

Resistência ao corte de conectores do tipo perfobond sujeitos a altas temperaturas

João Paulo C. Rodrigues¹, Luís Laím²

Resumo

Os conectores de corte são elementos fundamentais nas estruturas mistas de aço e betão porque garantem a acção mista entre o perfil de aço e a laje de betão. De entre os diversos tipos de conectores existentes destacam-se os Stud, os Perfobond, os Crestbond, entre outros, sendo o conector Stud o mais conhecido e empregue neste tipo de construções compósitas e, consequentemente, o mais estudado por autores da área. Contudo, ainda existe pouco conhecimento no desempenho estrutural ao corte deste tipo de conectores a altas temperaturas. Deste modo, este artigo apresenta um estudo experimental sobre o comportamento de conectores do tipo Perfobond a altas temperaturas. O programa experimental consistiu num conjunto de ensaios tipo *push-out* modificados à temperatura ambiente e a altas temperaturas, tendo como principais objectivos investigar a influência do número de furos no conector, a presença de armadura transversal nos furos e a interacção de dois conectores adjacentes, em função da temperatura. Uma das conclusões importantes a que este estudo chegou foi o facto da capacidade última de carga destes conectores ter sido significativamente afectada pela temperatura, em especial, para resistências ao fogo superiores a 60 minutos.

Palavras-chave: Resistência. Fogo. Conector. Perfobond. Push-out.

¹ Professor, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal. e-mail: jpaulocr@dec.uc.pt. ^b Doutorando, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal. e-mail: luislaim@hotmail.com

² Autor para contacto. Tel.: +351 239 797 237; Fax: +351 239 797 242; E-mail: jpaulocr@dec.uc.pt

1 Introdução

A construção em estruturas mistas de aço e betão tem sido correntemente utilizada em edifícios de grande envergadura e em pontes, possibilitando assim, beneficiar das vantagens mecânicas dos dois materiais. No entanto, a capacidade máxima resistente deste tipo de elementos só é garantida com a presença de conectores que permitam a mobilização de esforços de corte a desenvolver-se entre o aço e o betão estrutural. De entre os diversos tipos de conectores existentes destacam-se os *Stud*, os *Perfobond*, os *T-Perfobond* e os *Crestbond*.

No passado recente, Martins et al. (2010), Iwasaki et al. (1987), Valente e Cruz (2004) e Vianna et al. (2009) estudaram o comportamento de conectores do tipo *Perfobond* à temperatura ambiente e concluíram que diversos parâmetros geométricos e do material influenciam o comportamento estrutural do conector, nomeadamente, o número de furos, a altura, o comprimento e a espessura da chapa, a resistência à compressão do betão e a quantidade de armadura transversal passante pelos furos do *Perfobond*. Além disso, Al-Darzi et al. (2007), Marecek et al. (2004), Oguejiofor e Hosain (1994), Ushijima et al. (2001) e Veríssimo et al. (2006) apresentaram propostas de modelos analíticos para estimar a resistência deste tipo de conectores. Contudo, existem poucos trabalhos de investigação no que respeita ao estudo de conectores sujeitos a altas temperaturas como as de incêndio. Apenas de salientar os trabalhos de Choi et al. (2009) e Mirza (2009) sobre o comportamento de *Studs* sujeitos a altas temperaturas.

Neste sentido, o presente trabalho apresenta os resultados dum estudo sobre o comportamento de conectores do tipo *Perfobond* a altas temperaturas. Deste modo, foram realizados vários ensaios a altas temperaturas e à temperatura ambiente de acordo com as recomendações da EN1994-1.1, anexo B (2005). Porém, foram introduzidas algumas alterações ao ensaio *push-out* recomendado, a fim de tornar exequíveis os ensaios em situação de incêndio. Neste estudo, para diferentes níveis de temperatura procurou-se, assim, avaliar a influência do número de furos nos conectores, a presença de armadura transversal passante nos furos e a interacção de dois conectores lado a lado. Por fim, este trabalho de investigação também comparou os resultados deste tipo de conectores a altas temperaturas com os obtidos à temperatura ambiente.

2 Análise experimental

2.1 Provetes de ensaio

O programa experimental realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LEME) da Universidade de Coimbra (UC) em Portugal, consistiu num total de 32 ensaios *push-out*, modificados dos quais 24 foram efectuados a altas temperaturas e 8 à temperatura ambiente.

Os provetes foram construídos com base nas recomendações do Eurocódigo 4, parte 1-1, anexo B (2005). Contudo, devido à aplicação da acção térmica num dos lados da viga, foi removida uma das lajes de betão do provete standard, resultando provetes com a configuração geométrica do tipo da apresentada na Figura 1. O Quadro 1 descreve detalhadamente as características geométricas dos restantes provetes ensaiados.

Os provetes eram assim constituídos por um perfil HEA 200 da classe S355, por uma laje de betão armado com 650 mm de comprimento, l_C , 600 mm de largura, w_C , 150 mm de espessura, t_C , e por uma armadura na sua envolvente da classe A500NR e com 10 mm de diâmetro, Φ , formando uma malha quadrada com aproximadamente 150 mm.

As amostras de betão de provetes cúbicos da laje apresentaram uma resistência média à compressão de aproximadamente 28 MPa, que correspondeu à classe C20/25 de acordo com a norma NP-EN 206-1 (2007).

Finalmente, os conectores tinham 310 mm de comprimento, l , 100 mm de altura, h , 15 mm de espessura, t , e mesma classe estrutural da viga. Estes conectores apresentaram diferentes números de furos, Pnh , com 30 mm de diâmetro, D , variando entre 0 e 4. Além disso, alguns provetes também apresentaram armadura transversal passante nos furos dos conectores, com diâmetros de 12 ou 20 mm, $Plh-\Phi_{re}$, e, por último, num dos provetes ainda foram soldados dois conectores de um furo, um ao lado do outro, $2Plh$ (Quadro 1).

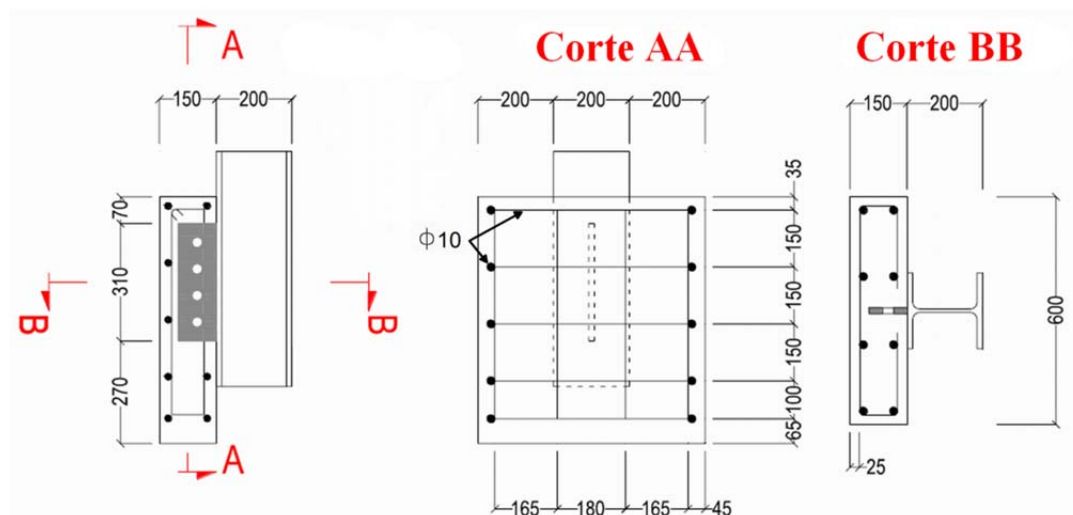


Figura 1: Geometria dos provetes de ensaio *push-out* modificado (provetes *P4h*) (mm)

Quadro 1: Características geométricas dos provetes de ensaio *push-out* modificado

Tipo de conector	Laje			Conector					
	t_c (mm)	w_c (mm)	l_c (mm)	t (mm)	h (mm)	l (mm)	D (mm)	re (mm)	n
P0h	150	600	650	15	100	310	30	-	0
P1h								-	1
P2h								-	2
P3h								-	3
P4h								-	4
P1h-12re								12	1
P1h-20re								20	1
2P1h								-	1

Nos ensaios a altas temperaturas foram registradas as temperaturas dos provetes a diferentes profundidades, através de termopares do tipo K (cromel-alumel). Como se ilustra na Figura 2, os termopares θ_{S1} , θ_{S2} , θ_{S3} e θ_{S4} foram soldados na chapa de aço do conector, enquanto os termopares θ_{C1} , θ_{C2} , θ_{C3} , θ_{C4} , θ_{C5} e θ_{C6} foram embebidos no betão a diferentes profundidades.

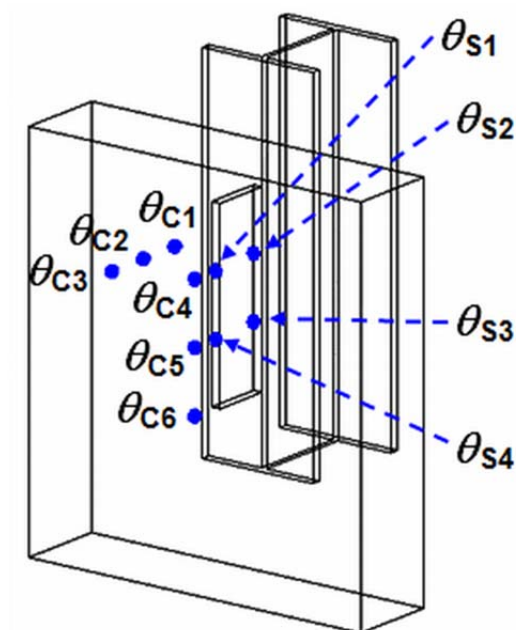


Figura 2: Localização de termopares nos provetes de ensaio

2.2 Modelo experimental

Na Figura 3 é ilustrado um novo sistema experimental para ensaios push-out modificados de resistência ao corte de conectores para a temperatura ambiente e altas temperaturas. Este sistema resulta essencialmente na substituição de uma das lajes (1) do provete standard, preconizado pela EN1994-1.1, anexo B (2005), por um forno (2) e uma estrutura de restrição (3), de modo a conferir simetria ao carregamento e a manter o provete na mesma posição durante o ensaio. Além disso, o carregamento na viga foi aplicado por um actuador hidráulico de 1 MN (4) e o sistema de aquisição de dados foi efectuado com um Datalogger. Os deslocamentos relativos entre a viga metálica e a laje de betão (5), assim como, o escorregamento entre o provete e a base de reacção sobre o qual o provete estava apoiado (6) foram ainda medidos através de transdutores de deslocamentos.

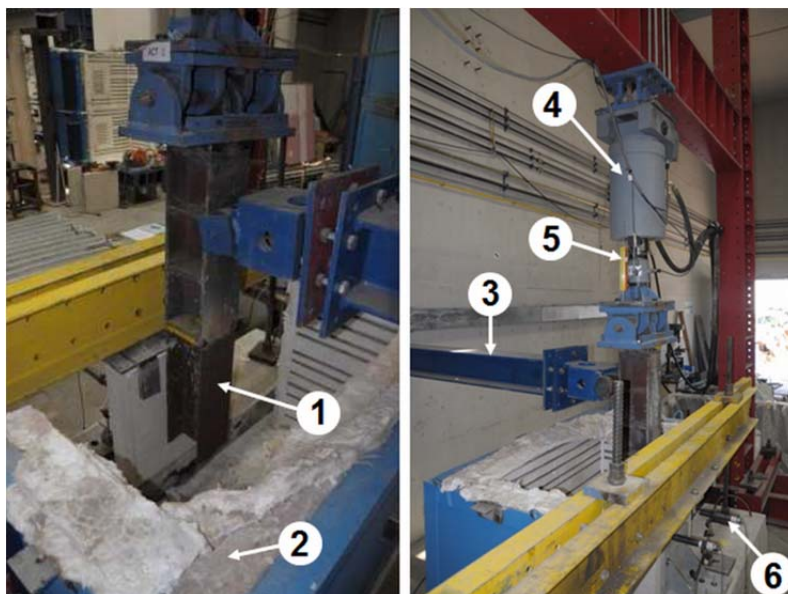


Figura 3: Instalação experimental dos ensaios *push-out* modificados

2.3 Programa de ensaio

Este trabalho de investigação experimental englobou 8 ensaios *push-out* modificados à temperatura ambiente, com o intuito de estimar para cada tipo de conector descrito no Quadro 1 as curvas força-deslocamento, os modos de rotura, a capacidade de carga última e a capacidade máxima de deslizamento entre a viga e a laje dos respectivos provetes. Além disto, este trabalho contou ainda com a realização de mais 24 ensaios a altas temperaturas com os mesmos tipos de conectores de modo a aferir também para estes provetes as curvas força-deslocamento, os modos de rotura, as capacidades de carga última e a capacidades de deslizamento dos conectores. Foram realizados 8 ensaios por cada nível de temperatura testado, 840, 950 e 1005 °C (temperatura no forno), correspondendo a um aquecimento segundo a curva normalizada de incêndio ISO 834 de 30, 60 ou 90 minutos (EN 1991-1-2, 2002).

2.4 Procedimento de ensaio

2.4.1 Ensaios à temperatura ambiente

Estes ensaios foram efectuados em duas fases distintas. Primeiro, aplicou-se um carregamento cíclico entre 5 e 30% da capacidade última de carga espectável à velocidade de 1 KN/s, efectuando-se 25 vezes o ciclo de carga e descarga. Os valores espectáveis das cargas de

rotura dos respectivos conectores foram obtidos do estudo de Martins et al. (2010). Este carregamento cíclico pretendeu simular as condições de serviço a que os conectores estão sujeitos num edifício real. Por último, após a aplicação dos ciclos, os provetes foram progressivamente carregados à velocidade de 0,01 mm/s até o deslocamento relativo entre a viga e a laje ter sido muito grande, na grande maioria dos casos, aproximadamente 60 mm.

2.4.2 Ensaaios a altas temperaturas

Do mesmo modo que os ensaios à temperatura ambiente, também nos ensaios a altas temperaturas os provetes foram sujeitos no início a um carregamento cíclico idêntico, mas com valores de carga estimados a partir da capacidade de carga última dos respectivos provetes ensaiados no presente trabalho à temperatura ambiente.

Após este carregamento cíclico, os provetes foram aquecidos até à temperatura pretendida, com a mesma velocidade de aquecimento preconizada pela curva normalizada de incêndio estabelecida na EN 1991-1-2 (2002). Como mencionado acima, os níveis de temperaturas pretendidos no forno foram de 840, 950 e 1005 °C, correspondendo a um aquecimento de 30, 60 e 90 minutos da curva ISO 834, respectivamente.

Finalmente, quando o nível de temperatura desejada era atingido, o perfil em aço dos provetes era carregado à velocidade de 0,01 mm/s até que o deslocamento relativo entre este e a laje ultrapassasse os 60 mm. Durante esta aplicação de carga, a temperatura no forno permanecia constante.

2.5 Apresentação e discussão de resultados

A Figura 4 apresenta, também a título de exemplo, as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) obtidas dos ensaios *push-out* modificados à temperatura ambiente (fig. 4a) e à temperatura elevada de 1005°C (fig. 4b), correspondendo este último a 90 minutos de aquecimento segundo a curva ISO 834. De acordo com a EN1994-1.1, anexo B (2005), pode-se estimar das figuras anteriores os valores da capacidade de carga última, P_{test} , e característica, P_{Rk} , dos provetes, assim como, a capacidade de deslizamento do conector, δ_u . Neste sentido, o Quadro 2 sintetiza estes valores para todos os ensaios realizados neste trabalho de investigação.

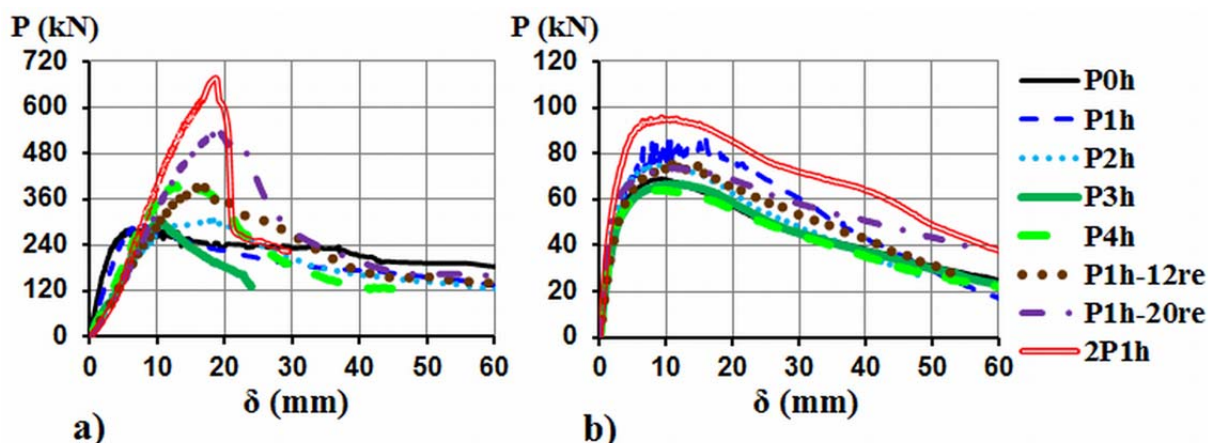


Figura 4: Curvas força-deslocamento obtidas dos ensaios *push-out* modificados a 20°C (a) e 1005°C (b)

Quadro 2: Resultados dos ensaios *push-out* modificados

	Temperatura ambiente			Tempo de aquecimento segundo a curva padrão ISO 834								
				30 minutos			60 minutos			90 minutos		
Conector	P_{test} (KN)	P_{Rk} (KN)	δ_u (mm)	P_{test} (KN)	P_{Rk} (KN)	δ_u (mm)	P_{test} (KN)	P_{Rk} (KN)	δ_u (mm)	P_{test} (KN)	P_{Rk} (KN)	δ_u (mm)
P0h	283,5	255,2	14,41	108,3	97,5	5,82	140,0	126,0	13,51	69,0	62,1	16,61
P1h	293,1	263,7	11,13	211,5	190,4	13,60	159,0	143,1	22,26	87,6	78,9	17,91
P2h	307,4	276,7	21,42	182,7	164,4	12,10	136,6	122,9	27,97	75,5	68,0	16,91
P3h	303,0	272,7	12,30	258,6	232,7	14,94	150,2	135,2	23,82	66,7	60,0	19,49
P4h	396,3	356,7	18,72	297,1	267,4	14,17	152,7	137,4	28,69	64,2	57,8	18,61
P1h-12re	394,7	355,2	18,41	274,8	247,3	17,60	167,0	150,3	26,58	76,1	68,5	17,90
P1h-20re	542,8	488,5	22,33	181,7	163,6	10,17	158,4	142,6	32,66	73,8	66,4	22,12
2P1h	675,1	607,6	19,62	205,4	184,8	14,61	172,0	154,8	30,18	95,7	86,1	19,53

Da observação do Quadro 2, constata-se que, à temperatura ambiente, o provete com dois conectores (2P1h) apresentou uma capacidade de carga última muito superior relativamente aos outros, chegando mesmo a ser 2,3 vezes superior ao do provete com um conector (P1h). Por outro lado, o provete com o conector sem furos (P0h) apresentou a menor capacidade última de carga, 97% da capacidade de carga do conector P1h.

No entanto, comparando agora o desempenho dos provetes a altas temperaturas com os obtidos à temperatura ambiente, conclui-se que o conector 2P1h foi o mais afectado pela temperatura, apresentando para 30, 60 e 90 minutos de aquecimento, capacidade de carga última de 30, de 25 e de 14 % da sua capacidade registada à temperatura ambiente, respectivamente (fig. 5). Por outro lado, para as temperaturas mais elevadas, em especial para 950 e 1005°C, o conector P1h

apresentou menos reduções na sua capacidade última de carga relativamente à temperatura ambiente.

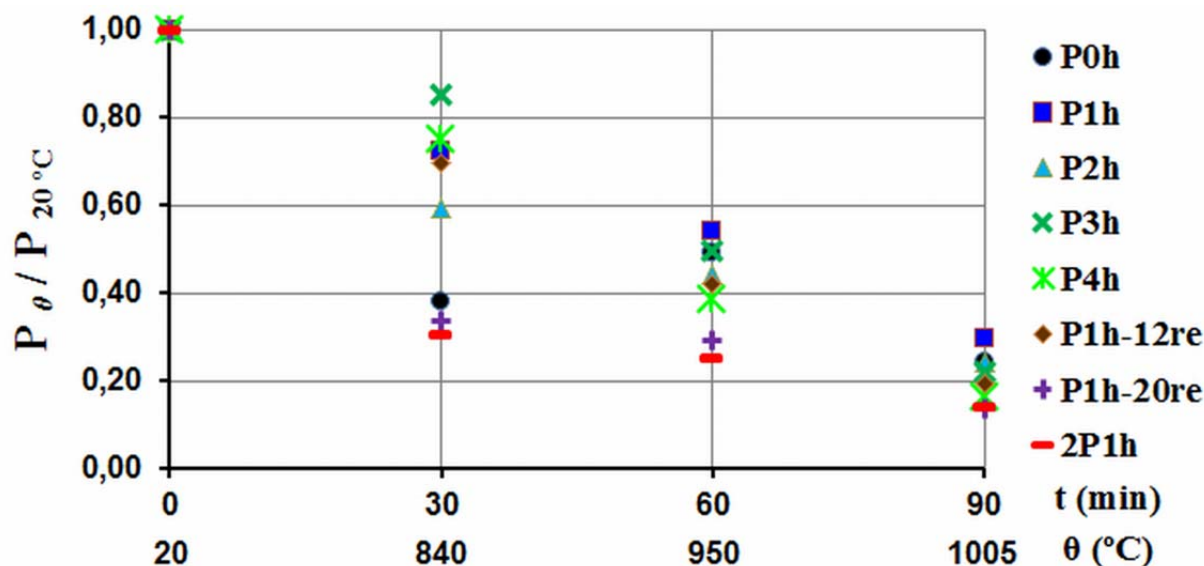


Figura 5: Relação entre as capacidades de carga dos provetes obtidas a altas temperaturas e à temperatura ambiente

Ainda pela Figura 5, pode-se concluir que globalmente a temperatura afectou substancialmente o comportamento dos conectores em relação à temperatura ambiente e que quanto maior for a exposição dos provetes ao fogo menor é a diferença da capacidade de carga entre os diversos tipos de conectores estudados. No entanto, apenas para 30 minutos de exposição ao fogo, a capacidade de carga última do conector depende fortemente do tipo de conector, uma vez que existe uma enorme discrepância do desempenho destes a 840°C comparativamente com o desempenho à temperatura ambiente, registando-se perdas nas suas capacidades de carga entre os 15 e 70%. Ou seja, enquanto o conector *P3h* apresentou uma capacidade de carga 85% o conector *2P1h* apresentou somente 30% da observada à temperatura ambiente.

Na Figura 6 é possível observar-se a influência, na resistência dos conectores tipo Perfobond, do número de furos dos conectores (fig. 6a), do diâmetro da armadura transversal passante nos furos dos conectores (Fig. 6b) e da presença de conectores inseridos lado a lado nos provetes (Fig. 6c), para os diferentes níveis de temperatura analisados neste trabalho.

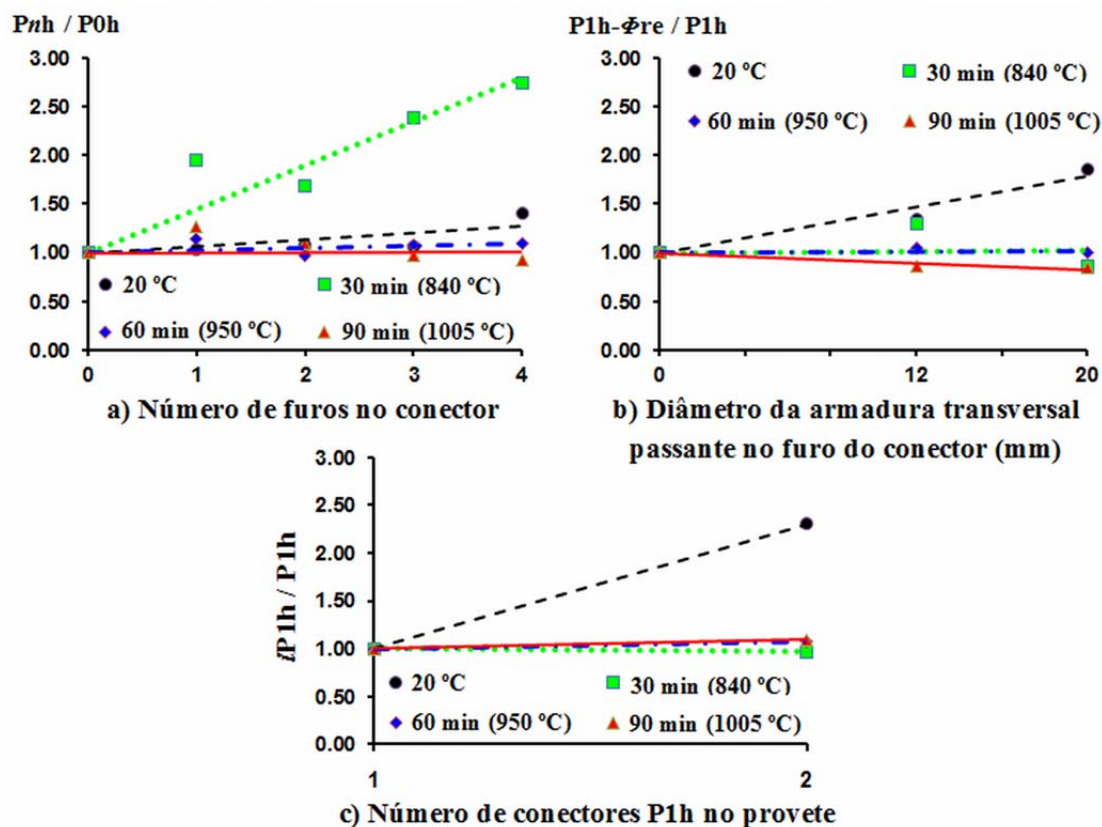


Figura 6: Influência do número de furos do conector (a), do diâmetro de armadura transversal passante no furo do conector (b) e do número de conectores colocados lado a lado (c) na capacidade de carga última do provete

Para uma melhor elucidação destes resultados foi traçado nos gráficos da Figura 6 as suas respectivas linhas de tendência. Relativamente ao número de furos dos conectores, pode-se concluir que para 30 minutos de aquecimento (a 840 °C) e à temperatura ambiente (a 20 °C) a resistência ao corte dos conectores foi forte e ligeiramente aumentada com o aumento do número de furos, respectivamente. Nos restantes períodos de aquecimento não foi observado praticamente nenhuma influência (Fig. 6a). Além disso, pode-se aferir que a presença de armadura passante nos furos dos conectores e a existência de dois conectores colocados lado a lado nos provetes tiveram uma contribuição significativa na resistência dos conectores à temperatura ambiente, contrariamente ao que foi observado a elevadas temperaturas (Figs. 6b e 6c). Esta constatação poderá significar que quanto maior for a quantidade de aço utilizada nas ligações maiores serão as perdas de resistência ao corte dos provetes para situações de altas temperaturas.

2.6 Modo de rotura

Os provetes analisados mostraram dois tipos de rotura, um à temperatura ambiente e outro diferente a elevadas temperaturas. Primeiro, nos ensaios à temperatura ambiente verificou-se nos provetes uma fissura no betão desde o conector até à base da laje, com a direcção longitudinal do conector. Com o aumento do carregamento, esta fissura aumentava e provocava o aparecimento de outras ao lado da primeira. Por fim, perpendicularmente ao conector surgiram outras fissuras que tendencialmente fizeram um ângulo de 45° com o conector (Fig. 7a). De salientar, que este último tipo de fissuras agravava-se bastante com a presença de armadura transversal passante nos furos dos conectores (Fig. 7b).

Por outro lado, nos provetes ensaiados a altas temperaturas foram observadas depois dos respectivos ensaios, devido ao aquecimento, fenómenos de encurvadura do perfil de aço do provete, provenientes da degradação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura. Acredita-se que este fenómeno apenas ocorra depois do destacamento do conector da laje de betão. Além disso, na zona de destacamento do conector ocorreram largas fissuras e esmagamento do betão. Também devido à acção térmica, toda a face da laje sofreu ligeiros destacamentos de betão devido ao fenómeno de spalling (Fig. 8).

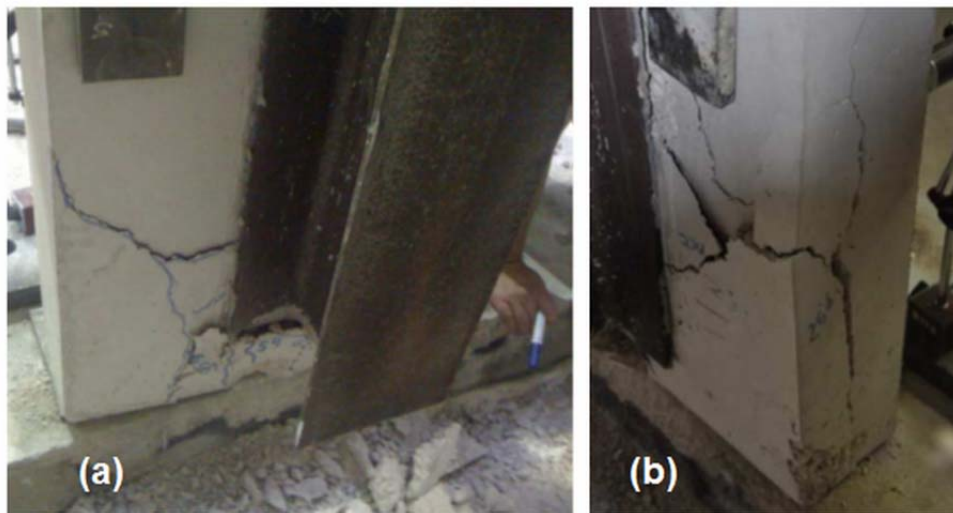


Figura 7: Modo de rotura dos provetes com o conector 2P1h (a) e com conector P1h-12re (b).



Figura 8: Modo de rotura dos provetes ensaiados a altas temperaturas.

3 Conclusões

No presente artigo foi apresentado e discutido os resultados de uma investigação experimental sobre a resistência ao corte de conectores do tipo Perfobond a altas temperaturas. Neste trabalho foram ensaiados 4 grupos de provetes iguais com 8 conectores diferentes, de modo a estimar e a comparar essencialmente a resistência e a ductilidade dos respectivos conectores para quatro níveis diferentes de temperatura. Os principais parâmetros avaliados foram o número de furos no conector, o diâmetro da armadura transversal passante nos furos do conector e a utilização de dois conectores lado a lado.

Neste sentido, concluiu-se que o aumento daqueles parâmetros melhora o desempenho da capacidade de carga dos conectores à temperatura ambiente, sendo a utilização de dois conectores lado a lado e o número de furos dos conectores os parâmetros que mais e menos afectam a resistência ao corte, respectivamente.

Dos resultados dos ensaios a altas temperaturas, pode-se aferir que a temperatura reduz bastante a capacidade de carga dos conectores, especialmente os provetes com dois conectores lado a lado. No entanto, o conector com um furo foi em geral o menos afectado com a temperatura comparativamente com o seu desempenho à temperatura ambiente.

Finalmente, outra importante ilação a retirar deste trabalho de investigação foi que a presença de armadura transversal passante nos furos dos conectores e a existência de mais que um

conector lado a lado nos provetes praticamente não influenciou a resistência ao corte dos provetes a altas temperaturas, agravando-se ainda com o aumento desta.

4 Referências

- AL-DARZI, S.Y.K., CHEN, A.R. and LIU, Y.Q. (2007). Development of new hole shape of Perfobond shear connectors, parametric study. Proceedings of the 2nd International Symposium on Connection between Steel & Concrete, University of Stuttgart, p. 1401-1413.
- CHOI, S., HAN, S., KIM, S., NADJAI, A., ALI, F. and Choi, J.A. (2009). Performance of shear Studs in fire. Applications of Structural Fire Engineering - Prague, Prague, Czech Republic.
- EN 1991-1-2 (2002). Eurocode 1 – Actions on structures – part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.
- EN 1994-1-1 (2005). Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN – European Committee for Standardization.
- IWASAKI, H., FUJII, K., FUKADA, K., TOYOTA, T. and NAKAMURA, H. (1987). A consideration on slip test methods for Perfobond shear connector focusing on concrete confinements. Itoh and Aoki editors; Advances in Experimental Structural Engineering.
- MARECEK, J., SAMEC, J. and STUDNICKA, J. (2004). Numerical Analysis of Perfobond Shear Connector. Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Engineering Design AED'2004, Glasgow.
- MARTINS, J.P.S.C., NEVES, L.F.C. and VELLASCO, P.C.G.S. (2010). Experimental Evaluation of the Structural Response of Perfobond Shear Connectors. Engineering Structures, v. 32, p. 1976-1985.
- MIRZA, O. (2009). Behaviour of Headed Stud Shear Connectors for Composite Steel-Concrete Beams at Elevated Temperatures. Journal of Constructional Steel Research, v. 65, p. 662-674.
- NP-EN 206-1 (2007). Concrete. Part 1: Specification, performance, production and conformity. European Standard (Portuguese version). CEN – European Committee for Standardization.
- OGUEJIOFOR, E.C. and HOSAIN, M.U. (1994). A Parametric Study of Perfobond Rib Shear Connectors. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 21, p. 614-625.
- USHIJIMA, Y., HOSAKA, T., MITSUKI, K., WATANABE, H., TACHIBANA, Y. and HIRAGI, H. (2001). An Experimental Study on Shear Characteristics of Perfobond Strip and its Rational Strength Equations. Proceedings of the International Symposium on Connections between Steel and Concrete, University of Stuttgart, p. 1066-1075.
- VALENTE, M. I. B. and CRUZ, P.J.S. (2004). Experimental Analysis of Perfobond Shear Connection Between Steel and Lightweight Concrete. Journal of Constructional Steel Research, v. 60, p. 465-479.
- VERÍSSIMO, G.S., VALENTE, I., PAES, J.L.R., CRUZ, P.J.S. and FAKURY, R.H. (2006). Design and Experimental Analysis of a New Shear Connector for Steel and Concrete Composite Structures. Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost, Porto.
- VIANNA, J.C., NEVES, L.F.C., VELLASCO, P.C.G.S. and ANDRADE, S.A.L. (2009). Experimental Assessment of Perfobond and T-Perfobond Shear Connectors' Structural Response. Journal of Constructional Steel Research, v. 65, p. 408-421.

Annex - Shear resistance of perfobond shear connectors subjected to high temperatures

Abstract

This paper describes an innovative experimental study on the behavior of Perfobond shear connectors subjected to high temperatures. The specimens were firstly heated from ambient up to a target temperature and then they were loaded up to failure as a way to assess the connector shear resistance and its ductility at elevated temperatures. The test configuration followed some of the EN1994-1.1, Annex B, with some changes for the high temperature tests. The parameters under study were the number of holes in the Perfobond, the presence of transversal reinforcement bars passing through these holes and the two connectors placed side by side. It was still compared the failure modes, force-slip curves and load capacities of these connectors at ambient temperature with the ones tested at elevated temperatures. The results of this research showed mainly that the parameters that increase the load capacity of these connectors at ambient temperatures don't have the same influence at high temperatures.

Keywords: Resistance. Fire. Connector. Perfobond. Push-out.

1 Experimental tests

1.1 Specimens and test set-up

The experimental tests on the Perfobond shear connectors were carried out at the Laboratory of Testing Materials and Structures (LEME) of the University of Coimbra, in Portugal. The experimental programme consisted of 32 modified push-out tests, 8 of which were performed at ambient temperature and 24 at elevated temperatures.

The test specimens were fabricated in accordance to the EN1994-1-1 annex B (2005), but to apply the heat at the side of the short beam, it had to be removed one of the concrete slabs of the standard push-out specimen (Fig. 1). Connectors were fabricated from a 15 mm thick plate of S355 steel and the beam was a HEA 200 profile of S355 steel, which was connected to a 150 mm thick reinforced concrete slab of C20/25 class. The slab was reinforced with 10 mm diameter rebars and a square reinforcement mesh around of 150 mm of A500NR steel. As summarized in table 1, the number of holes in the connectors was varied from 0 to 4 and in some it was placed 12 or 20 mm diameter transversal rebars inside the hole of the connectors or it was placed two identical connectors, side by side.

In Fig. 3, besides the geometry of the specimen (1) is presented the restraining system (3) and the electric furnace (2). This restraining system was used to keep the specimen in the vertical

position during the test and at the same time to re-establish the symmetry of the loading, which was applied by a 1MN hydraulic actuator Servosis pinned at both extremities (4).

Data acquisition system was assured by a TML data logger and the loads were measured by the actuator load cell, while the relative displacement between the short steel beam and the concrete slab were measured by linear variable displacement transducers (5). Finally, the temperatures in the furnace and specimen were measured by type K thermocouples (Fig. 2).

1.2 Test procedure

Eight modified push-out tests at ambient temperature were conducted to assess the reference force-slip curves, failure modes, ultimate load and slip capacity of the specimens. The same goals were sought and achieved for the 24 modified push-out tests at high temperatures. The temperature levels chosen were 840, 950 and 1005 °C (furnace temperatures), corresponding to 30, 60 and 90 minutes of the ISO 834 fire curve, respectively. It is noticed that for each temperature level it was tested 8 specimens identical to the ones tested at ambient temperature.

The experimental tests at ambient temperature were loaded in two stages according to EN1994-1-1, annex B (2005). At the first stage a cyclic loading between 5% and 30% of the expected ultimate load capacity was applied in 25 cycles at a rate of 1 KN/s. The ultimate load capacity was obtained from the study of Martins et al. (2010) for standard push-out specimens made with the same type of Perfobond connectors of the ones tested in the present study. This cyclic loading intended to simulate the serviceability state of the specimens when inserted in a real building structure.

At the second stage the specimens were loaded at a rate of 0.01 mm/s until the relative displacement between the short steel beam and the concrete slab was very large, in other words, when this displacement was about 60 mm in most of the cases.

On the other hand, in the experimental tests at elevated temperatures the specimens were heated up to the target temperature at the same heating rate of the ISO 834 fire curve (EN 1991-1-2, 2002), after the specimen has been subjected to the cyclic loading.

1.3 Results

The main conclusions to be drawn were that the high temperatures adversely affected the resistance (fig. 5) and stiffness of the connections and also increased its ductility. Whereas the stiffness of the connections at 840 and 950°C was a little bit higher than the one at ambient

temperature, at 1005°C it was the lowest. This gain of stiffness may have resulted from the change of the concrete properties at those high temperatures.

It is important to stress that the *2Plh* connectors at elevated temperatures presented the worst behaviour and, in opposition, the *Plh* connector presented the best one in general. Figure 5 also shows that the higher is the temperature the smaller is the influence of the studied variables on the ultimate load capacity of the Perfobond connectors, since the relations between connector shear resistances observed at elevated and the respective ones at ambient temperature were closing each other for the different levels of testing temperatures. So, it can be concluded that the connector configuration is not so important if it is necessary a fire resistance of 90 minutes than in opposition for a fire resistance of 30 minutes. The ultimate load capacity of the connectors, in relation to the room temperature, dropped between 15 and 70 %, 45 and 75 % and between 70 and 85 % for 30, 60 and 90 minutes of the ISO 834 fire curve, respectively.

From Figure 6 it can be observed the influence on the shear resistance of Perfobond connectors by the number of connector holes, the reinforcing bar diameter presented at the connector holes and the number of *Plh* connectors presented in the specimens for different levels of temperature tested. For a clear visualization of these results it was plotted their trend as well. It can be observed that the shear resistance increased too much with the number of holes for 30 minutes of the ISO 834 fire curve, while for 90 minutes the resistance decreased slightly (fig. 6a). In addition, it may be concluded that the presence of reinforcing bars passing through the connector holes and the two connectors placed side by side (*2Plh*) had a significant contribution for the resistance of the connections at ambient temperature, in opposition to what was observed at high temperatures (figs. 6b and 6c). This may mean that a bigger amount of steel in connection increase the concrete damage by cracking near the connector.

2 Conclusions

The main conclusion of this research work was that an increase of the investigated parameters enhanced the connector load carrying capacity at ambient temperature, being the resistance of the connections more and less affected by the number of connectors and the number of connector holes, respectively.

From the results of the tests at high temperatures it may be concluded that these temperatures adversely affect the connector load carrying capacity. It was also observed that the connections made with two connectors presented the worst behaviour at high temperatures and, in

opposition, the connectors with one hole and without steel reinforcement passing through it presented the best one in general.

Finally, another important conclusion to be drawn was that the influence of the presence of reinforcing bars passing through the connector holes and the two connectors placed side by side had so little influence on the shear resistance of the connections at high temperatures. This influence may even be adverse at some temperatures.