



IX CONGRESSO DE
Construção Metálica
e Mista & I CONGRESSO
LUSO-BRASILEIRO DE
Construção Metálica Sustentável

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA UTILIZAÇÃO DE CONECTORES INDENTADOS EM ELEMENTOS MISTOS EM AÇO E BETÃO LEVE

Isabel B. Valente^{a,*}, Veronique S. Ramos^b, Gustavo S. Veríssimo^c

^{a,b} *ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho*

^c *Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal de Viçosa, Brasil*

* Autor para contacto. Tel.: +351 253 510 203; Fax: +351 253 510 217;
E-mail: isabelv@civil.uminho.pt

Resumo. Neste trabalho, apresenta-se um estudo onde se avalia experimentalmente o comportamento do conector Crestbond inserido em lajes maciças de betão leve estrutural. Os resultados obtidos são comparados com outros resultados obtidos anteriormente com betão de massa volúmica normal. Para tal, são realizados ensaios de tipo *push-out*, conforme os procedimentos descritos na NP 1994-1-1 [1] e a montagem já utilizada em ensaios anteriormente realizados [2].

1. Introdução

As vigas mistas em aço e betão são cada vez mais utilizadas em edifícios, pois proporcionam um aumento significativo dos vãos livres e a colocação de um menor número de pilares do que numa solução tradicional, e em pontes, onde as soluções de tabuleiro misto são económica e construtivamente muito competitivas.

Uma viga mista é constituída por uma laje de betão armado e um perfil metálico que funcionam em conjunto devido à existência de conectores que garantem a ligação entre essas duas secções. Os conectores são elementos metálicos que são soldados ao perfil metálico e posteriormente ficam embebidos na laje, após betonagem e endurecimento do betão. A sua principal função é a de transmitir as forças longitudinais de corte que se geram entre as secções de betão e de aço, quando a viga é submetida a flexão. Para além das forças de corte longitudinal, existem também forças transversais ao plano da laje, que podem causar a separação vertical entre a laje de betão e o perfil metálico (efeito de *uplift*). Os conectores metálicos também impedem esta separação vertical.

Pretende-se realizar um estudo que permita avaliar o comportamento de um conector metálico recentemente desenvolvido, o conector *Crestbond*. Estudos anteriormente realizados [3] mostram que este conector apresenta elevada capacidade resistente, comportamento dúctil e capacidade para garantir o funcionamento misto pretendido. A sua geometria consiste numa chapa lisa, perfurada, que é soldada à viga metálica e fica embebida na laje, após colocação e endurecimento do betão (Fig. 1). O conector *Crestbond* apresenta as seguintes vantagens: 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. Os furos abertos do *Crestbond* facilitam a disposição de armadura transversal.

Assim, são realizados ensaios experimentais de tipo *push-out* para avaliação do comportamento do conector *Crestbond* inserido em lajes maciças de betão leve de elevada resistência, tendo por base os procedimentos de ensaio descritos na NP 1994-1-1 [1] e a montagem já utilizada em ensaios anteriormente realizados [2]. Os resultados obtidos servem para avaliar o comportamento do conector *Crestbond* quando inserido em lajes maciças de betão leve estrutural e podem ser comparados com outros resultados obtidos em trabalhos experimentais anteriormente realizados que utilizaram betão de massa volúmica normal [2,3].

O betão leve é, em geral, produzido para ser utilizado quer como betão estrutural, quer como isolamento. Quando utilizado como betão estrutural são propriedades decisivas a capacidade resistente e o módulo de elasticidade. Os betões leves apresentam características que tornam a sua utilização particularmente interessante, entre as quais: a redução de peso, a melhoria de algumas propriedades físicas e a maior durabilidade [4].

2. Betão leve

2.1 Composição

As propriedades dos agregados leves podem diferir significativamente umas das outras, dependendo sobretudo do material no seu estado natural e do processo de produção. A principal influência das propriedades dos agregados leves no betão leve deve-se ao facto de estes corresponderem a valores superiores a 50% do volume do betão. Podem ser apontadas a trabalhabilidade, resistência, módulo de elasticidade, densidade e durabilidade, como algumas das principais propriedades que são influenciadas, [4].

Os componentes utilizados na mistura estudada são: agregado leve – argila expandida do tipo LECA HD, areia natural, cimento CEM I 42.5 R, água e superplastificante do tipo Glenium Sky 617[®].

A composição do betão leve utilizado no fabrico dos provetes é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição do betão leve

		Quantidade
LECA HD [®] (argila expandida)	(kg/m ³)	527.9
Areia natural	(kg/m ³)	514.4
Cimento CEM I 42.5 R	(kg/m ³)	450
Água	(l/m ³)	151.4
Superplastificante Glenium Sky 617 [®]	(kg/m ³)	6
Relação A/L		0.37

2.2 Resistência à compressão e Módulo de elasticidade

Os provetes testados foram realizados com o betão leve previamente estudado. Foram realizadas quatro amassaduras e em cada uma delas onde foram betonadas as lajes dos provetes de tipo *push-out* e também provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

Os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade apresentados na Tabela 2 foram determinados nos provetes cilíndricos, para todas as betonagens, à data do respectivo ensaio de tipo *push-out*. Tal como seria de esperar, as propriedades deste betão não são exactamente iguais para todas elas. Apesar disso, considera-se que as pequenas diferenças encontradas não são relevantes.

Tabela 2: Propriedades do betão leve utilizado nos provetes de tipo *push-out*

Betão leve	Provetes	Data de betonagem	Data de ensaio	f_{icm} (MPa)	E_{icm} (GPa)
BL1	BL1_D6_1	09/07/2012	03/12/2012	30.30	16.92
BL2	BL2_D6_2	22/01/2013	28/02/2013	30.29	20.42
BL3	BL3_D10_1	10/10/2012	12/12/2012	25.96	20.14
BL4	BL4_D10_2	23/01/2013	02/03/2013	29.32	20.88

3. Produção de provetes

3.1 Configuração do conector

O conector *Crestbond* (Fig. 1.a) 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 (efeito de *uplift*). O conector é soldado ao perfil metálico na sua direcção longitudinal e fica inserida na laje de betão. Durante a betonagem, as aberturas são preenchidas, formando pinos que conferem resistência ao corte horizontal e previnem a separação vertical entre a viga metálica e a laje de betão (Fig. 1.b). O betão posicionado 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 dos pinos virtuais é bastante significativa.

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 [3]. 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.

3.2 Disposição e montagem das armaduras

A preparação dos provetes começa com a montagem das armaduras. Em todos os provetes utilizados, as lajes possuem armadura transversal, havendo barras transversais que passam

entre os dentes do conector, como se mostra na Fig. 1.b. Esta armadura é designada como armadura passante.

Utilizam-se duas camadas de armadura, tanto na direção vertical com na direção horizontal. Nos provetes com armadura de 10 mm de diâmetro, colocam-se 5 varões em cada camada de armadura horizontal e nos provetes com armadura de 6 mm de diâmetro, colocam-se 6 varões em cada camada de armadura horizontal. Em todos os provetes colocam-se 4 varões do respetivo diâmetro em cada camada de armadura vertical. Utilizam-se armaduras do tipo A500. A armadura colocada na direção horizontal fica posicionada exteriormente à armadura colocada na direção vertical. A armadura horizontal tem um recobrimento de 25 mm e a armadura vertical fica logo encostada e amarrada à armadura horizontal.

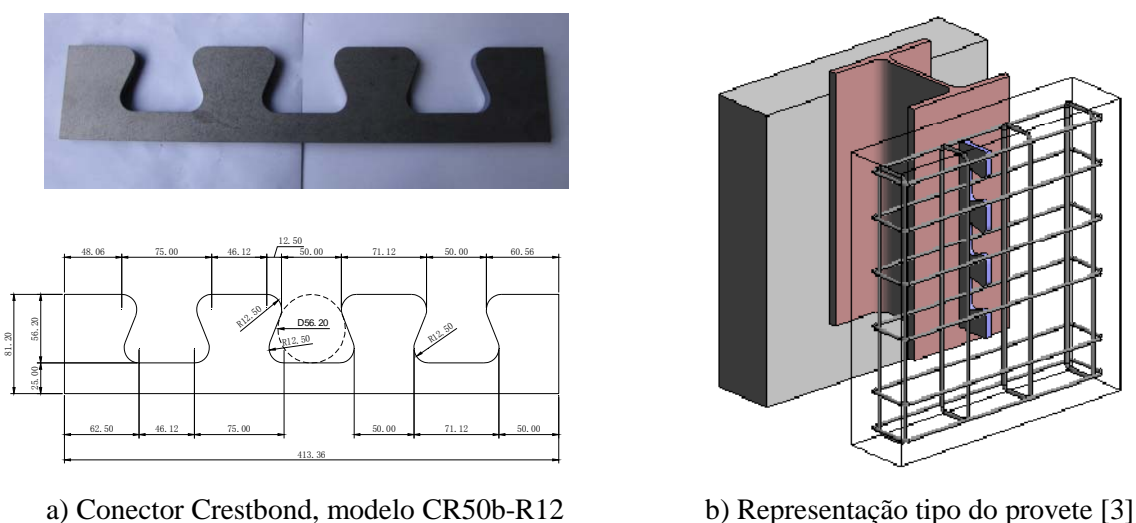


Fig. 1: Conector Crestbond, modelo CR50b-R12

As armaduras são montadas da seguinte forma:

- atam-se os varões de armadura vertical e horizontal, dois a dois, respetivamente;
- marcam-se as medidas dos pontos onde atar, em cada um dos conjuntos de dois varões;
- juntam-se e atam-se com arame as armaduras horizontais e verticais e monta-se a “gaiola”, conforme está representado na Figura 2.

3.3 Cofragem

Para betonar cada um dos provetes, são utilizadas duas caixas de cofragem, uma para cada laje. Em cada caixa existe uma abertura, posicionada numa das faces, que permite encaixar o perfil metálico, conforme representado na Fig. 2.a.

Para além das duas caixas, utilizam-se barrotes com arruelas e porcas que acoplam e sustêm todos os elementos que constituem o provete e posicionam o perfil metálico á face de cada uma das caixas, durante a betonagem. Deste modo, é possível garantir que a geometria do provete corresponde à que foi inicialmente definida, conforme se mostra na Fig. 2.b e Fig. 2.c.

Todas as betonagens são realizadas em laboratório, devido á especificidade do fabrico do betão leve utilizado, que é difícil de obter em central.

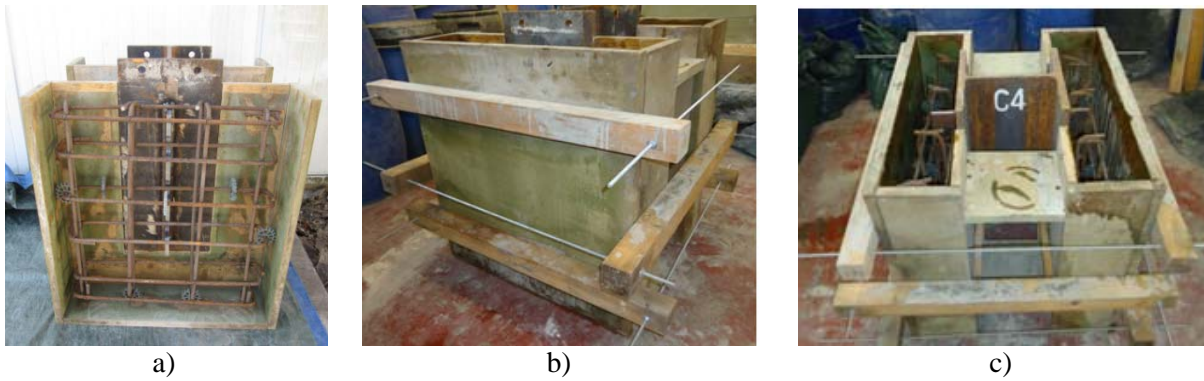


Fig. 2: Cofragens

3.4 Betonagem e descofragem

O primeiro passo para o fabrico de betão leve consiste na adição da areia e do agregado leve, que devem ser bem misturados até ser obtido um aspecto homogéneo. Para tal contribui a adição de uma parte da água de amassadura, já que se os agregados estiverem completamente secos, a argila expandida terá tendência a sobrepor-se aos grãos de areia. Esta adição tem ainda a vantagem de permitir à argila expandida absorver alguma água, pois trata-se de um agregado com elevada porosidade. A energia utilizada na realização da amassadura depende do equipamento utilizado. Algumas máquinas possuem uma energia excessiva para o tipo de agregado em causa, podendo provocar o seu esmagamento, o que deve ser evitado, sob pena de se alterarem as propriedades resistentes deste material. Para evitar o seu esmagamento, durante a betonagem desliga-se a máquina, fazendo a mistura manualmente com utensílios próprios, como a “colher” de modo a que o agregado leve se misture bem os restantes constituintes. O passo seguinte consiste na adição do cimento. Juntamente, é adicionada a maior parte da água, devendo resultar na completa hidratação do cimento. Junta-se o superplastificante, cuja utilização tem dois objectivos: a redução da água utilizada na amassadura e o aumento da trabalhabilidade. Cerca de 20% da quantidade total de água é adicionada à mistura com o superplastificante nesta fase final.

Os provetes são descofrados entre 2 a 3 dias após a respetiva betonagem e são mantidos no local da betonagem até atingirem 28 dias (Fig. 3). A descofragem é um processo relativamente simples, uma vez que a cofragem pode ser toda desaparafusada. Após os 28 dias, são transportados até à zona do laboratório onde se encontra o pórtico de ensaio.

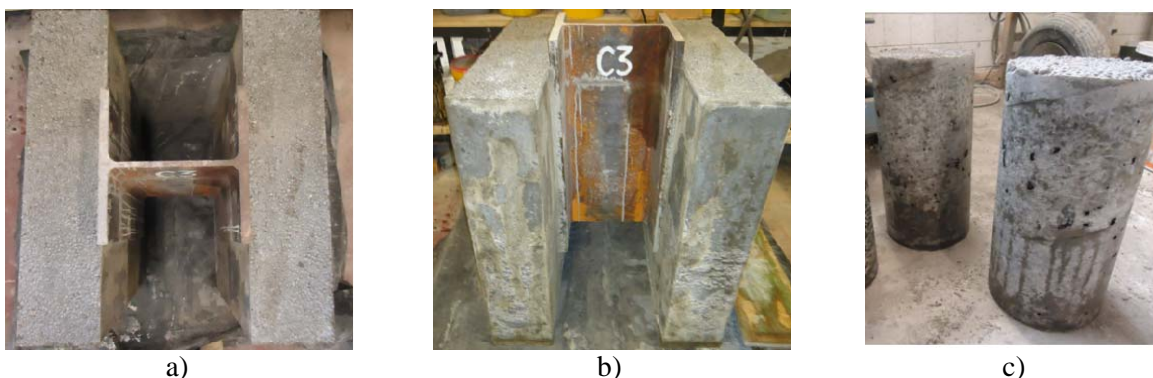


Fig. 3: Provetes e cilindros descofrados

4. Ensaio de tipo *push-out*

4.1 Preparação do ensaio

O comportamento de uma ligação aço-betão em vigas mistas pode ser simulado através de um ensaio de tipo *push-out*, através do qual é possível efectuar uma análise rigorosa do comportamento da conexão e dos mecanismos de rotura associados ao betão e aos conectores. Uma grande vantagem deste ensaio é a de que os esforços instalados nos conectores resultam directamente das forças introduzidas pelo actuador, sendo possível a medição do escorregamento entre a laje de betão e o perfil metálico. Assim, os resultados são obtidos de forma directa. De acordo com as disposições referidas na NP EN 1994-1-1 [1], a configuração dos provetes neste tipo de ensaio corresponde a duas lajes de betão armado posicionadas verticalmente e ligadas aos banzos de um perfil metálico através de conectores metálicos. Já que se trata de um ensaio com simetria, a ligação é submetida a uma carga vertical, produzindo-se um esforço de corte ao longo da interface entre a laje de betão e o perfil metálico, em ambos os lados do provete (Fig. 4.a). Seguem-se as disposições definidas na NP EN 1994-1-1 [1] para ensaios de conexão. Nos ensaios realizados, a geometria do conector é constante (ver Fig. 1). As dimensões das lajes de betão correspondem a $650 \times 600 \times 150 \text{ mm}^2$.

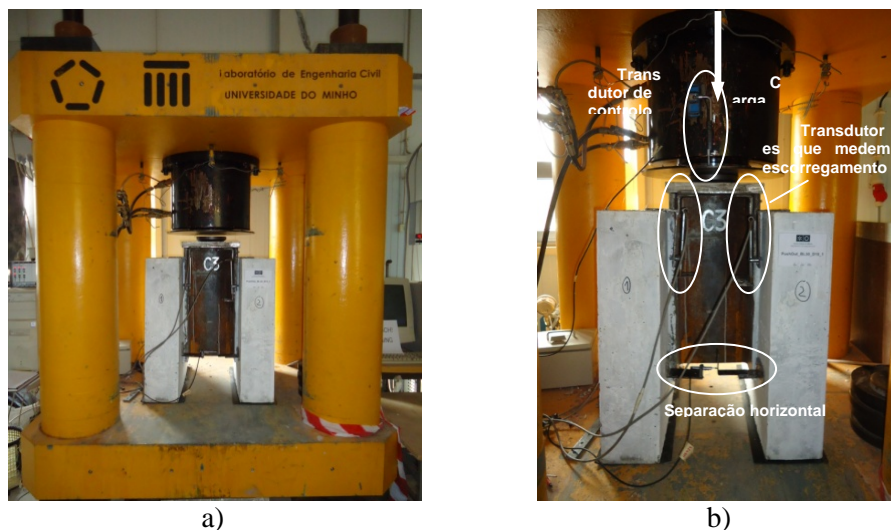


Fig. 4: Estrutura de reacção e instrumentação para o ensaio de tipo *push-out*

O equipamento utilizado para a realização de ensaios de tipo *push-out* encontra-se no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho. Este é composto por um actuador hidráulico com capacidade de 5000 kN e curso de 80 mm, montado no interior de um pórtico de ensaio. Todo o circuito hidráulico é controlado por um software e um sistema eletrónico.

O pórtico de ensaio é constituído por duas placas maciças de aço estrutural, cada uma delas com 200 mm de espessura, separadas por quatro colunas tubulares com 275 mm de diâmetro, 25 mm de espessura e 1150 mm de altura. A ligação entre os cilindros e as chapas metálicas é pré-esforçada, garantindo que o pórtico funciona como uma estrutura de reacção. O actuador possui duas células de pressão internas e dois transdutores de deslocamento internos, possibilitando ensaios com controle de força ou de deslocamento.

Após colocar o provete no pórtico procede-se á sua preparação para o ensaio. Com o intuito de reduzir algumas imperfeições nas bases das lajes, são colocadas folhas de neoprene na base dos provetes. Sobre o provete é colocada uma chapa grossa de aço com uma

concauidade na qual se assenta uma rótula. A superfície em contato entre a rótula e a chapa é lubrificada de forma que as duas permitam ajustes entre o atuador e o provete.

De seguida, dispõem-se transdutores de deslocamento. Em cada uma das lajes, e em cada lado do provete são colocados transdutores para medir o escorregamento entre a laje e o perfil metálico (Fig. 4.b). Coloca-se também um transdutor para medir o deslocamento horizontal entre as lajes de betão, conforme a Fig. 4.b apresenta.

4.2 Procedimentos de ensaio

Para dar início ao ensaio, define-se um algoritmo composto por cinco fases distintas, como é representado esquematicamente na Fig. 5. O software utilizado permite programar a aplicação do sequencial do carregamento de acordo com as várias fases definidas.

Numa primeira fase do ensaio é aplicada uma pré-carga de 30 kN. A seguir, são realizados 25 ciclos de carga e descarga entre patamares de 5 e 30% do valor da carga de rotura esperada (neste caso, considerou-se o intervalo entre 30 e 150 kN para todos os provetes testados). Esta fase tem uma duração aproximada de 25 minutos. De seguida, o ensaio passa a ser controlado pelo deslocamento do atuador, de acordo com as velocidades definidas na Fig. 5. O ensaio prossegue pelo menos até que a carga aplicada seja inferior a 80% da carga máxima. Em todos os provetes a duração total dos ensaios correspondeu a cerca de 2h.

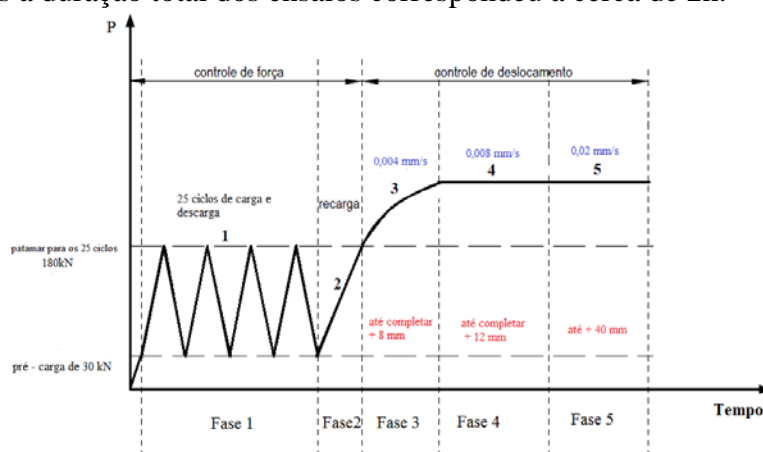


Fig. 5: Sequência de procedimentos no ensaio de tipo *Push-out*

4.3 Evolução da fendilhação e modos de rotura

Durante a realização dos quatro ensaios, verificou-se que todos os provetes se comportaram de forma bastante similar. As primeiras fendas deram-se na parte de baixo do provete, no lado interior, por volta dos 600 kN (valor de carga total). Ao longo do ensaio, com o aumento da carga, apareceram mais fendas na mesma zona (Fig. 6.a).

Com o aumento da carga, apareceram também fendas nas faces das lajes, com um orientação vertical e crescimento da base para o topo do provete (Fig. 6.b). Apareceram também fendas nas frentes das lajes (Fig. 6.c) e nas faces interiores do provete (Fig. 6.d). Estas fendas foram mais pronunciadas e numerosas nos provetes com armaduras de 10 mm de diâmetro. Ao longo dos ensaios, observa-se um progressivo dano nas lajes de betão. Os conectores e os respectivos cordões de soldadura permanecem quase intactos no final de cada ensaio. À medida que o carregamento é incrementado, a fenda vertical que se gera zona abaixo do conector propaga-se pela laje até ao topo da laje (Fig. 6.b). Quando a fenda se aproxima do topo da laje, o provete atinge a carga máxima.

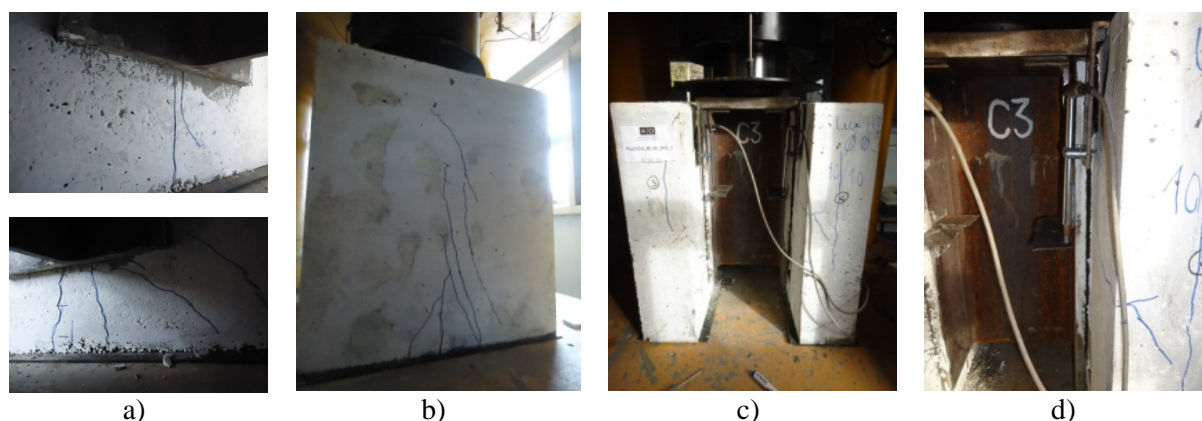


Fig. 6: Evolução da fendilhação nas lajes de betão

4.4 Resultados

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios realizados, em termos de valores máximos (P_{max}) e característicos (P_k) da capacidade de carga e do escorregamento último (s_u). Apresentam-se ainda os valores de resistência à compressão obtidos em provetes cilíndricos de betão, testados à data do respectivo ensaio.

Os conectores utilizados foram fabricados com chapas de 12 mm de espessura e aço S 235 JR ($f_y = 302$ MPa – valor testado experimentalmente). Para as armaduras foi utilizado aço S500 ($f_y = 500$ MPa – valor nominal).

Tabela 3: Resultados obtidos com *Crestbond* em lajes maciças de betão leve

Provete	Conector		Betão		Armadura		P_{max} kN	P_{Rk} kN	s_u mm
	Geometria do conector	idade dias	f_{cm} N/mm ²	Φ mm	A_{tr} mm ²	f_y N/mm ²			
BL1_D6_1	CR50b-R12	147	30.30	6	339.29	500	368.1	331.2	9.15
BL2_D6_2	CR50b-R12	37	30.29	6	339.29	500	373.1	335.8	7.88
BL3_D10_1	CR50b-R12	63	25.96	10	785.40	500	423.2	380.8	10.81
BL4_D10_2	CR50b-R12	38	29.32	10	785.40	500	456.1	410.4	11.70

f_{cm} – valor médio da resistência à compressão do betão, à data de ensaio

Φ – diâmetro dos varões utilizados no provete

A_{tr} – área total de armadura transversal existente em cada laje

P_{max} – força máxima, por conector, obtida no decorrer do ensaio de tipo *push-out*

P_k – força característica (= $0.9P_{max}$), por conector, obtida no decorrer do ensaio

s_u – escorregamento correspondente ao valor de P_k

Na Fig. 7 pode-se observar a evolução relação força-escorregamento para o provete BL1_D6_1. Verifica-se que o conector *Crestbond* inserido em lajes de betão leve apresenta elevada capacidade resistente e elevada ductilidade, pois após atingir a carga máxima sofre uma perda de carga muito gradual, acompanhada de elevados valores de escorregamento. O valor de escorregamento último, s_u , é obtido na interseção da curva força-escorregamento com a reta P_k . Em qualquer dos provetes testados, este valor é elevado, garantindo que a conexão é dúctil (Tabela 3). Na Tabela 3 verifica-se ainda que um aumento da área de armadura transversal incrementa a capacidade resistente da conexão, comprovando-se a importância da presença e da quantidade de armadura transversal.

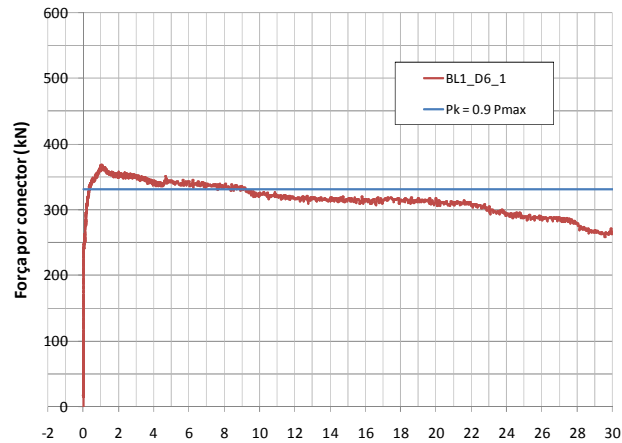


Fig. 7: Evolução da força aplicada e do escorregamento durante o ensaio

5. Comparação de resultados

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos ensaios anteriormente realizados com conector *Crestbond* inserido em lajes de betão com massa volúmica normal [2].

Os conectores utilizados nas séries B e C foram fabricados com chapas de 12 mm de espessura e aço S 275 JR ($f_y = 324$ MPa). Para as armaduras foi utilizado aço S500 ($f_y = 500$ MPa). As séries B e C foram confeccionadas com betões C20/25 e C35/45, respectivamente.

Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados em termos de valor característico da capacidade de carga e de escorregamento último.

Tabela 4: Resultados obtidos com *Crestbond* em lajes maciças de betão com massa volúmica normal

Provete	Conector Geometria do conector	Betão		Armadura			P_{max} kN	P_{RK} kN	s_u mm
		idade dias	f_{cm} N/mm ²	Φ mm	A_{tr} mm ²	f_y N/mm ²			
B1	CR50b-R12	13	26.6	-	471.24	500	296.2	266.6	9.22
B2	CR50b-R12	13	26.6	-	471.24	500	306.4	275.8	9.30
B3	CR50b-R12	15	27.2	10	942.48	500	348.8	313.9	4.71
B4	CR50b-R12	14	26.9	10	942.48	500	375.9	338.3	6.58
B5	CR50b-R12	21	28.5	12	1357.17	500	378.2	340.3	7.20
B6	CR50b-R12	9	24.8	12	1357.17	500	371.8	334.6	6.15
C1	CR50b-R12	17	46.9	-	471.24	500	361.3	325.2	10.74
C2	CR50b-R12	20	48.1	-	471.24	500	377.5	339.8	12.32
C3	CR50b-R12	24	49.1	10	942.48	500	493.7	444.3	5.73
C4	CR50b-R12	22	48.7	10	942.48	500	506.7	456.0	7.78
C5	CR50b-R12	22	48.7	12	1357.17	500	465.0	418.5	7.91
C6	CR50b-R12	15	45.9	12	1357.17	500	496.9	447.2	6.77

Na Fig. 8.a representam-se os valores de carga máxima obtidos nos vários ensaios. Verifica-se os provetes fabricados com betão leve apresentam uma capacidade resistente muito similar à dos provetes realizados com betão de massa volúmica normal com quantidade de armadura transversal similar. Os resultados obtidos nos provetes de betão leve (série BL) são próximos dos resultados obtidos na série C, onde o betão apresentava resistência à

compressão bastante superior. Na Fig. 8.b representam-se os valores de escorregamento último obtidos nos vários ensaios. Verifica-se que os provetes fabricados com betão leve apresentam valores de escorregamento último da mesma ordem de grandeza dos que foram medidos em provetes realizados com betão de massa volúmica normal e com quantidade similar de armadura transversal. Os valores de escorregamento medidos nos provetes testados com betão leve permitem considerar que a conexão é dúctil.

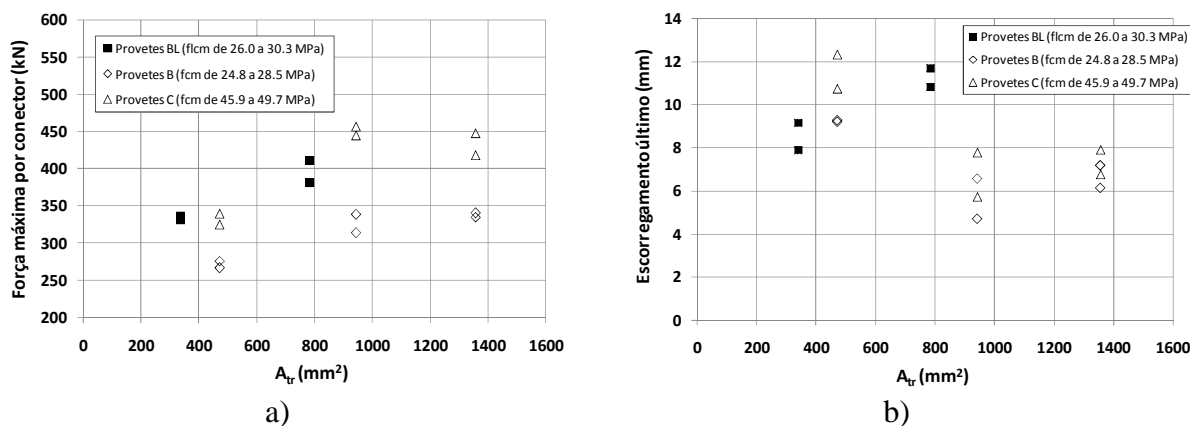


Fig. 8: Força máxima aplicada nos ensaios e escorregamento último, em função da área total de armadura transversal e do tipo de betão

6. Conclusões

Realizaram-se ensaios de tipo *push-out* para avaliar o comportamento do conector *Crestbond* inserido em lajes maciças de betão leve. Os ensaios realizados permitiram verificar que a capacidade de carga deste conector não se reduz quando se usa betão leve em substituição de betão de massa volúmica normal. Do mesmo modo, os valores de escorregamento medidos nos provetes fabricados com betão leve são muito próximos dos valores anteriormente medidos em provetes preparados com betão de massa volúmica normal.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Saint-Gobain Weber Portugal e à BASF Portugal o gentil fornecimento de argila expandida do tipo LECA HD[®] e de superplastificante do tipo Glenium Sky 617[®], respetivamente.

Referências

- [1] NP EN 1994-1-1. *Eurocódigo 4 – Projeto de estruturas mistas aço-betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. IPQ, junho 2011.
- [2] Veríssimo, G. S.; Paes, J. L. R.; Valente, I.; Cruz, P. J. S.; Fakury, R. H. *Experimental tests on a new shear connector for steel-concrete composite structures*. Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto, Portugal, julho 2006 (CD-Rom).
- [3] 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 de doutoramento. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, agosto 2007.
- [4] EuroLightCon: *LWAC Material Properties-State-of-the-Art*, Rel.BE96-3942/R2, abril 1999.