

CMNE CILAMCE 2007

CMNE - Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia
XXVII CILAMCE - Congresso Ibero Latino-Americano sobre Métodos
Computacionais em Engenharia

13 . 15 Junho 2007

Porto Portugal

Organizado por:

SEMNI APMJAC abmec

inegi 20 anos

FEUP PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

www.fe.up.pt/cmne2007

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM CONECTOR DE CISALHAMENTO EM CHAPA DENTADA PARA ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

**Gustavo S. Veríssimo^{1*}, Alessandro F. N. Oliveira², Ricardo H. Fakury², Francisco
Carlos Rodrigues², José L. R. Paes¹, Isabel Valente³, Paulo J. S. Cruz³**

1: Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa
DEC/CCE/UFV – CEP 36570-000, Viçosa – Minas Gerais, Brasil
e-mail: gustavo@ufv.br, jlrange@ufv.br
web: <http://www.ufv.br/dec/>

2: Departamento de Engenharia de Estruturas
Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Contorno 842, 2º andar - Centro, CEP-30110-060, Belo Horizonte – Minas Gerais, Brasil
e-mail: alessandroecivil@yahoo.com.br, fakury@dees.ufmg.br, francisco@dees.ufmg.br
web: <http://www.dees.ufmg.br/edu/app>

3: Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho
4800-058, Guimarães, Portugal
e-mail: isabelv@civil.uminho.pt, pcruz@civil.uminho.pt
web: <http://www.civil.uminho.pt/>

Palavras-chave: conector, ensaio push-out, viga mista, estrutura mista, estruturas metálicas, pré-laje

Resumo. *Este trabalho apresenta uma avaliação do comportamento de um conector de cisalhamento em chapa dentada, denominado Crestbond, para sistemas de pisos mistos, a partir dos resultados de 40 ensaios push-out. Avalia-se a capacidade de carga da conexão, sua ductilidade e os modos de colapso observados, considerando-se o efeito de diversas variáveis. Os resultados demonstram que o conector proposto apresenta um comportamento adequado, com alta rigidez para cargas de serviço e boa ductilidade em estado limite último, constituindo uma alternativa a conectores de cisalhamento como o stud bolt e o Perfobond.*

1. INTRODUÇÃO

As estruturas mistas de aço e concreto têm sido utilizadas já há um tempo considerável na construção de pontes e edifícios. Seu emprego na engenharia da construção tem sido crescente, devido a diversas vantagens econômicas e construtivas que oferecem.

Um componente essencial de um elemento estrutural misto é a conexão entre as seções de aço e de concreto. Essa conexão é viabilizada por conectores de cisalhamento mecânicos, que permitem a transferência de forças longitudinais do aço para o concreto e vice-versa, além de resistir a forças transversais ao eixo do elemento que tendem a causar a separação dos materiais na interface entre ambos. Uma variedade de dispositivos e configurações têm sido utilizados como conectores de cisalhamento, e diversos aspectos econômicos e técnicos continuam a motivar o desenvolvimento de novos produtos.

Vários conectores de cisalhamento já foram propostos e diversos tipos são usados em estruturas mistas atualmente [1][2][3][4][5][6][7]. No entanto, muitos deles apresentam restrições importantes no que se refere à produção industrial, à instalação e ao próprio comportamento estrutural. Atualmente, são usuais o conector stud (Figura 1a), o X-HVB da Hilti e os conectores em perfil U e perfil T laminados.

2. SOBRE O COMPORTAMENTO DE CONECTORES DE CISALHAMENTO

Os conectores de cisalhamento são divididos em duas categorias: conectores rígidos e conectores flexíveis. Os conectores rígidos não se deformam sob carga e proporcionam uma conexão praticamente sem deslizamento. Entretanto, com esse tipo de conector ocorre ruptura frágil por esmagamento ou cisalhamento do concreto, o que é indesejável. O modo de falha de um conector flexível é mais dúctil e menos catastrófico do que o de um conector rígido. Apesar do modo de falha, um conector flexível não é propriamente um conector ideal porque se deforma sob carga e, portanto, é propenso a fadiga (e.g. o stud é um conector flexível que se deforma para cargas de serviço e apresenta baixo desempenho à fadiga). Um conector rígido, por outro lado, tende a não sofrer problemas de fadiga.

Em fins da década de 80, buscando uma alternativa ao baixo desempenho dos studs à fadiga, Leonhardt *et al.* [1] desenvolveram um conector denominado Perfobond para aplicação em pontes mistas. O Perfobond é um conector rígido que sofre apenas deformações elásticas de pequena magnitude em estado de serviço. Consiste basicamente de uma chapa de aço plana com furos circulares soldada ao perfil metálico e depois concretada (Figura 1b).

Segundo a EN 1994-1-1:2004 [8], um conector de cisalhamento é classificado como dúctil se apresentar deslizamento característico δ_{uk} superior a 6,0 mm. Embora o Perfobond apresente comportamento rígido para cargas de serviço e ductilidade satisfatória em estado limite último, resultados de ensaios revelam que seu deslizamento característico típico não é suficiente para caracterizar a conexão como dúctil ($\delta_{uk} < 6,0$ mm) [3][9]. Como consequência, para efeito de dimensionamento não se pode considerar no cálculo que a seção mista seja idealmente plástica.

Um conector de cisalhamento ideal é aquele cujo comportamento é caracterizado por deslizamento nulo (ou quase nulo) para cargas de serviço e 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.

3. UM NOVO CONECTOR EM CHAPA CONTÍNUA ENDENTADA

Atualmente, dois fatores representam dificuldades para a utilização dos conectores de cisalhamento usuais no Brasil: um deles é o alto custo de instalação dos studs; outro é a utilização de perfis laminados com mesas muito estreitas em vigas de sistemas de piso mistos que utilizam pré-laje de concreto. Nesta última situação, o espaço disponível sobre a mesa do perfil é insuficiente para a instalação de conectores em perfil U laminado.

Tendo em vista as dificuldades mencionadas e os aspectos comportamentais citados no item anterior, VERÍSSIMO [6][7] desenvolveu um novo conector que atende ao critério de ductilidade da EN 1994-1-1:2004 ($\delta_{uk} \geq 6,0$ mm) e concilia as seguintes vantagens simultaneamente:

- furos abertos para facilitar a disposição da armadura da laje;
- deformabilidade superior à do Perfobond, preservando o comportamento rígido em estado de serviço;
- configuração para corte simétrico, a fim de maximizar a produtividade na fabricação.

O novo conector foi denominado Crestbond [6][7] e está mostrado na Figura 1c.

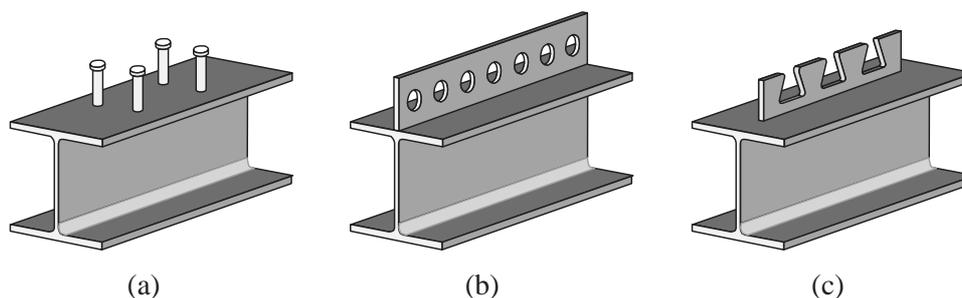


Figura 1. Conectores de cisalhamento: a) stud; b) Perfobond; c) Crestbond.

Além das vantagens já mencionadas, por ser um conector em chapa longitudinal, o Crestbond consome pouco espaço sobre a mesa do perfil metálico e, por isso, é adequado à utilização em sistemas de piso mistos com pré-laje de concreto.

O 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 conector é solicitado, e a laje tende a deslizar em relação ao perfil de aço, o concreto confinado 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, o que caracteriza o chamado efeito de pino. Resultados experimentais têm demonstrado que a contribuição do efeito de pino para a

capacidade de conectores em chapa perfurada ou cortada é muito significativa e que esse tipo de conexão constitui uma alternativa viável a conectores como o stud e o Perfobond.

4. METODOLOGIA

Para a análise experimental do conector Crestbond adotou-se a especificação da EN 1994-1-1:2004 para ensaio push-out [8]. Os modelos consistem de duas pequenas lajes de concreto conectadas a um perfil metálico, conforme a Figura 2. Além da geometria do modelo, a EN 1994-1-1:2004 especifica o procedimento de ensaio, que é executado em duas fases consecutivas. Primeiramente, 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. Esse deslocamento deve ser medido até que a carga aplicada seja inferior a 80% da carga máxima atingida. O ensaio deve ser realizado com controle de deslocamentos, para que seja possível prosseguir com o carregamento na fase pós-pico.

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} é igual a $0,9\delta_u$.

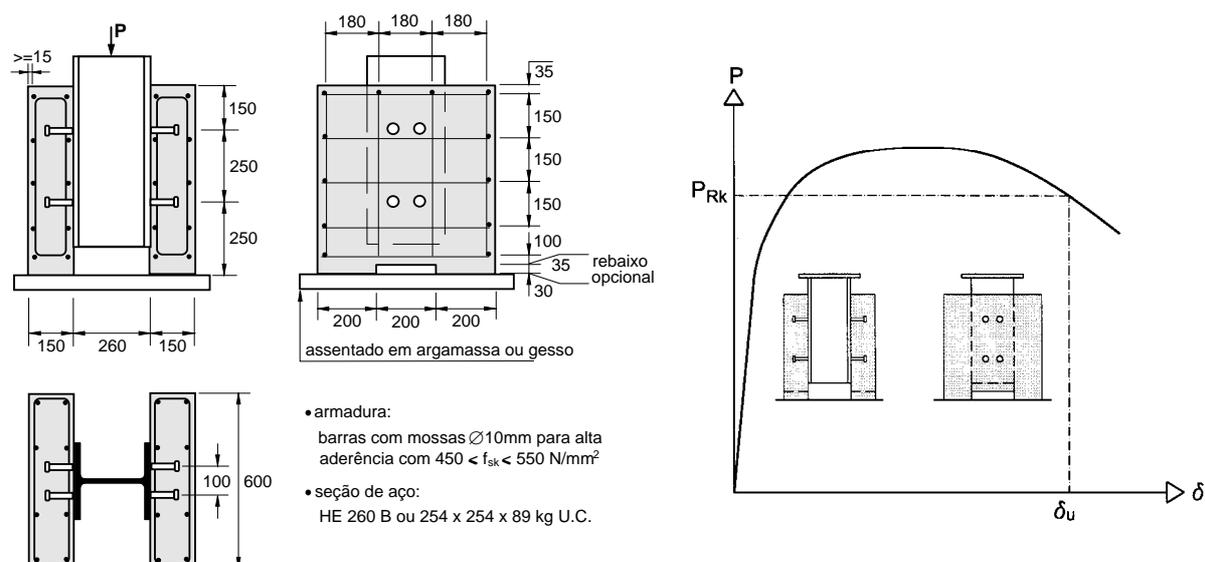


Figura 2 – Características de um ensaio push-out típico segundo a EN 1994-1-1:2004 [8].

5. O PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental consistiu de 40 ensaios push-out, agrupados em quatro séries denominadas A, B, C e D, respectivamente. As configurações dos conectores utilizados nos ensaios são mostradas na Figura 3.

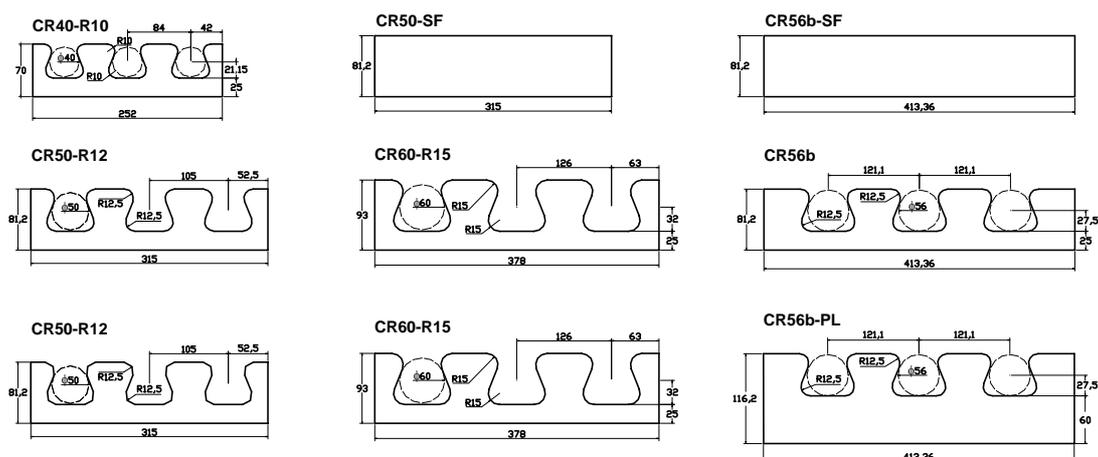


Figura 3 - Configurações dos conectores testados.

A geometria do conector Crestbond é função do diâmetro de um círculo fictício inscrito no dente trapezoidal do conector. Todas as dimensões do conector são determinadas a partir desse diâmetro [6].

Na série A foram feitos oito ensaios com conectores de três tamanhos: CR40, CR50 e CR60, com dentes referidos a diâmetros de 40, 50 e 60 mm, respectivamente. Variou-se também o raio dos cantos dos dentes e a taxa de armadura, para possibilitar uma avaliação qualitativa da influência dessas variáveis no comportamento da conexão. Um dos modelos possuía um conector sem dentes, para permitir a avaliação do efeito de pino no concreto.

Em função dos resultados da série A, criou-se a versão CR56b do conector, que possui dentes reforçados e diâmetro de referência igual a 56 mm (ver Figura 3 e Figura 8).

Na série B foram feitos oito ensaios com conectores CR56b, variando-se a taxa de armadura. A série C é idêntica à série B, exceto pela resistência do concreto. Nas séries B e C, o objetivo foi caracterizar o comportamento do conector CR56b, considerando a influência da resistência do concreto e da armadura no comportamento global da conexão. Foram ensaiados pares de modelos idênticos sem armadura, com armadura de 10 mm, com armadura de 12 mm e com o conector CR50b-SF (chapa plana sem dentes). Todos os modelos possuíam barras de armadura passando abaixo e acima do conector. O que variava era a armadura passante, ou seja, as barras que passam por dentro dos dentes do conector (Figura 4).

Na série D, foram realizados 15 ensaios para a avaliação do comportamento do conector dentado com os dentes elevados (CR56b-PL), para utilização em conjunto com pré-laje pré-fabricada de concreto. Os ensaios foram divididos em cinco grupos designados por D1, D2, D3, D4 e D5, respectivamente. Na série D adotou-se armadura com barras de 8 mm e variou-se a espessura da pré-laje. Nessa série havia modelos com laje maciça (Figura 5c), com pré-laje real (Figura 5a) e com placas de poliestireno expandido (ISOPOR), em lugar da pré-laje (Figura 5b).

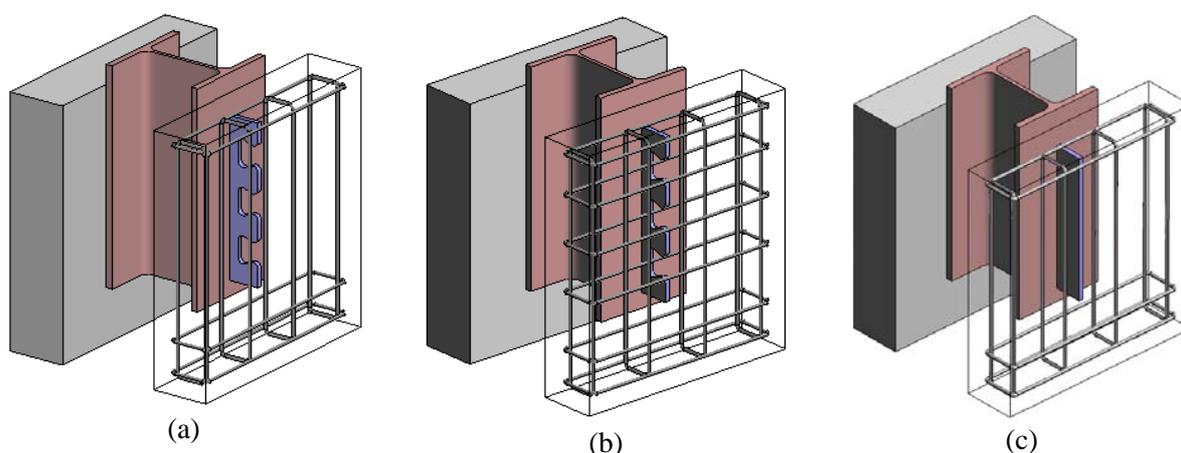


Figura 4. Configurações dos modelos com CR56b: a) sem armadura passante; b) com armadura passante; c) conector sem dentes.

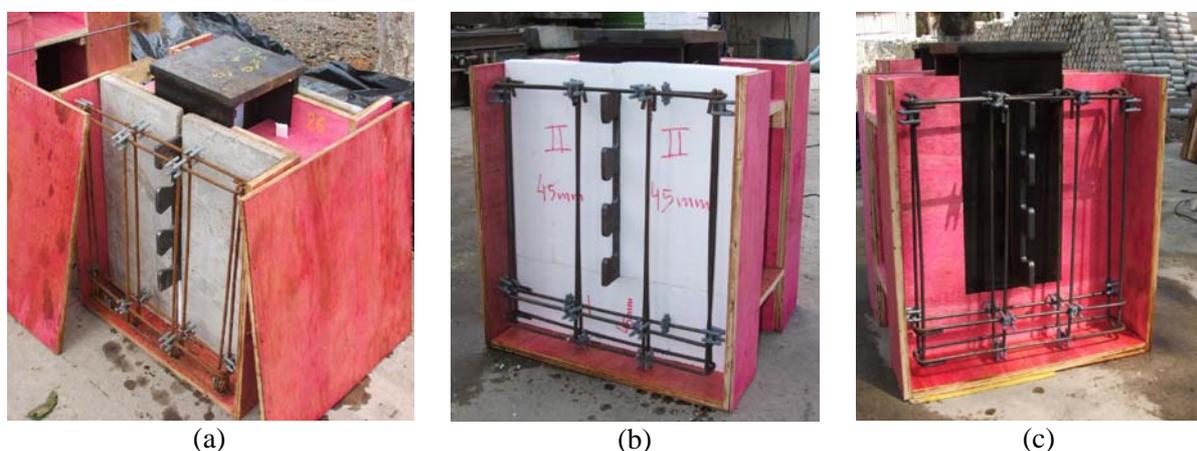


Figura 5- Montagem dos modelos da série D, com CR56b-PL: (a) com pré-laje de concreto; (b) com poliestireno expandido e (c) com laje maciça.

Na Tabela 1 são apresentadas as características dos modelos. As variáveis estão descritas abaixo:

D	diâmetro de referência do dente trapezoidal
L_{sc}	comprimento do conector
h_{sc}	altura total do conector
t_{sc}	espessura da chapa do conector
f_{yse}	limite de escoamento do aço do conector
ϕ	diâmetro das barras de aço da armadura
n_1	número de barras de armadura passando por fora do conector
n_2	número de barras de armadura passando por dentro do conector
t_c	espessura total da laje, incluindo a pré-laje, se houver
t_{PL}	espessura da pré-laje

Modelo	Conector							armadura			laje	
	Tipo	D mm	R mm	L_{sc} mm	h_{sc} mm	t_{sc} mm	f_{ysc} MPa	ϕ mm	n_1 mm	n_2 mm	t_c mm	t_{PL} mm
A1	CR40-R10	40	10	252	70	12,7	359	10	6	6	15	-
A2	CR50-SF	50	-	315	81.2	12,7	359	10	6	0	15	-
A3	CR50-R10	50	10	315	81.2	12,7	359	10	6	0	15	-
A4	CR50-R10	50	10	315	81.2	12,7	359	10	6	6	15	-
A5	CR50-R12	50	12,5	315	81.2	12,7	359	10	6	0	15	-
A6	CR50-R12	50	12,5	315	81.2	12,7	359	10	6	6	15	-
A7	CR60-R10	60	10	378	93	12,7	359	10	6	6	15	-
A8	CR60-R15	60	15	378	93	12,7	359	10	6	6	15	-
B0	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	302	10	6	6	15	-
B1	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	0	15	-
B2	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	0	15	-
B3	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	6	15	-
B4	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	6	15	-
B5	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	12	6	6	15	-
B6	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	12	6	6	15	-
B7	CR56b-SF	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	0	15	-
B8	CR56b-SF	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	0	15	-
C1	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	6	15	-
C2	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	6	15	-
C3	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	6	15	-
C4	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	6	15	-
C5	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	12	6	6	15	-
C6	CR56b	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	12	6	6	15	-
C7	CR56b-SF	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	0	15	-
C8	CR56b-SF	56	12,5	413.4	81.2	12,0	324	10	6	0	15	-
D1a	CR56b-PL iso30	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	30
D1b	CR56b-PL iso30	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	30
D1c	CR56b-PL iso30	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	30
D2a	CR56b-PL iso30	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	6	15	30
D2b	CR56b-PL iso30	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	6	15	30
D2c	CR56b-PL iso30	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	6	15	30
D3a	CR56b-PL pl30	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	30
D3b	CR56b-PL pl30	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	30
D3c	CR56b-PL pl30	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	30
D4a	CR56b-PL iso45	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	45
D4b	CR56b-PL iso45	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	45
D4c	CR56b-PL iso45	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	45
D5a	CR56b	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	-
D5b	CR56b	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	-
D5c	CR56b	56	12,5	413.4	116.2	12,7	436	8	6	0	15	-

Tabela 1. Características dos modelos ensaiados.

5.1. Configuração dos ensaios e instrumentação

As séries A, B e C foram ensaiadas no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, em Portugal. Para a aplicação da carga vertical, utilizou-se um sistema hidráulico ligado a um atuador com capacidade de 5000 kN. A série D foi ensaiada no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, no Brasil. Para essa série foi empregado um atuador com capacidade de 2000 kN.

O deslizamento relativo entre as lajes de concreto e o perfil metálico, bem como o *uplift*, foram medidos em ambas as lajes, em intervalos de tempo regulares, por meio de transdutores de deslocamento. A montagem do ensaio é ilustrada na Figura 6. Os modelos foram posicionados sobre lâminas de neoprene com 5,0 mm de espessura.



Figura 6 - Estrutura de reação e instrumentação para o ensaio tipo *push-out*.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Mecanismos de colapso

Em todos os ensaios realizados, a ruptura dos modelos tem início com uma fissura longitudinal na laje, na região da extremidade inferior do conector (Figura 7a e 9b). Essa fissura se estende gradualmente ao longo da laje (Figura 7b), seguida de esmagamento do concreto na vizinhança do conector.

O modo de falha observado nos modelos da série A está associado à ruptura do concreto e do conector. Ao final dos ensaios, as lajes estavam fissuradas, e os conectores apresentavam os dentes muito deformados ou mesmo rompidos (Figura 8a). Não havia informação disponível para avaliar até que ponto a deformabilidade dos dentes prejudica a capacidade da conexão. Por essa razão produziu-se uma segunda versão do conector, com dentes mais resistentes, chamada CR56b, para forçar o colapso no concreto. O conector CR56b permaneceu praticamente intacto após os ensaios, apresentando apenas uma pequena deformação do dente

frontal (Figura 8b). Para a série D, criou-se a versão CR56b-PL, que possui altura maior que o CR56b, para permitir que o conector tenha um comportamento adequado mesmo quando se usa uma pré-laje de concreto. Não obstante, os dentes são idênticos aos do CR56b (Figura 8c). Os pinos virtuais de concreto trabalham acima da pré-laje. Na série D, os conectores permaneceram intactos (Figura 8c), com colapso ocorrendo no concreto, como era o objetivo.

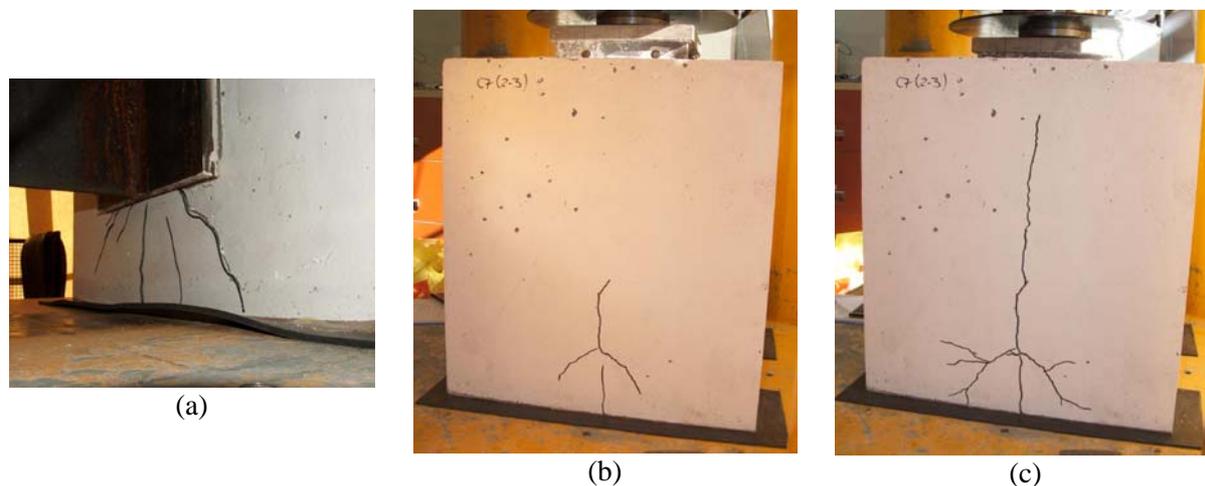


Figura 7 - Aspecto das fissuras verticais nas lajes.

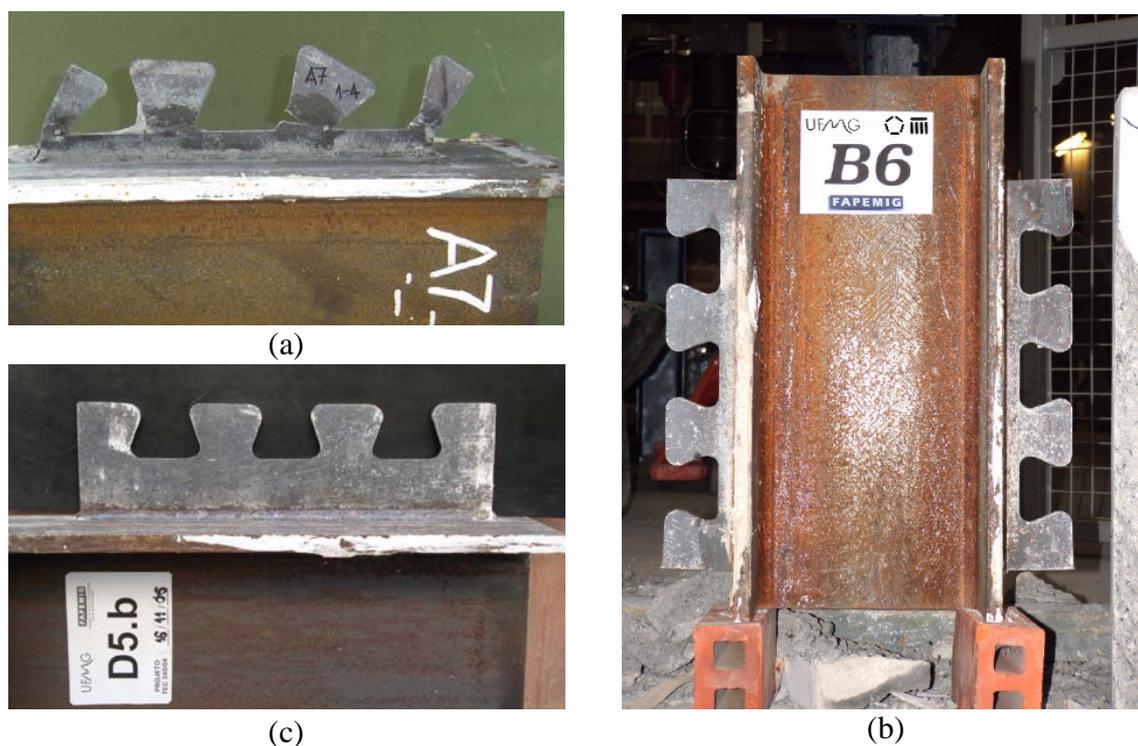


Figura 8 – Aspecto dos dentes dos conectores após os ensaios.

Nos modelos das séries A, B e C as lajes sofreram ruptura pela face interna, conforme pode ser visto na Figura 9. Os modelos da série D apresentaram ruptura pela face externa das lajes (Figura 10), de modo análogo ao ocorrido nos ensaios de Oguejiofor [9]. Constatou-se que essa diferença no comportamento se deve, principalmente, à excentricidade da força de compressão que o concreto exerce na face frontal nos conectores.



Figura 9 - Ruptura típica pela face interna das lajes nas séries A, B, e C.



Figura 10 - Ruptura típica pela face externa das lajes na série D.

No conjunto dos modelos estudados neste trabalho a altura dos conectores varia, enquanto a espessura das lajes é quase sempre constante. Consequentemente, a posição da resultante de compressão na face frontal do conector (F_c) também varia (Figura 11). Nos modelos das séries A, B e C essa força possuía excentricidade maior em relação ao eixo da laje do que nos modelos da série D. Na Figura 11 mostra-se esquematicamente a excentricidade das forças internas na laje. Quando a excentricidade da força frontal é grande, a laje fica mais solicitada de um lado e rompe primeiro do lado mais solicitado. Neste caso, como os esforços não chegam a se distribuir por toda a seção da laje, a resistência última é um pouco menor do que quando a força na laje tem pequena excentricidade.

Nos modelos da série D, bem como nos de Oguejiofor [9], a excentricidade da força frontal é pequena. Nessa situação os esforços se distribuem de forma mais uniforme em toda a espessura da laje.

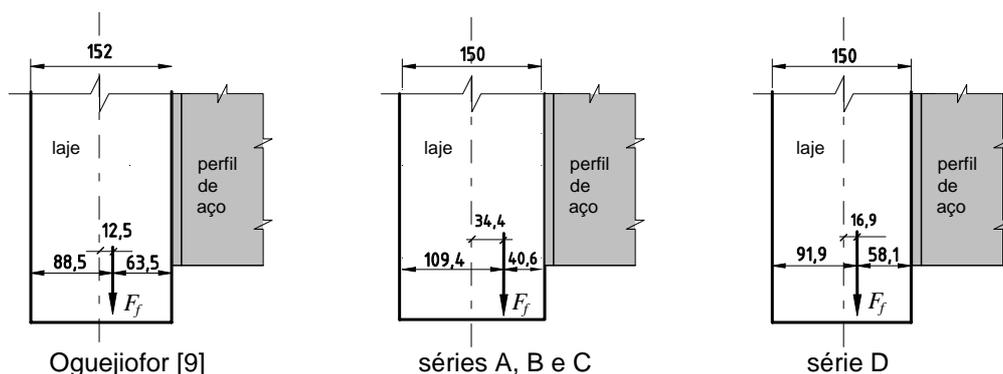


Figura 11 – Variação da excentricidade da força frontal no conector em relação ao plano médio da laje.

Verificando o estado da conexão após o desmonte dos modelos ensaiados, percebe-se claramente que, na região dos dentes do conector, o concreto se rompe por cisalhamento em dois planos de corte muito bem definidos, em que se pode observar a ruptura concomitante da pasta de cimento e dos agregados (Figura 12).



Figura 12 – Aspecto do concreto compactado no interior dos dentes do conector, após o cisalhamento em dois planos de corte.

6.2 Relação força-deslizamento

A relação força-deslizamento para a conexão com Crestbond pode ser observada nas Figuras 13 a 18. Os deslizamentos medidos, bem como a resistência última, estão apresentados na Tabela 2.

Em geral, o conector Crestbond apresenta comportamento bastante rígido para cargas de serviço e grande ductilidade em estado limite último, como pode ser observado nas Figuras 13 a 18, mantendo uma boa capacidade de suportar carga na fase pós-pico. É comum observar nos ensaios que, mesmo para deslizamentos da ordem de 20 a 30 mm, os modelos ainda são capazes de reter uma parcela muito significativa da carga máxima.

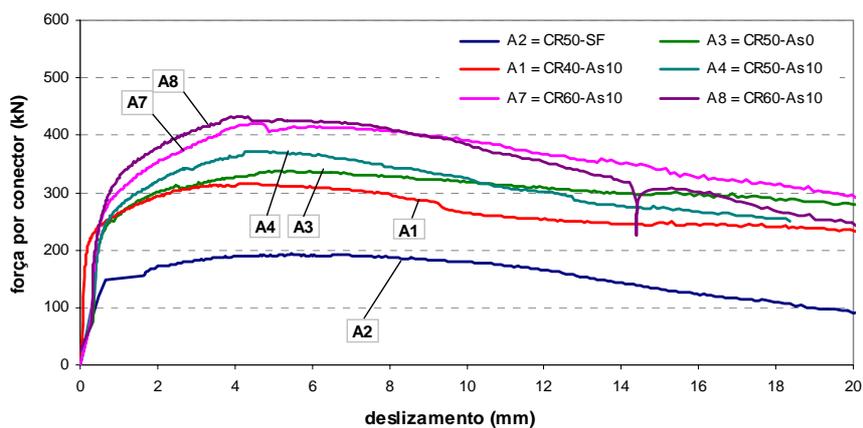


Figura 13 – Curvas força-deslizamento para modelos da série A, com conector CRxx.

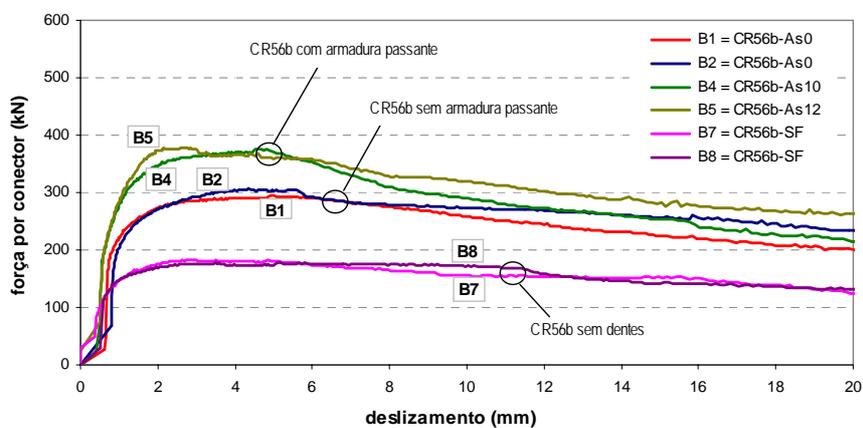


Figura 14 – Curvas força-deslizamento para modelos da série B, com conector CR56b.

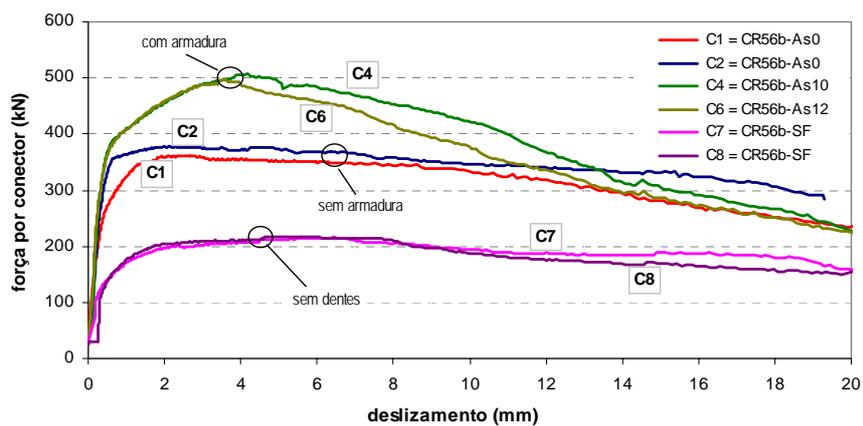


Figura 15 – Curvas força-deslizamento para modelos da série C, com conector CR56b.

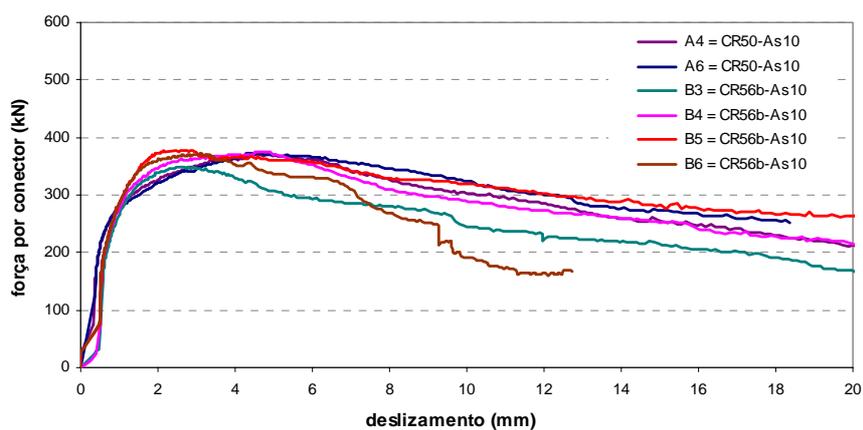


Figura 16 – Resultados para CR50 versus CR56b.

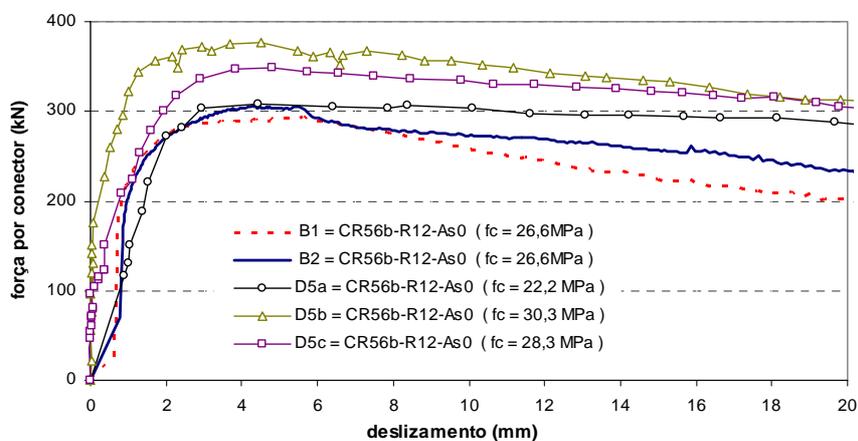


Figura 17 – Influência da altura do conector no comportamento – os modelos da série D possuem conectores CR56b-PL, mais altos que os CR56b da série B.

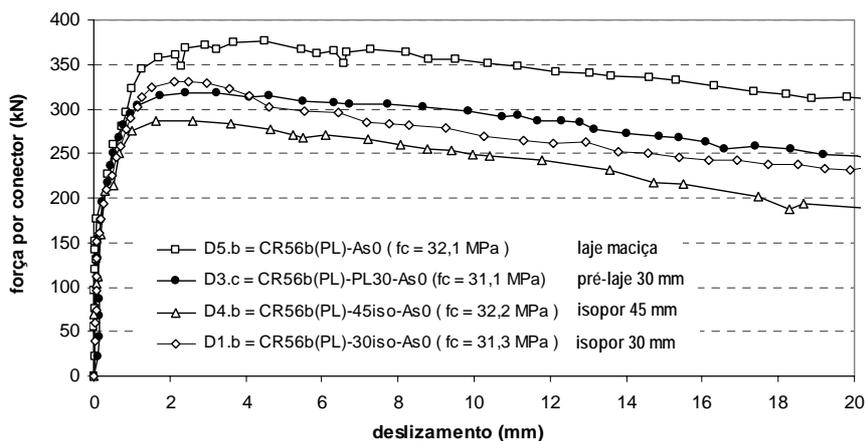


Figura 18 – Curvas força-deslizamento para modelos da série D, com conector CR56b-PL.

modelo	conector	idade dias	$f_{c,cil}$ MPa	$q_{u,test}$ kN	δ_{uk} mm	δ_{uk} médio mm	$q_{u,calc}$ kN Eq. (3)	$\frac{q_{u,test}}{q_{u,calc}}$
série A – conector CRxx								
A1	CR40-R10	34	31,9	316,25	8,19		302,2	1,05
A2	CR50-SF	49	33,0	193,50	9,81		197,5	0,98
A3	CR50-R10	50	33,1	338,35	11,43	10,89	308,7	1,10
A5	CR50-R12	47	32,9	306,65	10,35		307,7	1,00
A4	CR50-R10	42	32,5	372,25	8,10	7,47	358,3	1,04
A6	CR50-R12	44	32,6	369,70	6,84		358,7	1,03
A7	CR60-R10	49	33,0	421,00	9,99	9,36	430,2	0,98
A8	CR60-R15	47	32,9	433,00	8,73		429,6	1,01
série B – conector CR56b com $f_c \approx 25$ MPa								
B1	CR56b-R12	13	26,6	296,2	8,30	8,34	297,5	1,00
B2	CR56b-R12	13	26,6	306,5	8,37		297,5	1,03
B0	CR56b-R12	17	19,5	339,9	5,94		308,1	1,10
B3	CR56b-R12	15	27,2	348,8	4,24	5,62	359,6	0,97
B4	CR56b-R12	14	26,9	375,9	5,92		358,0	1,05
B5	CR56b-R12	21	28,5	378,2	6,48		418,2	0,90
B6	CR56b-R12	9	24,8	371,8	5,54		398,7	0,93
B7	CR56b-SF	20	28,3	183,7	7,02	8,87	177,7	1,03
B8	CR56b-SF	9	24,8	177,6	10,71		167,5	1,06
série C – conector CR56b com $f_c \approx 48$ MPa								
C1	CR56b-R12	17	46,9	361,3	9,67	10,38	393,6	0,92
C2	CR56b-R12	20	48,1	377,5	11,09		398,8	0,95
C3	CR56b-R12	24	49,1	493,7	5,16		462,1	1,07
C4	CR56b-R12	22	48,7	506,7	7,00	6,34	460,3	1,10
C5	CR56b-R12	22	48,7	465,0	7,12		512,2	0,91
C6	CR56b-R12	15	45,9	496,9	6,09		500,1	0,99
C7	CR56b-SF	29	49,7	215,5	9,00	8,66	234,4	0,92
C8	CR56b-SF	26	49,4	217,6	8,31		235,2	0,93
série D – conector CR56b-PL								
D1.a	CR56b-PL30iso-As0	99	31,6	287,1	9,3	7,03	322,8	0,89
D1.b	CR56b-PL30iso-As0	90	31,3	330,9	5,0		321,0	1,03
D1.c	CR56b-PL30iso-As0	90	31,3	320,4	6,8		321,0	1,00
D2.a	CR56b-PL30iso-As8	92	31,4	407,4	8,4	8,37	378,4	1,08
D2.b	CR56b-PL30iso-As8	92	31,4	419,4	8,1		378,4	1,11
D2.c	CR56b-PL30iso-As8	91	31,3	398,1	8,6		378,1	1,05
D3.a	CR56b-PL30-As0	97	31,6	319,6	7,7	10,70	322,8	0,99
D3.b	CR56b-PL30-As0	90	32,4	301,6	13,2		327,0	0,92
D3.c	CR56b-PL30-As0	86	31,1	318,1	11,2		319,9	0,99
D4.a	CR56b-PL45iso-As0	96	32,6	287,4	4,7	6,20	314,9	0,91
D4.b	CR56b-PL45iso-As0	85	32,2	287,4	7,5		313,1	0,92
D4.c	CR56b-PL45iso-As0	85	32,2	299,4	6,4		313,1	0,96
D5.a	CR56b-As0	84	22,2	308,4	20,3	16,40	287,7	1,07
D5.b	CR56b-As0	82	32,1	375,9	12,3		353,6	1,06
D5.c	CR56b-As0	83	31,3	348,9	16,6		348,5	1,00

Tabela 2. Resultados experimentais.

6.3. Aspectos relativos ao comportamento da conexão

No caso do conector Crestbond, a ductilidade da conexão está associada ao sistema conector, armadura e concreto, e não apenas ao conector isolado. A altura do conector tem influência direta na parcela correspondente à resistência frontal, na resistência dos pinos de concreto e na fissuração do concreto no entorno dos furos. Ao mesmo tempo, o efeito de pino e a própria fissuração da laje dependem da resistência do concreto. Além disso, a espessura da laje, a taxa de armadura e a disposição das barras de aço transversais ao conector influenciam na capacidade última e na ductilidade da conexão.

A resistência última decorre de quatro fenômenos observados: a resistência frontal do conector, o cisalhamento dos pinos de concreto nas aberturas do conector, o cisalhamento longitudinal da laje na linha do conector e o efeito da armadura.

Nas Figuras 13, 14 e 15, pode-se verificar que os pinos de concreto proporcionam um acréscimo de resistência considerável em relação à chapa plana sem dentes.

A utilização de barras de armadura passando por dentro das aberturas do conector também resulta em acréscimo de resistência. Esse efeito é proporcional à resistência do concreto; quanto maior a resistência do concreto, melhor o desempenho da armadura (Figuras 13 a 15 e Tabela 3).

série	conector	f_c médio MPa	carga máxima medida no ensaio		acrécimo de resistência devido à armadura passante
			sem armadura passante	com armadura passante	
A	CRxx	32,7	322 kN	371 kN	+15%
B	CR56b	26,7	302 kN	375 kN	+24%
C	CR56b	48,3	369 kN	499 kN	+35%
D	CR56b-PL	31,7	313 kN	408 kN	+30%

Tabela 3. Efeito da armadura dentro dos dentes do conector Crestbond.

Ao comparar os resultados das séries B e C com os resultados da série A, constatou-se que o conector reforçado (CR56b) não promoveu acréscimo na resistência última, em relação ao CR50 original (ver Figura 16). Isso indica que em ambos os casos é o colapso do concreto que determina a resistência última da conexão. As únicas modificações relevantes observadas com o conector reforçado são o aumento do limite de proporcionalidade e uma diminuição da ductilidade da conexão. Ficou comprovado que, em termos de capacidade, tanto a versão original (CR50) como a versão reforçada (CR56b) exibem o mesmo comportamento e podem ser tratadas praticamente da mesma forma (ver item 7). As deformações observadas nos dentes dos CRxx da série A influenciam na ductilidade da conexão, mas não prejudicam a resistência do concreto. A deformação dos dentes dos conectores da série A é responsável pela diminuição da rigidez acima do limite de proporcionalidade e contribui para uma maior ductilidade da conexão (Figura 13). Nas séries B e C esse efeito é menor porque o conector é mais rígido (Figuras

14 e 15). Entretanto, para a série C, em que a resistência do concreto é maior, a ductilidade da conexão aumenta. Isso se deve a dois fatores: deformação do dente frontal sob a pressão do concreto e melhor desempenho da armadura.

Na série D, os conectores possuíam excentricidade menor em relação ao plano médio da laje do que nas outras séries (Figura 11), permitindo melhor distribuição dos esforços na laje, e o aço do conector possuía limite de escoamento na faixa de 436 MPa (Tabela 1). Esses dois fatores contribuíram para uma maior rigidez inicial dos modelos, bem como para um acréscimo na resistência última. Na Figura 17 são comparados os resultados de modelos das séries B e D com laje maciça e sem armadura passante, para a mesma faixa de resistência do concreto. Fica evidente o melhor desempenho do conector CR56b-PL em relação ao CR56b. A diferença principal entre eles é a altura do conector, que implica numa maior resistência frontal e menor excentricidade em relação ao plano médio da laje. De um modo geral, o limite de proporcionalidade na conexão com Crestbond é bastante alto, oscilando numa faixa que vai de 70 a 95% da carga última.

6.4. Desempenho dos modelos com pré-laje de concreto pré-fabricada

Nos grupos D1 e D4, foi utilizada uma placa de ISOPOR no lugar da pré-laje, para simular a pior situação possível, que ocorre quando a pré-laje não contribui de forma alguma para a capacidade da conexão. Nos modelos do grupo D3, com pré-laje real de concreto, admitiu-se a pré-laje encostada no conector, o que raramente ocorre na prática, de forma que não há espaço entre a pré-laje e o conector a ser preenchido pelo concreto. Dessa forma, ficou caracterizado que na faixa correspondente à espessura da pré-laje não haveria qualquer influência do concreto da capa.

Se a aderência entre a pré-laje e o concreto da capa fosse perfeita, o sistema tenderia a se comportar como o modelo com laje maciça. Entretanto, observou-se após os ensaios que os modelos com pré-laje se comportaram de modo quase idêntico aos modelos com ISOPOR. Esse resultado indica que a aderência entre pré-laje e capa não é suficiente para proporcionar uma contribuição efetiva da pré-laje na capacidade do sistema. Presume-se que esse comportamento ocorreu devido ao fato das pré-lajes não terem sido armadas.

Na Figura 18, pode-se observar o comportamento da pré-laje e sua influência no sistema. As resistências obtidas para os modelos com pré-laje ficaram bem próximas dos valores para os modelos com ISOPOR, e inferiores aos resultados para modelos com laje maciça. Isso indica que a aderência entre a pré-laje e a laje não foi suficiente para garantir uma solidarização tal que influenciasse significativamente na capacidade última do sistema. A média da resistência última dos três modelos do grupo D5 (com laje maciça) foi de 362,4 kN. A resistência média dos 3 modelos com pré-laje de 30 mm foi de 313,1 kN, enquanto a média dos 3 modelos com ISOPOR de 30 mm foi de 312,8 kN, praticamente o mesmo valor.

Como era esperado, os modelos com ISOPOR de 45 mm apresentaram uma resistência média (291,4 kN) inferior à dos modelos com ISOPOR de 30 mm. A espessura da placa de ISOPOR é deduzida da área frontal do conector (comprimida contra o concreto), bem como da área de concreto ao cisalhamento, que também contribui para a capacidade última da conexão.

No tocante à ductilidade, os modelos com pré-laje apresentaram um comportamento

intermediário entre os modelos com ISOPOR e os com laje maciça, como pode ser verificado observando-se os deslizamentos médios na Tabela 2.

As rigidezes, tanto no estado de serviço quanto na fase pós-pico são muito similares, indicando que a presença ou a ausência da pré-laje não têm influência importante nesse quesito (Figura 18).

7. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Oguejiofor e Hosain [9][10] propuseram a Equação (1) para o cálculo da resistência do Perfobond,

$$q = B_1 h_{sc} t_{sc} f_c + (B_2 A_{cd} + B_3 A_{cc}) \sqrt{f_c} + B_4 A_{tr} f_{yr} \quad (1)$$

onde f_c é a resistência à compressão do concreto tomada em corpo de prova cilíndrico (MPa)

A_{cd} é a área ao cisalhamento dos pinos de concreto (mm^2)

A_{cc} é a área de concreto ao cisalhamento por conector (a área longitudinal da laje menos a área do conector em mm^2): $A_{cc} = L_c(t_c - t_{PL}) - L_{sc}(h_{sc} - t_{PL})$

A_{tr} é a área total de armadura transversal (mm^2) no entorno de um conector, (incluindo tanto as barras que passam por dentro do conector como as que passam por fora dele)

f_{yr} é a resistência ao escoamento do aço da armadura (MPa)

Na Eq. (1), o primeiro termo corresponde à força de compressão que o concreto exerce na face frontal do conector; o segundo, ao efeito dos pinos de concreto dentro dos furos; o terceiro, à resistência da laje ao cisalhamento; e o quarto, à influência da armadura.

Considerando que os mecanismos de colapso são muito similares aos que ocorrem com a conexão com Perfobond, partiu-se da mesma abordagem. Contudo os resultados experimentais desta investigação indicaram que:

- considerar a taxa de armadura, ao invés da quantidade de armadura, conduz a resultados melhores para a predição da resistência última;
- desprezar a contribuição da pré-laje conduz a um ajuste melhor do modelo;
- a excentricidade do conector em relação à espessura da laje pode ser introduzida no modelo analítico multiplicando-se a força frontal (F_f) pela relação entre a altura do conector e a espessura total da laje (h_{sc}/t_c).

Considerando as observações supracitadas, são introduzidas modificações na Eq. (1), chegando-se ao modelo da Eq. (2).

$$q = B_1 \frac{h_{sc}}{t_c} (h_{sc} - t_{PL}) t_{sc} f_c + B_2 n D^2 \sqrt{f_c} + B_3 A_{cc} \sqrt{f_c} + B_4 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (2)$$

O segundo termo na Eq. (2) refere-se à contribuição dos pinos de concreto na resistência da conexão. O modo de ruptura observado sugere que os pinos de concreto rompem em dois planos de corte. Portanto, a área total dos pinos de concreto deveria ser $2n\pi D^2/4$, onde D é o diâmetro de referência para os dentes trapezoidais e n é o número de aberturas do conector. Por praticidade, o termo referente à contribuição dos pinos foi reescrito na forma $B_2 n D^2 \sqrt{f_c}$, expressando A_{cd} em função do número de pinos e do diâmetro de referência.

Uma análise de regressão múltipla dos dados das Tabelas 1 e 2 fornece os coeficientes B_i , que compõem a Eq. (3), com um R^2 ajustado igual a 0,995.

$$q = 2,94 \frac{h_{sc}}{t_c} (h_{sc} - t_{PL}) t_{sc} f_c + 2,57 n D^2 \sqrt{f_c} + 0,22 A_{cc} \sqrt{f_c} + 8 \times 10^6 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right) \quad (3)$$

Na Figura 19 e na Tabela 2 são apresentados os resultados da regressão múltipla comparados com os resultados dos ensaios. Os dados calculados apresentam boa concordância com os resultados experimentais.

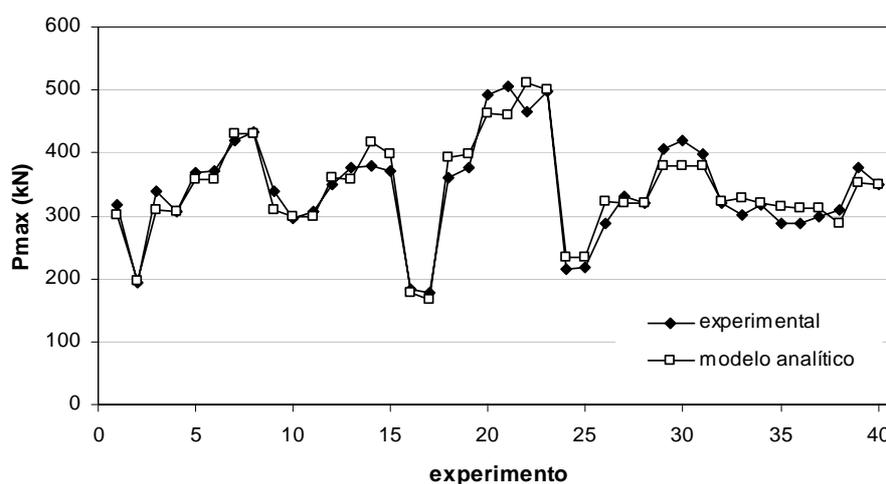


Figura 19 – Comparação entre o modelo analítico (Eq. 3) e os dados experimentais.

Como pode ser observado, o modelo da Eq. (3) é capaz de prever a resistência tanto do conector CRxx original, como do CR56b (que tem dentes reforçados, em relação ao CRxx) e do CR56b-PL para uso com pré-laje. Essa particularidade demonstra que:

- embora os conectores CRxx originais utilizados na série A tenham sofrido colapso durante o ensaio, esse fenômeno não chega a comprometer a capacidade da conexão, de modo que o comportamento se assemelha consideravelmente ao do CR56b (ver Figura 16);
- o modelo analítico proposto é adequado para simular o comportamento considerando as variações na geometria do conector e da laje, associadas a diferentes valores da resistência do concreto e da taxa de armadura.

A Eq. (3) é válida para conectores Crestbond atendendo-se aos seguintes requisitos:

- dentes referidos a diâmetros na faixa entre $40 \text{ mm} \leq D \leq 60 \text{ mm}$;
- chapa com espessura na faixa entre $12 \text{ mm} \leq t_{sc} \leq 13 \text{ mm}$;
- aços com $f_y \geq 350$;
- concretos com resistência à compressão na faixa $20 \text{ MPa} \leq f_c \leq 50 \text{ MPa}$;
- a pré-laje, se houver, deve ter espessura de no máximo 45 mm.

8. CONCLUSÕES

- Apresenta-se um novo conector de cisalhamento, denominado Crestbond, constituído por uma chapa plana de aço com dentes trapezoidais de cantos arredondados.
- Um total de 40 ensaios tipo *push-out* demonstrou que o conector em questão apresenta comportamento estrutural adequado, caracterizado por alta rigidez para cargas de serviço e grande ductilidade em estado limite último.
- A relação entre a altura total do conector e a espessura da laje, que determina a excentricidade da resultante de compressão frontal no conector, tem influência importante no desempenho da conexão. Quanto menor essa excentricidade, melhor o desempenho do conector.
- A armadura tem uma influência muito importante na capacidade da conexão, tanto quanto à resistência última como à ductilidade.
- O efeito de pino no concreto responde por cerca de 1/3 da capacidade da conexão, sendo, portanto, um fator de grande importância que deve ser cuidadosamente considerado.
- Propôs-se uma equação para o cálculo da resistência do conector Crestbond, que incorpora aspectos adicionais em relação ao modelo proposto por Oguejiofor para o Perfobond, a saber: a excentricidade do conector, o efeito da pré-laje e a taxa de armadura. A equação apresenta boa concordância com os resultados experimentais.
- Os conectores Crestbond apresentam várias 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, o Crestbond propicia resistência similar à obtida com grupos de *studs*.
- Em relação ao Perfobond, o Crestbond apresenta como vantagens os furos abertos, que facilitam a disposição das barras de armadura e deslizamento característico médio superior a 6,0 mm, podendo ser classificado como um conector dúctil segundo a EN 1994-1-1:2004

9. AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- [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] VERÍSSIMO, G. S.; VALENTE, M. I. B.; PAES, J. L. R.; CRUZ, P. J. S.; FAKURY, R. H. Design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures, IABMAS'06 Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto, Portugal.
- [8] EUROCODE 4, EN 1994-1-1:2004: Design of composite steel and concrete structures. European Committee for Standardisation (CEN), 2004.
- [9] OGUEJIOFOR, E. C.; HOSAIN, M. U.: A parametric study of perfobond rib shear connectors, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21, pp. 614-625, 1994.
- [10] OGUEJIOFOR, E. C.; HOSAIN, M. U.: Numerical analysis of push-out specimens with Perfobond rib connectors, *Computer and Structures*, Vol. 62, No. 4, p.617-624, 1997.