

Artigo publicado em **junho 2016** na revista **Metálica**, editada pela Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista

Comportamento experimental de diferentes tipos de conectores metálicos

Isabel B. Valente

ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho

1. Introdução

A realização de estruturas mistas de aço e betão requer o funcionamento conjunto destes dois materiais. A ligação entre eles é conseguida com a utilização de conectores metálicos. Neste âmbito, tem sido realizada uma considerável quantidade de estudos que abordam o comportamento de diversos tipos de conectores metálicos. O desejo de obter um comportamento óptimo com custos mínimos motivou o desenvolvimento de várias soluções.

Neste artigo, procura-se descrever o comportamento de diferentes tipos de conectores observado em ensaios experimentais realizados na Universidade do Minho (UM) ou em estreita colaboração da UM com outras entidades. Apresentam-se as vantagens e as desvantagens associadas a cada tipologia de conexão analisada.

Para além dos usuais conectores tipo perno, discutem-se os resultados obtidos com conectores do tipo T, tipo Perfobond, tipo Crestbond e ligação por aderência (Figura 1).

É de salientar que a regulamentação vigente, o Eurocódigo 4 [1], não aborda o dimensionamento de conectores lineares ou de ligações por aderência, trata apenas dos conectores do tipo perno, onde a transmissão de esforço se dá por meio da interação mecânica entre o betão, a armadura e o conector.



a) Pernos de cabeça



b) T



c) Perfobond



d) Crestbond



e) Ligação por aderência

Figura 1: Tipologias de Conectores

2. Ensaio experimental para caracterização do comportamento de conectores metálicos

A tipologia de conexão mais comum é a do conector tipo perno. O Eurocódigo 4 propõe expressões para o cálculo da resistência última apenas para este tipo de conector. A aplicação dessas expressões fica limitada a pernos com diâmetro inferior ou igual a 25mm, cujo processo de soldadura esteja de acordo com o especificado na norma EN ISO 14555 [2]. Caso haja a intenção de utilizar outro tipo de conectores, pernos com outras dimensões, ou betões de baixa massa volúmica, deverão ser realizados ensaios experimentais. Estes ensaios estão especificados no Anexo B dessa regulamentação, [1], e os provetes são esquematicamente representados na Figura 2.

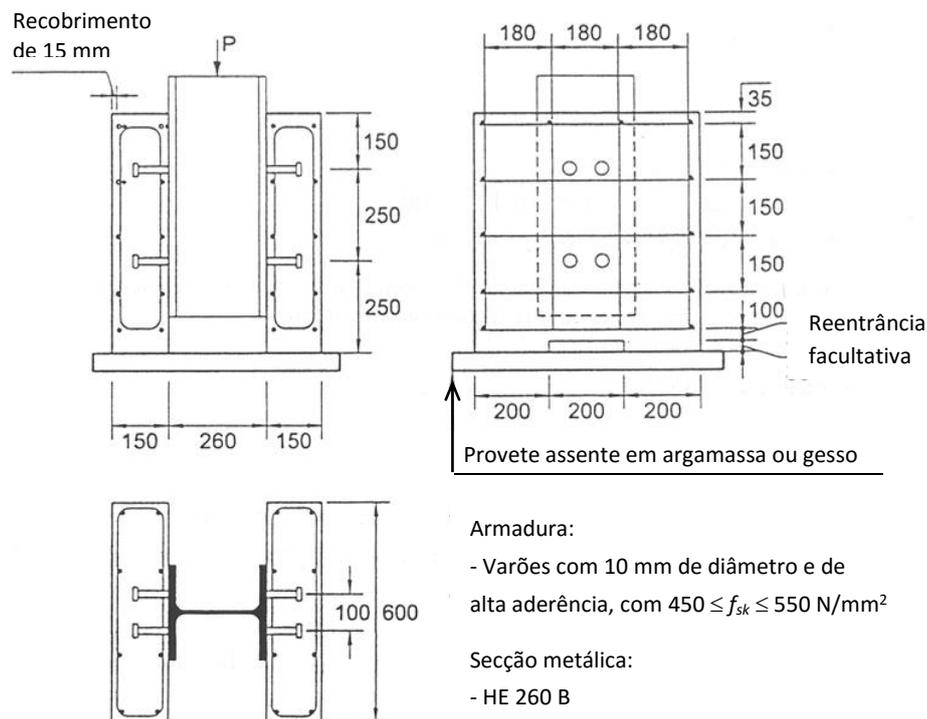


Figura 2: Esquema standard para o ensaio de tipo *push-out* proposto pelo Eurocódigo 4 [1]

3. Comportamento experimental de conectores tipo perno

A capacidade de carga de conectores tipo perno, quando são utilizados betões de resistência normal, resulta de quatro parcelas: compressão do betão junto ao colar de soldadura posicionado na base do conector, corte e flexão do conector na zona inferior da haste, tração na haste e fricção na interface da ligação. No caso de betão de elevada resistência, a parcela referente à força de tração no conector tem um valor mais reduzido e a fixação proporcionada por este betão torna a deformação por flexão da haste praticamente nula.

O comportamento deste tipo de ligação caracteriza-se por uma fase inicial mais rígida e de evolução linear, à qual se segue uma fase de plastificação, em que a carga aplicada é mais ou menos constante e a deformação aumenta progressivamente. A rotura da conexão com pernos pode ocorrer por corte do conector ou por esmagamento do betão na zona envolvente ao perno.

Em ensaios de tipo *push-out* realizados na universidade do Minho com diâmetros de 19, 22 e 25 mm e betão leve de elevada resistência, [3], verificou-se que a rotura dos provetes ocorreu por corte nos conectores, com excepção de dois ensaios realizados com pernos de diâmetro igual a 25mm. Nestes ensaios, o betão sofreu maiores danos, apresentando uma fendilhação generalizada (Figura 3.b) e os conectores não sofreram rotura. Dos vários ensaios realizados, verificou-se que os danos nas lajes de betão aumentam com o diâmetro dos conectores, tal como se pode observar na Figura 3.b.



a) Ensaio com pernos $\phi=19\text{mm}$

b) Ensaio com pernos $\phi=25\text{mm}$

Figura 3: Comportamento do betão

Na Figura 4 apresentam-se curvas que relacionam força por conector e escorregamento em ensaios de tipo *push-out* com pernos de 19, 22 e 25 mm de diâmetro. A capacidade da carga aumenta com o diâmetro dos conectores, tal como seria de esperar, bem como a capacidade de deformação. A perda dessa capacidade de carga é muito mais suave nos pernos de diâmetro 25 mm, uma vez que se verifica uma degradação progressiva das lajes de betão, e não a rotura dos pernos.

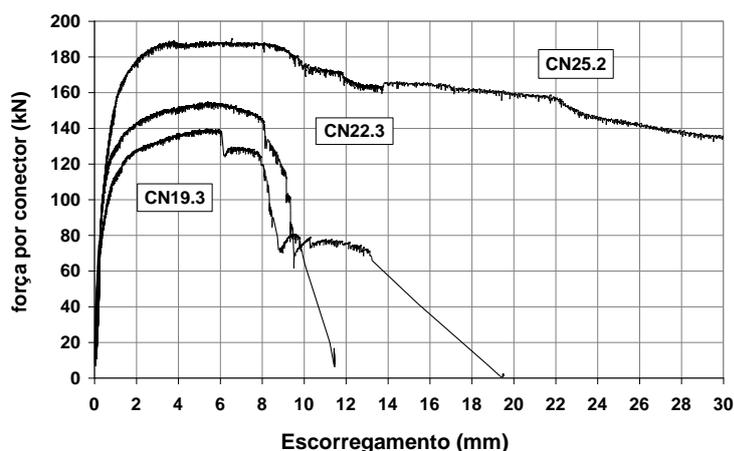


Figura 4: Curvas que relacionam força por conector e escorregamento em ensaios de tipo *push-out* com pernos de 19, 22 e 25 mm de diâmetro [3]

O parágrafo 6.6.1.1(5) do Eurocódigo 4 recomenda um valor característico de escorregamento para conectores não inferior a 6 mm quando é necessário garantir o seu comportamento dúctil. Nos ensaios realizados na UM [3], esse limite foi cumprido, mas o mesmo não foi observado em ensaios realizados com betões de elevada resistência. Como exemplo, referem-se os ensaios realizados no RWTH-Aachen, [4] e [5], onde a utilização de betões de elevada resistência em ensaios com conectores tipo perno pôs em evidência que o valor característico mínimo de deformação igual a 6 mm não foi atingido em qualquer ensaio. Neste ensaios, verificou-se ainda que a capacidade de carga máxima atingida é subestimada quando se utilizam as expressões propostas no Eurocódigo 4 [1].

De forma geral, a deformação plástica medida para betões de elevada resistência é inferior àquela que se obtém em ensaios com betões de resistência normal. Esta capacidade de deformação dos elementos de conexão só se torna importante quando se assume como válida a redistribuição de esforço de corte entre os vários conectores dispostos no elemento misto.

4. Comportamento experimental de conectores tipo T

O conector T pode ser produzido com diferentes tamanhos, mas geralmente é obtido a partir de uma secção perfilada em aço (Figura 1.b). A espessura e o comprimento da alma formam a zona de corte do conector, que é normalmente superior à área de corte de um perno. Ao contrário dos pernos, o conector T contribui para a transferência de forças em toda a sua secção transversal, [4], mas a zona de transmissão de carga é sempre mais concentrada na zona do banzo, devido à maior área transversal deste elemento.

A forma em T proporciona uma área de contacto maior do que aquela que se obtém com um conector Perfobond. Além disso, a forma do conector T é apropriada para impedir a separação vertical (efeito de *uplift*) entre a viga de aço e a laje de betão.

A capacidade de carga deste tipo de conector depende da resistência ao corte da alma do T e da resistência à compressão do betão que fica posicionado na frente do conector. A presença de armadura na laje de betão é importante para distribuir as forças de tracção que se desenvolvem na laje de betão e deste modo prevenir uma rotura prematura causada por fendilhação. Em termos de fadiga, os conectores T apresentam problemas semelhantes aos dos pernos, uma vez que apresentam escorregamento importante para cargas de serviço e necessitam de desenvolver elevada deformação para mobilizar a carga máxima, [4], [6].

A possibilidade de produzir conectores T a partir do corte de secções perfiladas é uma vantagem, já que não há necessidade de produzir um novo elemento. Algumas desvantagens podem ser apontadas quando se compara o conector T com pernos de cabeça: é necessário mais material para a produção de um único conector e é mais difícil dispor as armaduras transversais na laje. Um conector T individual apresenta geralmente uma capacidade de carga mais elevada do que um perno isolado, pelo que a primeira desvantagem se pode reduzir ou mesmo anular, [7].

Nos ensaios com conectores tipo T, realizados por Galjaard [6], foi observado destacamento do betão acima da base do conector. Este destacamento não provocou contudo uma significativa perda de carga. Nos ensaios em que foi utilizado betão leve de elevada resistência,

a rotura ocorreu por corte do conector T. Observou-se que para resistências elevadas, a deformação resulta principalmente da deformação do conector, ao passo que para menores resistências do betão, o conector esmaga a laje de betão. Foram medidas deformações elevadas em betões de elevada resistência.

Na Figura 5 apresenta-se resultados obtidos em ensaios de tipo *push-out* com conectores T realizados com ½ IPE200, [7]. Representa-se em ordenada o valor da tensão de corte obtida considerando a área da secção transversal da alma do T e, para efeitos de comparação, considera-se também a tensão de corte calculada com base na área da secção transversal da haste dos pernos. Deste modo, é possível estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos com os dois tipos de conexão. Verifica-se que nos conectores de tipo T, a carga máxima da conexão é atingida para valores de escorregamento muito superiores ao que acontece nos pernos e que os elevados valores de escorregamento mobilizados na fase de pós-pico nos pernos de 25 mm e nos conectores T resultam de maior e mais distribuída fendilhação nas lajes de betão.

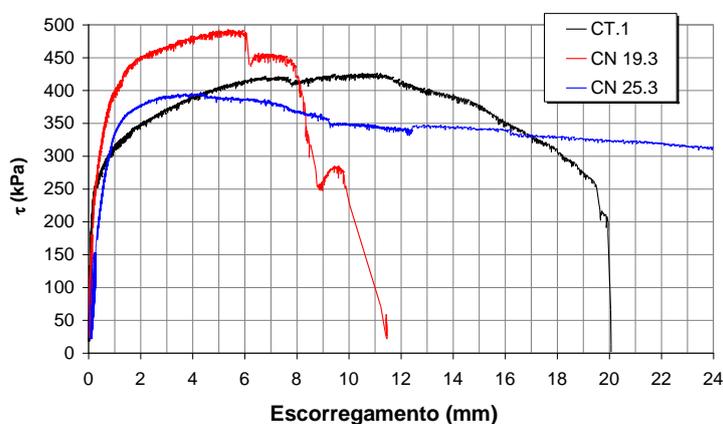


Figura 5: Curvas que relacionam tensão de corte e escorregamento em ensaios de tipo *push-out* realizados com pernos de 19 e 25 mm e conectores T realizados com ½ IPE200 [7]

5. Comportamento experimental de conectores tipo Perfobond

O conector do tipo Perfobond foi inicialmente desenvolvido pela empresa alemã Leonhardt, Andrã, and Partners, Stuttgart, para o projecto de uma ponte na Venezuela, [8]. Este elemento de conexão consiste numa chapa metálica plana com um número limitado de aberturas circulares, que fica embebida na laje de betão armado (Figura 1.c). Durante a betonagem, as aberturas da chapa são atravessadas por pelo betão da laje o que confere um acréscimo de resistência ao esforço de corte horizontal, e impede a separação vertical entre o perfil metálico e a laje de betão.

A capacidade de carga do conector Perfobond resulta das seguintes parcelas, [9]: a resistência à tração na laje de betão armado ao longo do alinhamento do conector; a resistência à tracção dos varões de armadura transversal; a resistência ao corte do betão confinado que fica no interior das aberturas do conector e o betão comprimido posicionado na frente do Perfobond. O conector apresenta elevada resistência ao corte, desde que a chapa de aço tenha espessura

e comprimento suficientes. Assim, a rotura por corte do conector é incomum, ao contrário do que acontece com os pernos de cabeça.

Algumas vantagens podem ser apontadas aos conectores Perfobond em relação aos pernos de cabeça: eles podem ser produzidos em grande escala com diferentes formas e tamanhos, podem facilmente ser soldados sem necessidade de equipamento especial, a tarefa de soldadura pode ser executada tanto em obra como em fábrica, a capacidade de carga de um número significativo de pernos pode ser substituída por um menor número de conectores Perfobond, uma vez que estes apresentam uma muito elevada capacidade de carga.

De acordo com Nishido et al. [11], a resistência ao corte aumenta com o número de aberturas do conector Perfobond, mas esse aumento não é proporcional ao número de furos. Estes autores observaram que a fendilhação numa abertura pode influenciar o comportamento outras aberturas, se a distância entre elas não for suficiente.

Em ensaios experimentais de tipo *push-out* anteriormente realizados, [3,7], a rotura destes provetes iniciou-se com a abertura de uma fenda longitudinal localizada na zona inferior do conector Perfobond, que gradualmente se estendeu pela laje. Finalizou com o esmagamento do betão na vizinhança do conector, na zona onde se iniciou a fenda.

Quando não foi utilizada armadura transversal, a rotura ocorreu de forma brusca. Resultou da abertura repentina da referida fenda longitudinal na laje de betão, tendo o elemento estrutural perdido de imediato toda a sua capacidade resistente. Para avaliar a importância da armadura transversal, foram realizados ensaios sobre provetes com e sem essa armadura [3,7]. Na Figura 6 mostram-se os resultados obtidos em ensaios de tipo *push-out* realizados com conectores Perfobond: o provete CP1.2 não tem armadura transversal a passar nos furos e do provete CP2.2 ao provete CP6.2, a quantidade de armadura transversal nos furos vai aumentando. A presença de armadura transversal permitiu atingir uma maior capacidade de carga.

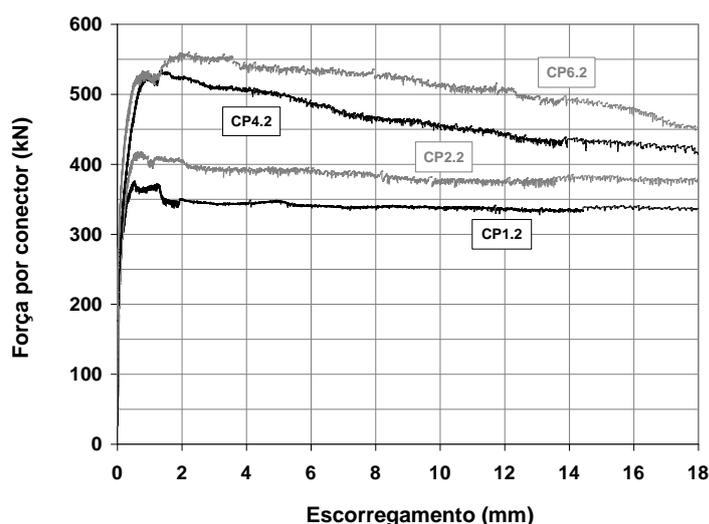


Figura 6: Curvas que relacionam força por conector e escorregamento em ensaios de tipo *push-out* com conectores Perfobond de 12 mm de espessura e 3 furos de 50 mm de diâmetro [3]

Quando as cargas variáveis são uma parcela significativa da carga total na estrutura, ocorrem valores de escorregamento mais elevados em cada ciclo de carregamento, criando problemas de fadiga, [10]. Os conectores Perfobond mostram ainda ter um comportamento à fadiga superior ao dos pernos de cabeça, uma vez que os valores de escorregamento necessários para mobilizar a capacidade de carga máxima do conector são muito menores. Outra vantagem relacionada com o comportamento de fadiga é que o comportamento do conector Perfobond é essencialmente elástico até o valor da carga máxima ser atingido, ao contrário do que acontece nos pernos, onde uma parcela importante de escorregamento de plástico já se desenvolveu quando a conexão atinge a carga máxima.

6. Comportamento experimental de conectores tipo Crestbond

A principal desvantagem associada ao conector Perfobond é a dificuldade de posicionar a armadura transversal da laje, já que os furos no conector são fechados (Figura 7.a). Para evitar esta desvantagem, têm sido estudadas outras geometrias. Uma proposta é a chapa perfurada com furos abertos. [12] e [13] descrevem ensaios realizados com conectores que combinam furos fechados e furos abertos (forma C representada na Figura 7.b). Outra solução, proposta por Veríssimo *et al*, [14] e [15], corresponde ao novo corte em forma de S, em que a simetria do corte assegura que nenhum material é desperdiçado no fabrico do conector (Figura 7.c). As chapas com furos abertos facilitam a colocação das armaduras.

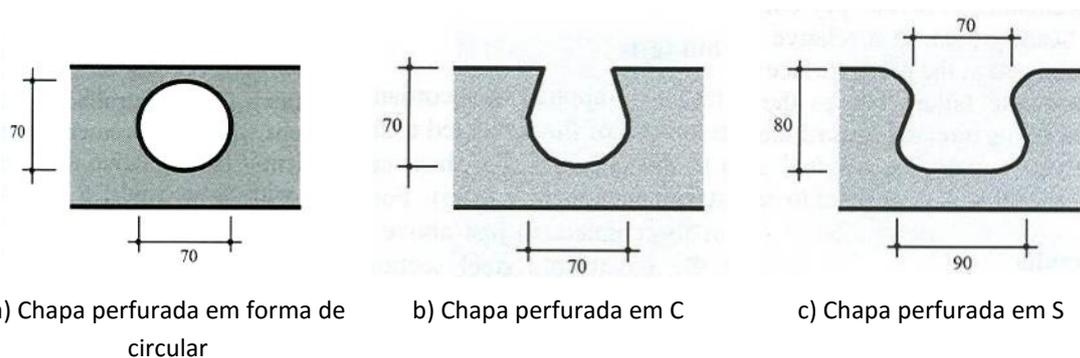


Figura 7 – Chapas perfuradas com furos “fechados” e “abertos” [16]

O conector Crestbond, desenvolvido por Veríssimo *et al*, [14] e [15], apresenta um corte simétrico, 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 armado (efeito de *uplift*). Quando um elemento misto com esse conector é solicitado, e a laje tende a escorregar em relação ao perfil de aço, o betão confinado dentro das aberturas proporciona resistência ao corte na direção longitudinal e evita que a laje de betão se separe transversalmente do perfil metálico. Resultados de ensaios experimentais realizados têm demonstrado que a contribuição do do betão inserido nos furos para a capacidade de conectores em chapa perfurada ou recortada é muito significativa e que esse tipo de conexão é uma alternativa viável ao perno de cabeça e ao Perfobond.

Da mesma forma que o Perfobond, o conector Crestbond apresenta as seguintes vantagens em relação aos pernos: 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 em fábrica. Em termos de capacidade de carga, os conectores Crestbond, e também os Perfobond, propiciam resistência similar à que é obtida com vários pernos.

Ensaio realizados com os conectores Crestbond e com o conector Perfobond mostraram que tanto a capacidade de carga como a ductilidade da conexão são influenciadas pela resistência do betão e pela armadura transversal que passa nas aberturas do conector ou na sua envolvente, [3,7,8,9,14,15]. Dessa forma, os conectores em chapa dentada, ou perfurada, permitem controlar a capacidade da conexão, variando-se a resistência do betão e a quantidade de armadura transversal, o que não é possível, por exemplo, com os pernos. No caso dos pernos, quando é a resistência ao corte do conector que governa o colapso, o aumento na resistência do betão influencia muito pouco a capacidade de carga da conexão.

Na Figura 8 são apresentados alguns resultados de ensaios com o conector Crestbond do tipo CR50b [14,15]. A Figura 8.a refere-se a modelos com betão C35/45. Nota-se que a contribuição do betão inserido nas aberturas do conector é bastante significativa, sendo responsável por um acréscimo de 66% na capacidade de carga da conexão. A introdução da armadura transversal a passar nos furos produziu um ganho de 40% na capacidade de carga em modelos com betão da classe C35/45.

Nos ensaios realizados com o conector Crestbond, o escorregamento característico foi superior ao limite de 6 mm determinado pelo Eurocódigo 4, [2]. Ficou comprovado que a ductilidade da conexão cresce com a resistência do betão. Esse efeito é mais pronunciado nos modelos onde não há armadura transversal a passar nos furos.

Na Figura 8.b são apresentados resultados de modelos com conector Crestbond do tipo CR50b idênticos, exceto pela resistência do betão. Observa-se que o aumento da capacidade da conexão é proporcional ao aumento da resistência do betão. A variação da resistência do betão tem pouca influência no tocante à ductilidade da conexão.

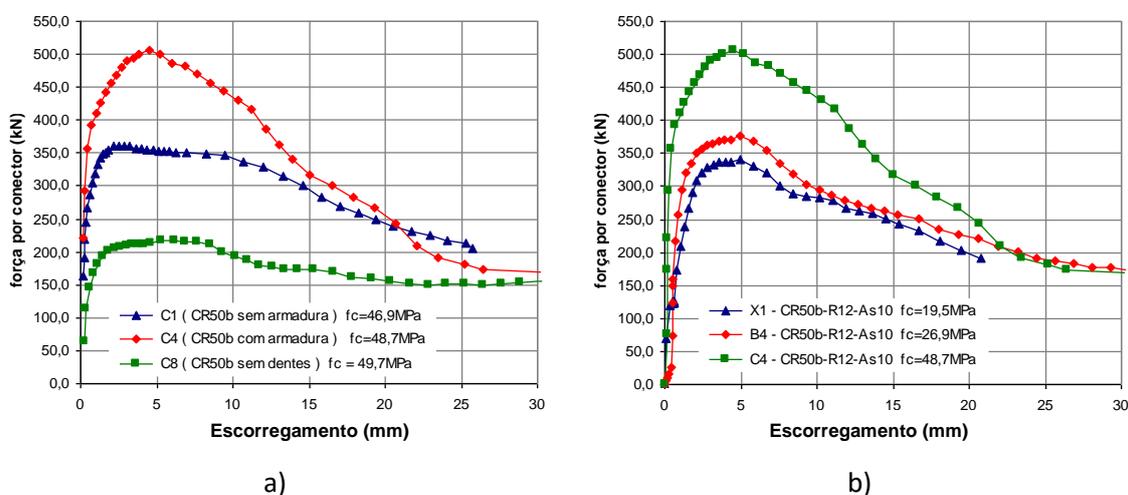


Figura 8: Curvas que relacionam força por conector e escorregamento em ensaios de tipo *push-out* com conectores Crestbond de 12 mm de espessura, [14,15]

7. Comportamento experimental de ligações por aderência

Um exemplo de ligação por aderência é ilustrado na Figura 9, onde se representa uma síntese de diferentes ideias para este tipo de ligação, tal como proposta por Thomann [17]. Esta ligação foi estudada com o objetivo de adaptar os sistemas mistos de aço e betão a um processo de pré-fabricação.

Numa ligação por aderência, a transmissão de esforços faz-se por contacto entre interfaces. Este tipo de ligação foi estudada por Thomann [17], Papastergiou [18] e Diógenes [19].

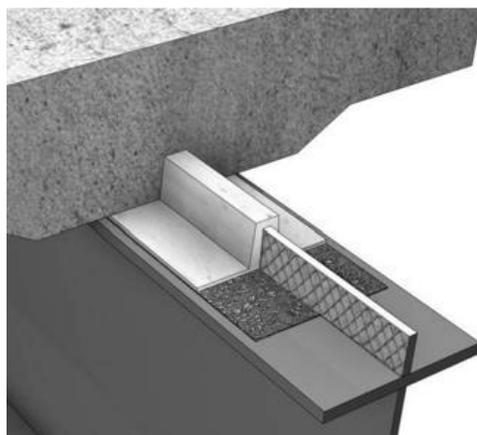


Figura 9 - Exemplo de uma ligação por aderência [17]

O exemplo representado na Figura 9 corresponde a uma laje de betão pré-fabricada que inclui um rasgo longitudinal na sua face inferior. Por sua vez, um conector linear e superfície com textura é soldado ao banzo superior da viga metálica. Posteriormente, a laje apoia sobre a viga metálica e o conector linear encaixa no rasgo da laje de betão pré-fabricada.

Entre o banzo superior da viga metálica e a envoltura do conector e a laje de betão pré-fabricada, aplica-se uma camada de argamassa, de forma a aumentar o coeficiente de atrito entre a superfície do conector e da viga e a superfície da laje de betão, e consequentemente, aumentar a resistência da ligação.

A resistência da ligação resulta do corte longitudinal que se desenvolve em dois tipos de interface: a interface entre a chapa de aço (de superfície com textura) e a argamassa e a interface entre a argamassa e a superfície interior da nervura. O interior da nervura de betão é também previamente preparado (antes da betonagem) obtendo-se uma superfície com textura.

Diógenes [19] realizou ensaios de tipo *push-out* com conectores lineares contínuos. Por comparação, testou provetes com conector de chapa lisa (L), provetes com conector de chapa com textura (R) e provetes com conector de chapa com textura e aberturas circulares (RP).

No geral, a fissuração foi mais distribuída e com menor abertura para o conector do tipo L em virtude deste ter mobilizado maior escorregamento, e mais concentrada para os conectores do tipo R e RP. Nos provetes com conector de tipo L, há uma grande concentração de argamassa aderida ao bloco de betão, na região da nervura, o que aliado à integridade do bloco indica que o mecanismo que condicionou a capacidade resistente da ligação foi principalmente a aderência mecânica entre a superfície do conector e a argamassa.

Ao contrário do observado para o conector do tipo L, a forte presença da argamassa aderida ao conector indica que a superfície da laje foi neste caso a componente de menor resistência da interface, tanto para a ligação do tipo R como para a ligação do tipo RP.

Na Figura 10 representam-se as curvas que relacionam força por conector e escorregamento em ensaios de tipo *push-out* com os conectores mencionados.

O início da rotura coincide com o momento em que se atinge o valor de resistência última da ligação. É um processo irreversível e seguido por uma drástica diminuição da resistência e o contínuo aumento do escorregamento. Considerando o critério de ductilidade proposto no Eurocódigo 4 [1], todos os conectores avaliados são caracterizados como não dúcteis.

Verifica-se que as ligações por aderência apresentam elevada resistência última, quando comparadas com as ligações que utilizam pernos. No entanto, a rugosidade da laje de betão é um fator limitador da resistência. Provavelmente, uma interface mais rugosa proporcionaria valores mais significativos da resistência da ligação.

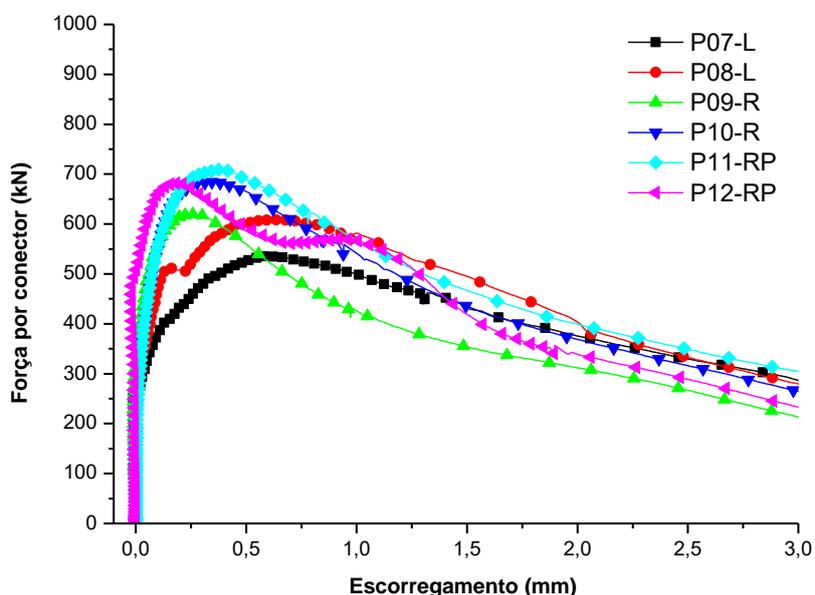


Figura 10: Curvas que relacionam força por conector e escorregamento em ensaios de tipo *push-out* com conectores Crestbond de 12 mm de espessura [19]

Referências

- [1] NP EN 1994-1-1:2011. *Projeto de estruturas mistas aço-betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. IPQ.
- [2] EN ISO 14555:2000. *Welding - Arc stud welding of metallic materials*. European Committee for Standardisation. CEN.
- [3] Valente, I.B., Cruz, P.J.S. *Experimental Analysis of Shear Connection between Steel and Lightweight Concrete*. Journal of Constructional Steel Research, nº 10/11, Vol. 65, 2009, pp. 1954-1963.
- [4] Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben *Untersuchungen zur Duktilität der Verbundmittel bei Anwendung vor hochfestem Stahl und hochfestem Beton*. AIF-Nº12124; Aachen, Novembro 2000.
- [5] Hegger, J.; Sedlacek, G.; Döinghaus, P.; Trumpf, H. *Studies on the ductility of shear connectors when using high-strength concrete*. International Symposium on connections between steel and concrete, University of Stuttgart, 10-12 Setembro 2001; Vol.2, pp 1025-1045.
- [6] Galjaard, J.C.; Walraven, J.C. *New and existing shear connector devices for steel-concrete composite structures – results, observations and comparison of static tests*. First Int. Conf. on Structural Engineering, Kunming, China, October 2000, ISSM 1000-4750.
- [7] Valente, I.B. *Experimental studies on shear connection systems in steel and lightweight concrete composite bridges / Estudo experimental de sistemas de conexão para pontes mistas de aço e betão leve*. Tese de doutoramento. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Julho 2007.
- [8] Leonhardt, F.; Andrä, W.; Andrä, H.P.; Harre, W. *Neues vorteilhaftes verbundmittel für stahlverbundtragwerke mit höher dauerfestigkeit (New advantageous shear connection for composite structures with high fatigue strength)*. Beton und Stahlbetonbau 62, Nº 12, 1987, pp. 325-331.
- [9] Oguejiofor, E.C.; Hosain, M.U. *A parametric study of perfobond rib shear connectors*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 21, 1994, pp. 614-625.
- [10] 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., pp.240-252.
- [11] Nishido, T.; Fujii, K.; Ariyoshi, T. *Slip behaviour of Perfobond rib shear connectors and its treatment in FEM*. Conference on Composite Construction in Steel and Concrete IV. May-June 2000. Banff, Alberta, pp. 379-390.
- [12] Machacek, J.; Studnicka, J. *Perforated shear connectors*. Steel and Composite Structures, an International Journal, Vol. 2, Nº1, February 2002, pp 51-66.
- [13] Marecek, J., Samec, J., Studnicka, J. *Perfobond shear connector behaviour*. Eurosteel 2005 - European Conference on Steel Structures, Maastricht, The Netherlands, June 2005, Volume B, pp. 4.3-1-4.3-8.

- [14] Veríssimo, G.S.; Paes, J.L.R.; Valente, I.B.; 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, July 2006 (CD-Rom).
- [15] Veríssimo, G.S.; Valente, I.B., Paes, J.L.R.; Cruz, P.J.S.; Fakury, R.H. *Análise experimental de um conector de cisalhamento em chapa de aço endentada para estruturas mistas de aço e concreto*. XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Campinas, Brasil, May 2006, pp. 410-419.
- [16] Hauke, B. *Shear connectors for composite members of high strength materials*. Eurosteel 2005 - European Conference on Steel Structures, Maastricht, The Netherlands, June 2005, Volume B, pp. 4.2-57-4.2-64.
- [17] Thomann, M.; Lebet, J.-P. *The modelling of an embossed steel-to-cement paste confined interface loaded in shear*. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, no. 5, May 2007, pp. 639–646.
- [18] Papastergiou, D.; Lebet, J.-P. *Design and experimental verification of an innovative steel-concrete composite beam*. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 93, Feb. 2014, pp. 9–19.
- [19] Diógenes, H.J.F., El Debs, A.L.H.C., Valente, I.B. (2015). *Experimental analysis of new interfaces for connections by adhesion, interlocking and friction*. Journal of Constructional Steel Research, Volume 101, July 2015, pp. 170-181.