



Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural

Maio / 2006 ISBN 85-99956-01-9

Investigações Teóricas, Experimentais, Numéricas e Computacionais

Trabalho JOR0146 - p. 410-419

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM CONECTOR DE CISALHAMENTO EM CHAPA DE AÇO ENDENTADA PARA ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

**G. S. Veríssimo⁽¹⁾, I. Valente⁽²⁾, J. L. R. Paes⁽³⁾,
P. J. S. Cruz⁽⁴⁾, R. H. Fakury⁽⁵⁾**

⁽¹⁾⁽³⁾ UFV – Depto. de Engenharia Civil

36570-000 – Viçosa - MG – Brasil - gustavo@ufv.br / jlrangel@ufv.br

⁽²⁾⁽⁴⁾ Universidade do Minho – Depto. de Engenharia Civil

4800-058 – Guimarães – Portugal- isabelv@civil.uminho.pt,

pcruz@civil.uminho.pt

⁽⁵⁾ UFMG – Depto. de Engenharia de Estruturas

Av. do Contorno, 842 - 2o. Andar - Centro

30110-060 – Belo Horizonte – MG – Brasi - fakury@dees.ufmg.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto e os resultados de ensaios tipo push-out de um novo conector de cisalhamento constituído por uma chapa de aço endentada. O conector proposto possui 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*). Além disso, as aberturas no conector facilitam a disposição das barras de armadura. A capacidade da conexão pode ser variada em função tanto da 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 no canteiro de obras. Devido à sua resistência última, um conector em chapa endentada pode substituir um número significativo de conectores tipo pino com cabeça (*stud*). O comportamento do novo conector foi analisado e comparado com o de conectores existentes, no caso o *Perfobond* e o *stud*, no que se refere à capacidade última e à ductilidade da conexão, avaliando a influência de diversas características geométricas e mecânicas. Os estudos realizados indicam que o conector em chapa endentada proposto apresenta um comportamento adequado associado a diversas vantagens construtivas e econômicas.

Palavras-chave: estruturas mistas de aço e concreto, conector de cisalhamento em chapa endentada, ensaios *push-out*, viga mista.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas mistas de aço e concreto têm sido cada vez mais empregadas na construção civil nas últimas décadas. As vantagens dos sistemas mistos são bem conhecidas e advêm do fato de que o aço e o concreto, nesses sistemas, podem trabalhar à tração e à compressão, respectivamente, situação em que se obtém o melhor desempenho de ambos.

A ligação entre o aço e o concreto nas estruturas mistas proporciona o comportamento misto, fazendo com que os dois elementos estruturais atuem como se fossem praticamente uma peça única. Para que isso ocorra, é necessário que na interface entre o aço e o concreto desenvolvam-se forças longitudinais de cisalhamento, o que se obtém mediante 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 [1], ZELLNER [2], STUDNICKA [3], HEGGER [4], GALJAARD [5], VERÍSSIMO [6], HAUKE [7]). 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*, um conector tipo pino com cabeça, desenvolvido na década de 40 pela *Nelson Stud Welding* (Figura 1a). O conector *stud* se difundiu mundialmente, em função 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, que inclui um gerador de 225 kVA no canteiro de obras.

No final da década de 80, a empresa alemã Leonhardt, Andrã and Partners desenvolveu um conector de cisalhamento chamado *Perfobond*, para a construção da 3ª Ponte sobre o rio Caroni, na Venezuela (ZELLNER [2]). O *Perfobond* consiste de uma chapa plana de aço, com furos circulares, soldada sobre a mesa superior da viga de aço (Figura 1b) e foi idealizado a partir da necessidade 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 desse conector é a dificuldade para o posicionamento da armadura inferior da laje, quando as barras de aço têm que passar por dentro das aberturas.

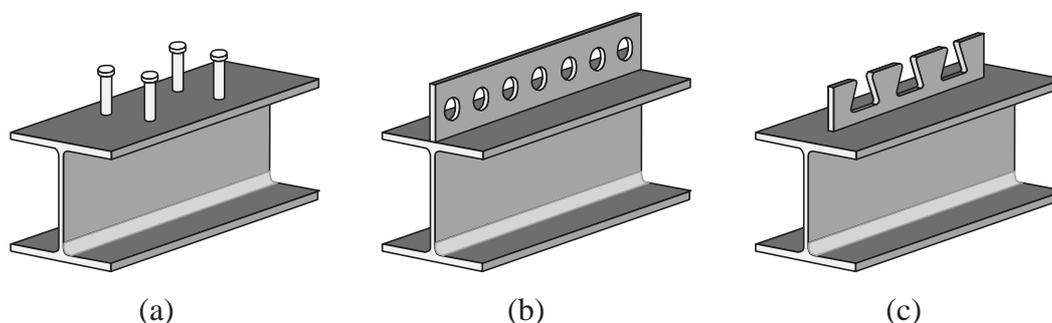


Figura 1 – (a) conector *stud*; (b) conector *Perfobond*; (c) conector CR.

Neste trabalho são apresentados o projeto e os resultados de ensaios de um novo conector de cisalhamento, denominado CR (Figura 1c), formado por uma chapa endentada, que se constitui em uma alternativa interessante ao *Perfobond*, pois permite a passagem com facilidade das barras de armadura da laje. O conector CR 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, em um comportamento bastante similar ao do *Perfobond*. 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.

Da mesma forma que o *Perfobond*, os conectores CR 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; a solda pode ser efetuada tanto na obra como na fábrica. Em termos de capacidade de carga, os conectores CR, e também os *Perfobond*, propiciam resistência similar à obtida com grupos de *studs*.

Diversos ensaios realizados pelos autores deste trabalho com os conectores CR 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 [1], OGUEJIOFOR [8]). Dessa forma, os conectores em chapa dentada, ou perfurada, 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 CR foi realizado por meio de ensaios tipo *push-out*, os quais permitem caracterizar a relação carga-deslizamento. De acordo com o EUROCODE 4 [9], o corpo-de-prova para o ensaio *push-out* consiste de duas pequenas lajes de concreto conectadas a um perfil metálico, conforme mostrado na Figura 2. Além da geometria do modelo, o EUROCODE 4 [9] 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 (EUROCODE 4 [9]). Na seqüência, o ensaio passa a ser controlado pelo deslizamento relativo entre o perfil metálico e a laje de concreto. 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 corpo de prova deve ser tomada como o máximo deslizamento medido para a carga característica (P_{Rk}), como mostrado na Figura 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 $0,9\delta_u$.

Os ensaios do tipo *push-out* são os mais adequados para o estudo da conexão entre o aço e o concreto do que os ensaios de flexão, pois permitem obter as relações entre forças aplicadas e deformações correspondentes de forma mais simples e direta.

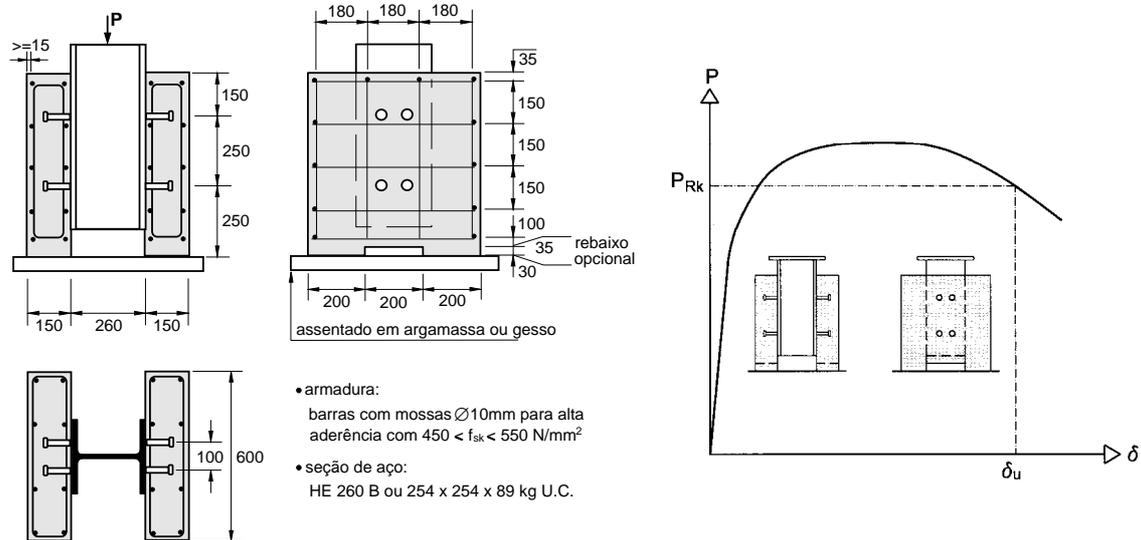


Figura 2 – Características de um ensaio push-out típico segundo o EUROCODE 4 [9].

2.2 O programa experimental

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

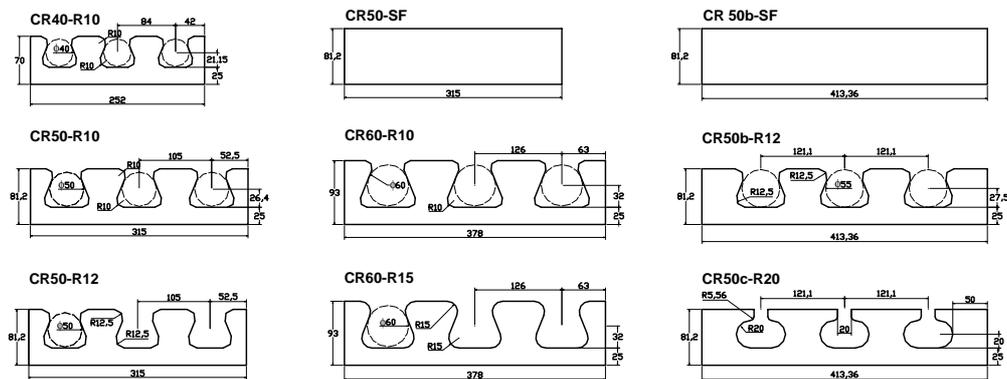


Figura 3 - Configurações dos conectores.

Na série A foram testados conectores CR 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 variou-se o raio dos cantos dos dentes e a taxa de armadura, com o objetivo de se 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 no concreto no conector dentado.

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 CR50b, cuja configuração foi selecionada a partir dos resultados obtidos da série A, considerando, entre outros fatores, a influência da resistência do concreto no comportamento global da conexão. 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 CR50b-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, CR50b e CR50c.

2.3 Fabricação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram construídos segundo as especificações do EUROCODE 4 [9] (Figura 2). Os conectores foram soldados aos perfis por um soldador qualificado (Figura 4a). As fôrmas foram construídas com chapas de MDF hidrófugo (Figura 4c). Os corpos-de-prova foram concretados e curados numa central de concreto e posteriormente transportados para o laboratório. O concreto foi produzido com brita nº. 0 e plastificante, para garantir um bom adensamento.

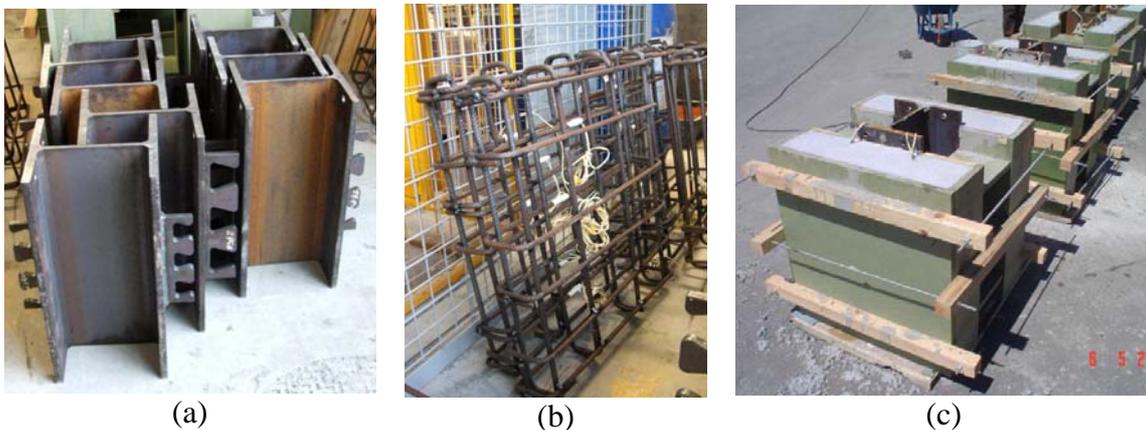


Figura 4 - Detalhes da fabricação dos modelos.

Na Figura 5 é apresentada a configuração de um dos modelos testados com conector CR50b, com armadura passando por dentro dos dentes do conector. Nos modelos sem armadura eram suprimidas as barras transversais na região do conector.

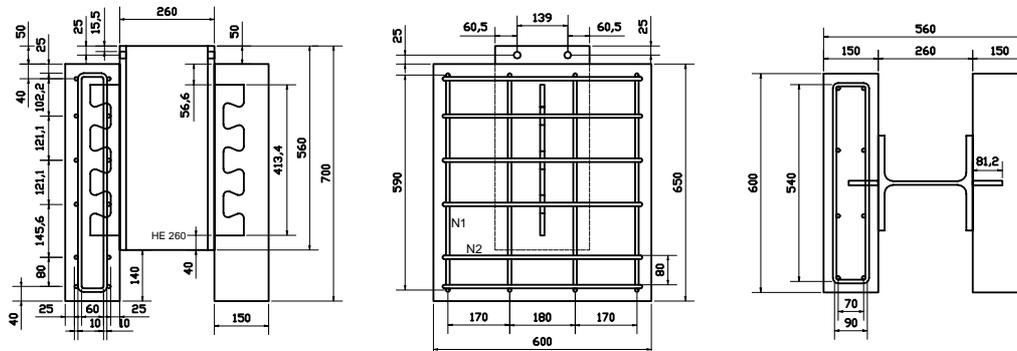


Figura 5 - Configuração de um modelo com conector CR50b com armadura passante.

2.4 Propriedades dos materiais utilizados

Os conectores utilizados na série A foram fabricados no Brasil, com chapas de aço USI-CIVIL 300 (resistência ao escoamento de 300 MPa) com espessura de 12,5 mm. Os conectores utilizados nas séries X, B e C foram fabricados em Portugal, com chapas de aço S 275 JR (resistência ao escoamento de 275 MPa) com espessura de 12,0 mm. Para as armaduras foi utilizado aço CA50 (resistência ao escoamento de 500 MPa). As séries A e X foram confeccionadas com concreto C25 e as séries B e C com concretos C20 e C35, respectivamente (Figura 6).

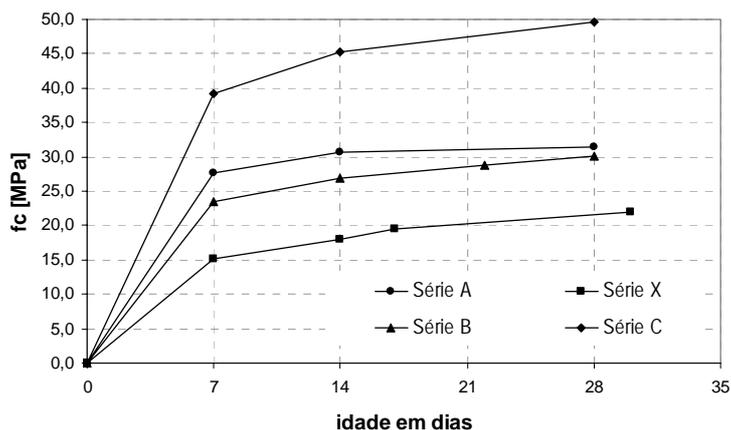


Figura 6 - Evolução da resistência do concreto com a idade.

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.

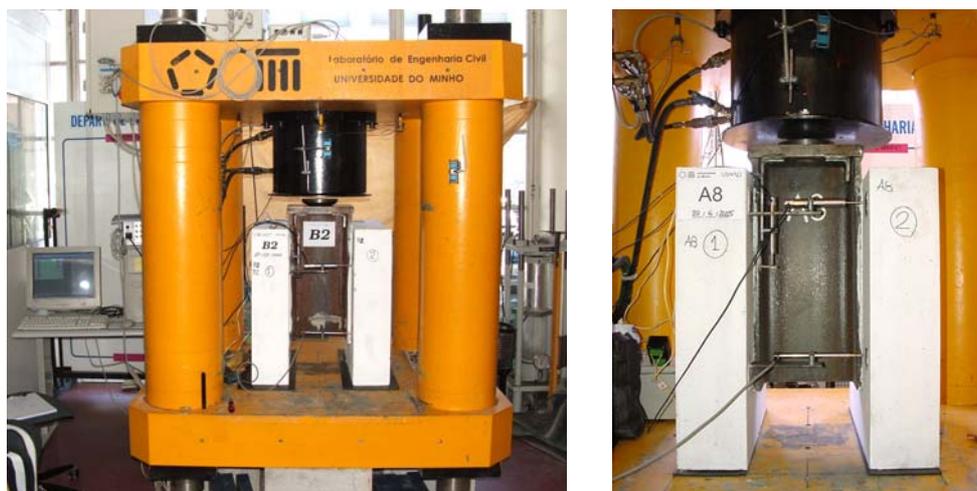


Figura 7 - Estrutura de reação e instrumentação para o ensaio tipo *push-out*.

3 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Na TABELA 1 são apresentados os resultados dos ensaios realizados.

TABELA 1 – Resultados dos ensaios realizados.

modelo	conector	idade dias	$f_{c,cil}$ 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.

Na Figura 8 são apresentados os resultados para os conectores com dentes referidos a um furo de 50 mm.

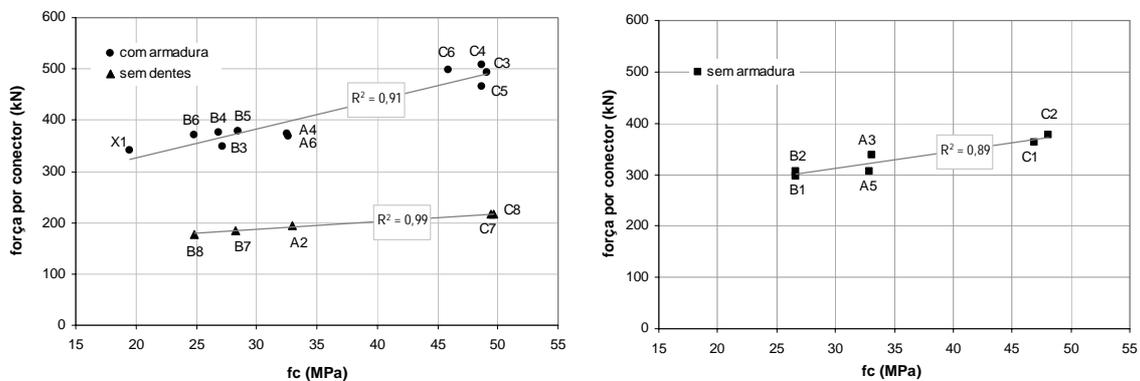


Figura 8 - Resultados para conectores com dentes referidos a um furo de 50 mm.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

O mecanismo de ruptura observado nos ensaios com o conector CR50b está relacionado à ruptura do concreto. Os conectores e respectivas soldas permanecem intactos ou quase 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 pela laje. Nos modelos sem armadura percebe-se maior mobilização do concreto da laje, com fissuração mais intensa na face externa da laje.



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

Na Figura 10 são apresentados resultados dos ensaios com o conector CR realizados na Universidade do Minho, juntamente com resultados de ensaios com conectores *stud* e *Perfobond* efetuados na Universidade de Saskatchewan (OGUEJIOFOR [8] e VELDANDA [10]). 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 *stud*. Para a mesma faixa de resistência do concreto, um único conector CR 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 CR.

Na Figura 11 são apresentados resultados de modelos com conector CR50b idênticos, exceto pela resistência do concreto. Observa-se que o aumento da capacidade da conexão é proporcional a 3/4 do aumento da resistência do concreto. Quando há armadura passante a variação da resistência do concreto tem pouca influência na ductilidade da conexão.

Na Figura 12 são apresentados alguns resultados de ensaios com o conector CR50b, 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, e 40% nos modelos com concreto C35. Isso demonstra que, com o aumento da resistência do concreto, ocorre um melhor aproveitamento do efeito da armadura.

Nos ensaios realizados com o conector CR, 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.

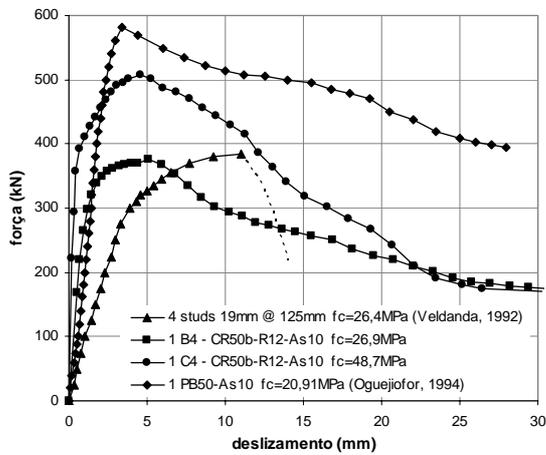


Figura 10 - Comportamento típico do conector CR em comparação com os conectores *stud* e *Perfobond*.

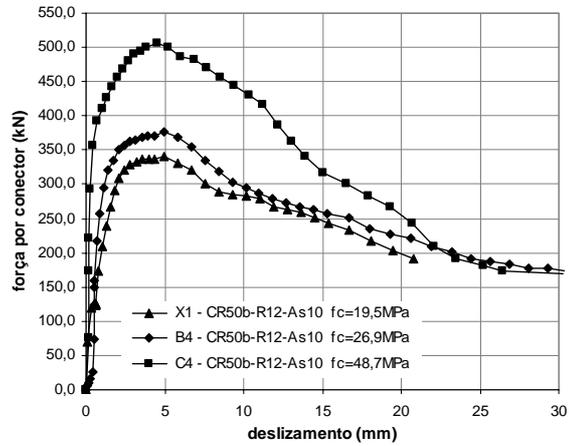
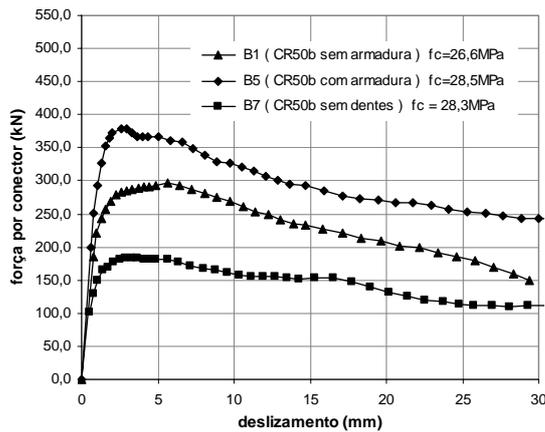
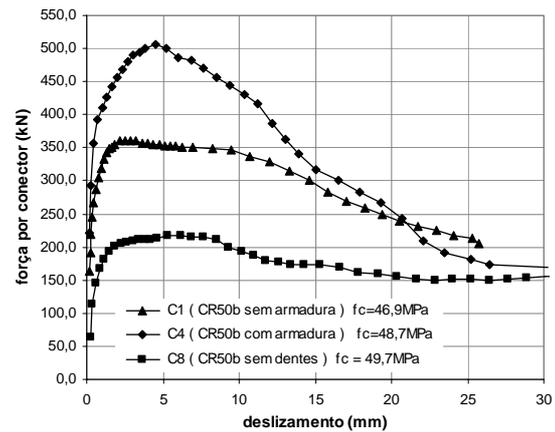


Figura 11 - Influência da resistência do concreto no comportamento do conector CR50b.



a) conexão com CR50b em concreto C20



b) conexão com CR50b em concreto C35

Figura 12 - Influência dos furos, da resistência do concreto e da armadura na conexão com CR50b

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 CR apresenta um comportamento intermédio, já que provoca fissuração nas lajes de concreto associada a alguma deformação visível nos dentes do conector. O conector CR apresenta menor capacidade de carga que um conector *Perfobond* de dimensões similares. Tanto o *Perfobond* como o conector CR 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 [11]). O limite de proporcionalidade para os conectores em chapa contínua é superior ao que se observa para os *studs*. 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 o *stud*, já que 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.

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 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.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade do Minho, à CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG, que possibilitaram a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LEONHARDT, F.; et al. Neues vorteilhaftes verbundmittel für stahlverbund-tragwerk mit höher dauerfestigkeit (New advantageous shear connection for composite structures with high fatigue strength). *Beton und Stahlbetonbau*, Berlim, 1987, No. 12, pp. 325-331.
- [2] ZELLNER, W. Recent designs of composite bridges and a new type of shear connectors. *Proceedings of the IABSE/ASCE Engineering Foundation Conference on Composite Construction*, Henniker, N.H., 1987. pp.240-252.
- [3] STUDNICKA, J.; et al. Perforated shear connector for composite steel and concrete beams. In: Conference Composite Construction in Steel and Concrete IV, *Proceedings of the Conference Composite Construction in Steel and Concrete IV*, Banff, Alberta, Canada, 2000, pp. 367-378.
- [4] HEGGER, J.; et al. Studies on the ductility of shear connectors when using high-strength concrete, In: *International Symposium on Connections Between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, 2001, Vol.2, pp. 1024-1045.
- [5] GALJAARD, H.; WALRAVEN, J.C.; Static tests on various types of shear connectors for composite structures, In: *International Symposium on Connections Between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, 2001, Vol.2, pp. 1313-1322.
- [6] VERÍSSIMO, G. S. Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, 2004. Projeto de Tese de Doutorado.
- [7] HAUKE, B. Shear connectors for composite members of high strength materials. *EUROSTEEL 2005 - 4th European Conference on Steel and Composite Structures*, Maastricht, 2005, Vol.B, pp. 4.2-57 – 4.2-64.
- [8] OGUEJIOFOR, E. C.; HOSAIN, M. U.: A parametric study of perfobond rib shear connectors, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21, pp. 614-625, 1994.
- [9] EUROCODE 4, EN 1994-1-1:2004: Design of composite steel and concrete structures. European Committee for Standardisation (CEN), 2004.
- [10] VELDANDA, M. R.; HOSAIN, M. U. Behavior of perfobond rib shear connectors: push-out tests. *Canadian Journal of Civil Engineering*, n.19, p.1-10, 1992.
- [11] VALENTE, I.; CRUZ, P.: Experimental studies on shear connection between steel and lightweight concrete, *Second International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, Quioto, Japão, 18-22 Outubro 2004.