | 418,5 | 7,91 |
| C6 | CR50b-R12 | 15 | 45,9 | 12,5 | ϕ 12 mm | 447,2 | 6,77 |
| C7 | CR50b-SF | 29 | 49,7 | 12,5 | - | 193,9 | 10,00 |
| C8 | CR50b-SF | 26 | 49,4 | 12,5 | - | 195,8 | 9,23 |

Notação:

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.

CR50b-SF = conector CR50b sem dentes.

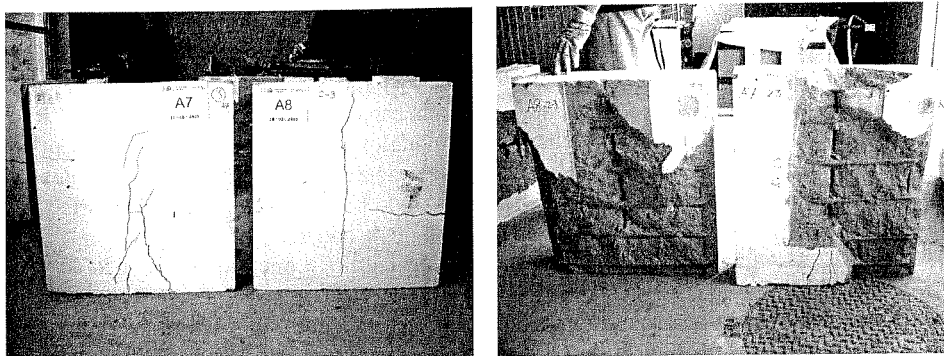


Fig. 7: Aspecto da rotura das lajes após os ensaios

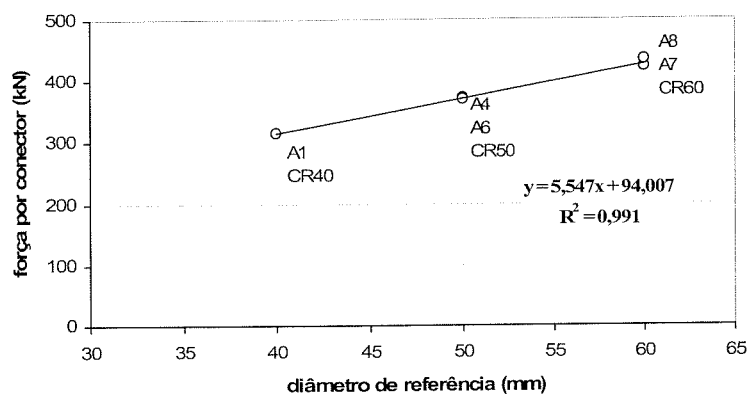


Fig. 8: Relação entre a resistência do conector e o tamanho do dente

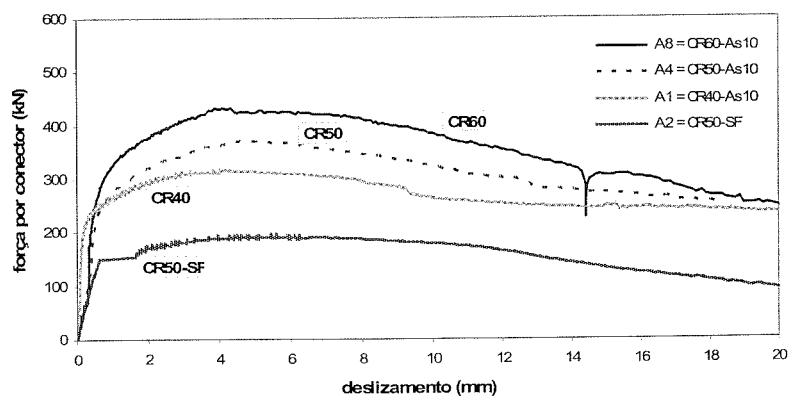


Fig. 9: Relação força-deslizamento e o tamanho do dente

pinos de betão na faixa entre 40 e 60 mm.

Na Fig. 10 são apresentados resultados dos ensaios com o conector *Crestbond* realizados na Universidade do Minho, juntamente com resultados de ensaios com conectores perno e *Perfobond* efectuados na Universidade de Saskatchewan [6,8]. Observa-se que o conector CR,

assim como o *Perfobond*, apresenta boa capacidade de retenção de carga após o pico, o que não ocorre com o conector perno. Para a mesma faixa de resistência do betão, um único conector CR apresenta resistência equivalente à de quatro pernos de 19 mm de diâmetro. Para um acréscimo de 81% na resistência do betão há um ganho de 35% na capacidade de carga do conector CR.

Na Fig. 11 são apresentados resultados de modelos com conector CR50b idênticos, excepto pela resistência do betão. Observa-se que o aumento da capacidade da conexão é proporcional ao aumento da resistência do betão. Quando há armadura passante, a variação da resistência do betão tem pouca influência na ductilidade da conexão.

Na Fig. 12 são apresentados alguns resultados de ensaios com o conector CR50b, com betões C20/25 e C35/45. Nota-se que o efeito de pino do betão é bastante significativo, sendo responsável por um acréscimo de 66% na capacidade de carga da conexão, independentemente da resistência do betão. A introdução da armadura também apresentou influência importante na capacidade da conexão, produzindo um ganho de 29% nos modelos com betão C20/25, e 40% nos modelos com betão C35/45. Isso demonstra que, com o aumento da resistência do betão, ocorre um melhor aproveitamento da armadura.

Nos ensaios realizados com o conector CR, o deslizamento característico quase sempre foi superior ao limite de 6 mm determinado pelo EN 1994-1-1:2004 [7], comprovando sua adequada ductilidade. Ficou comprovado também que a ductilidade da conexão cresce com a

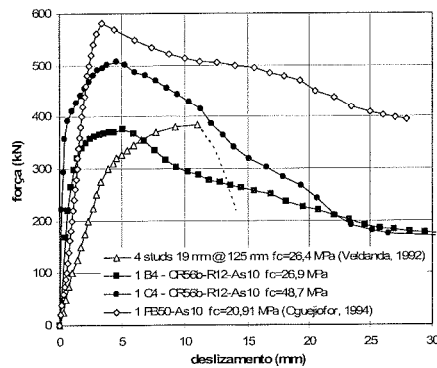


Fig. 10: Comportamento do *Crestbond*, do *stud* e do *Perfobond*

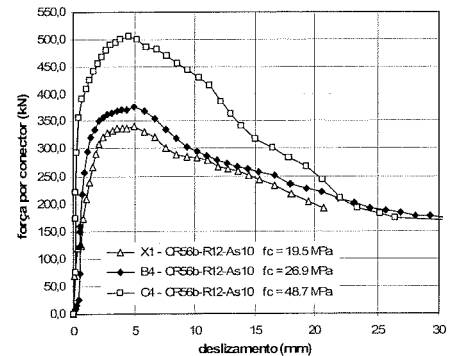
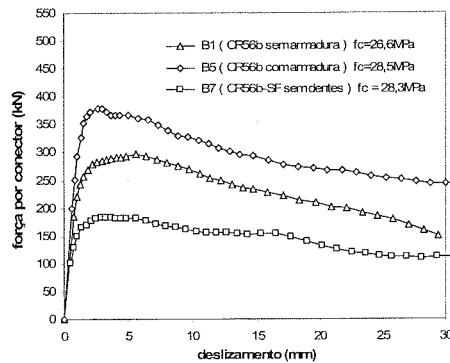
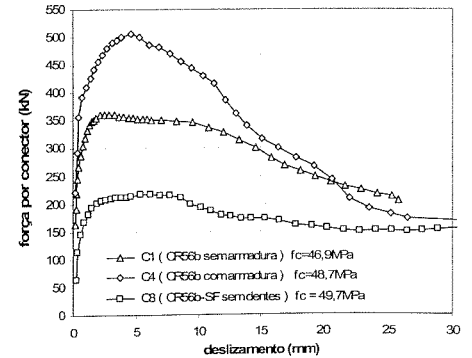


Fig. 11: Influência da resistência do betão no comportamento do conector CR56b



a) conexão com CR56b em betão C20/25



b) conexão com CR56b em betão C35/45

Fig. 12: Influência dos furos, da resistência do betão e da armadura na conexão com CR56b

resistência do betão 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 pernos e com *Perfobond*. Esses aspectos dizem respeito a modo de rotura, carga máxima aplicada durante o ensaio e capacidade de deformação da conexão.

Tendo em vista os modos de colapso, tem-se observado que os pernos tendem a sofrer rotura por corte na base do conector, imediatamente acima do cordão de soldadura. O *Perfobond* não sofre ele próprio rotura e tende a provocar elevada fissuração nas lajes de betão. O *Crestbond* apresenta um comportamento intermédio, já que provoca fissuração nas lajes de betão associada a alguma deformação visível nos dentes do conector. O *Crestbond* apresenta capacidade de carga um pouco inferior à de um *Perfobond* de dimensões similares. Tanto o *Perfobond* como o conector CR permitem aumentar a respectiva 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 pernos [9]. O limite de proporcionalidade para os conectores em chapa contínua é superior ao que se observa para os pernos. Da mesma forma, o deslizamento correspondente à carga máxima nos ensaios com conectores em chapa contínua é menor do que o que se observa para pernos, já que o comportamento pós-pico se caracteriza por uma perda de carga mais lenta. Como a rotura não se dá por corte do conector, a deformação final é muito elevada (Figs. 10-12).

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. Estes aspectos terão implicação directa 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 Universidade do Minho, à CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG, que possibilitaram a realização deste trabalho.

Notação

| | |
|---------------|--|
| P_{Rk} | resistência característica (corresponde à menor carga de rotura por conector, reduzida de 10%) |
| δ_u | deslizamento correspondente a P_{Rk} |
| δ_{tk} | deslizamento característico |
| f_y | limite de cedência do aço |
| $f_{c,cil}$ | resistência à compressão do betão, medida em provetes cilíndricos |
| R | raio de curvatura dos cantos dos dentes do conector <i>Crestbond</i> |

Referências

- [1] Leonhardt F et al. "New advantageous shear connection for composite structures with high fatigue strength", *Beton und Stahlbetonbau*, 12, 325-331, 1987.

- [2] Studnicka J et al. "Perforated shear connector for composite steel and concrete beams", *Proceedings of the Conference Composite Construction in Steel and Concrete IV*, Banff, Alberta, Canada, 367-378, 2000.
- [3] Hegger J et al. "Studies on the ductility of shear connectors when using high-strength concrete", *International Symposium on Connections Between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, 2, 1024-1045, 2001.
- [4] Galjaard H, Walraven, J.C. "Static tests on various types of shear connectors for composite structures", *International Symposium on Connections Between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, 2, 1313-1322, 2001.
- [5] Veríssimo G.S. *Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento* (Tese Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [6] Oguejiofor EC, Hosain MU. "A parametric study of perfobond rib shear connectors", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21, 614-625, 1994.
- [7] European Committee for Standardization (CEN). EN 1994-1-1 – *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures*, 2004.
- [8] Veldanda MR, Hosain MU. "Behavior of perfobond rib shear connectors: push-out tests", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19, 1-10, 1992.
- [9] Valente I, Cruz, P. *Experimental studies on shear connection systems in steel and lightweight concrete composite bridges* (Tese de Doutorado), Universidade do Minho, 2007.