



## DUCTILIDADE DE CONECTORES METÁLICOS

Isabel B. Valente<sup>a,\*</sup>, Talita L. Silva<sup>b</sup> e Hidelbrando F. Diógenes<sup>c</sup>

<sup>a,b</sup> *Universidade do Minho 1 e 2*

<sup>c</sup> *Universidade da Paraíba, Brasil 3*

\* Autor para contacto. Tel.: +351 253510203; E-mail: isabelv@civil.uminho.pt

**Resumo.** Este artigo reúne resultados experimentais obtidos em ensaios de tipo push-out realizados com diferentes tipos de conectores metálicos e analisa o seu comportamento, tendo em consideração a classificação de ductilidade proposta na futura versão da norma EN1994-1-1. Com base nessa análise, estabelece-se uma comparação entre os resultados obtidos e faz-se uma reflexão sobre o dimensionamento de vigas metálicas com diferentes tipos de conectores.

### 1. Introdução

O funcionamento conjunto de um perfil de aço e uma laje de betão é obtido através da utilização de conectores metálicos que permitem a transferência de esforços entre os dois elementos. Os conectores metálicos devem resistir ao esforço de corte longitudinal que se mobiliza entre as duas secções e também a esforços transversais ao plano da laje que tendem a causar a separação entre a laje e o perfil metálico.

Para estudar o comportamento da conexão aço-betão recorre-se ao ensaio de tipo “push-out”, realizado de acordo com o Anexo B da norma EN 1994-1-1, pois este permite observar e avaliar o comportamento da conexão e dos mecanismos de rotura associados.

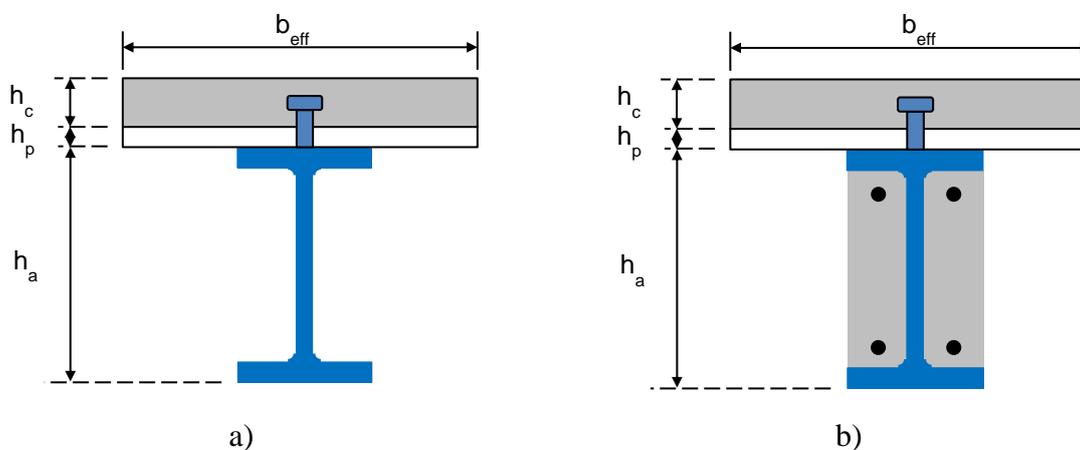
A norma EN 1994-1-1 [1] está atualmente em processo de revisão. A nova versão criará uma classificação da ductilidade de elementos de conectores metálicos que não existia na versão vigente [2]. Esta classificação é realizada com base em resultados experimentais de ensaios de tipo push-out e tem implicações na forma como o elemento estrutural pode ser dimensionado, nomeadamente, quando se dimensionam elementos com conexão parcial.

Este artigo analisa resultados experimentais de diferentes tipos de conectores metálicos e estabelece uma comparação entre os resultados obtidos, tendo em conta a classificação de ductilidade proposta na nova versão da EN1994-1-1. Com base nos resultados obtidos, faz-se uma reflexão sobre o dimensionamento de vigas metálicas com diferentes tipos de conectores.

## 2. Princípios de dimensionamento

Em geral, uma viga mista é constituída por uma secção transversal em aço e um banzo em betão, conforme se representa na Fig. 1. Outras soluções são possíveis, como por exemplo a de embeber parcialmente a secção metálica em betão (Fig. 1.b). O perfil de aço é associado à laje de betão por meio de conectores metálicos. Estes elementos permitem garantir o funcionamento conjunto do perfil metálico e da laje de betão, proporcionando a transferência de esforços entre eles. Atualmente, existem diversas tipologias de conectores que podem ser utilizados numa estrutura mista. Os mais usados são os pernos de cabeça, produzidos por empresas conhecidas como Nelson, Köco, Hilti, etc. É ainda necessário colocar armadura transversal na laje de betão, de forma a garantir uma boa transmissão dos esforços de corte.

A capacidade resistente da viga mista depende do nível de conexão que é garantido pelos conectores metálicos. As vigas podem ser dimensionadas para a situação de conexão total, onde a totalidade dos esforços de corte é transmitida pelos elementos de conexão e o modo de rotura da viga é condicionado pela sua resistência à flexão ou ao corte vertical, ou para a situação de conexão parcial, onde o modo de rotura é condicionado pela conexão. Neste último caso, a resistência à flexão do elemento estrutural é inferior àquela que teria se o dimensionamento fosse realizado para uma situação de conexão total.



**Fig. 1:** Secção transversal comum numa viga mista

A conexão entre o perfil metálico e a laje de betão garante que estes funcionam em conjunto, transmitindo as forças de corte longitudinal entre o betão e o elemento de aço estrutural, e a ligação natural entre os dois elementos é ignorada. Para além de transmitir os esforços de corte entre o perfil metálico e a laje de betão, os conectores devem ser capazes de prevenir a separação vertical entre a laje de betão e o perfil metálico.

Os conectores dúcteis são aqueles que apresentam uma capacidade de deformação suficiente para justificar a hipótese de comportamento plástico ideal da ligação ao corte na estrutura considerada. A futura nova versão do Eurocódigo 4 estabelece a classificação dos conectores metálicos de acordo com a Tabela 1, onde são definidas as classes D1, D2 e D3. Considera-se que o conector é dúctil quando pertence às classes D2 ou D3.

As categorias de ductilidade indicadas na Tabela 1 são genericamente representadas na Fig. 2.

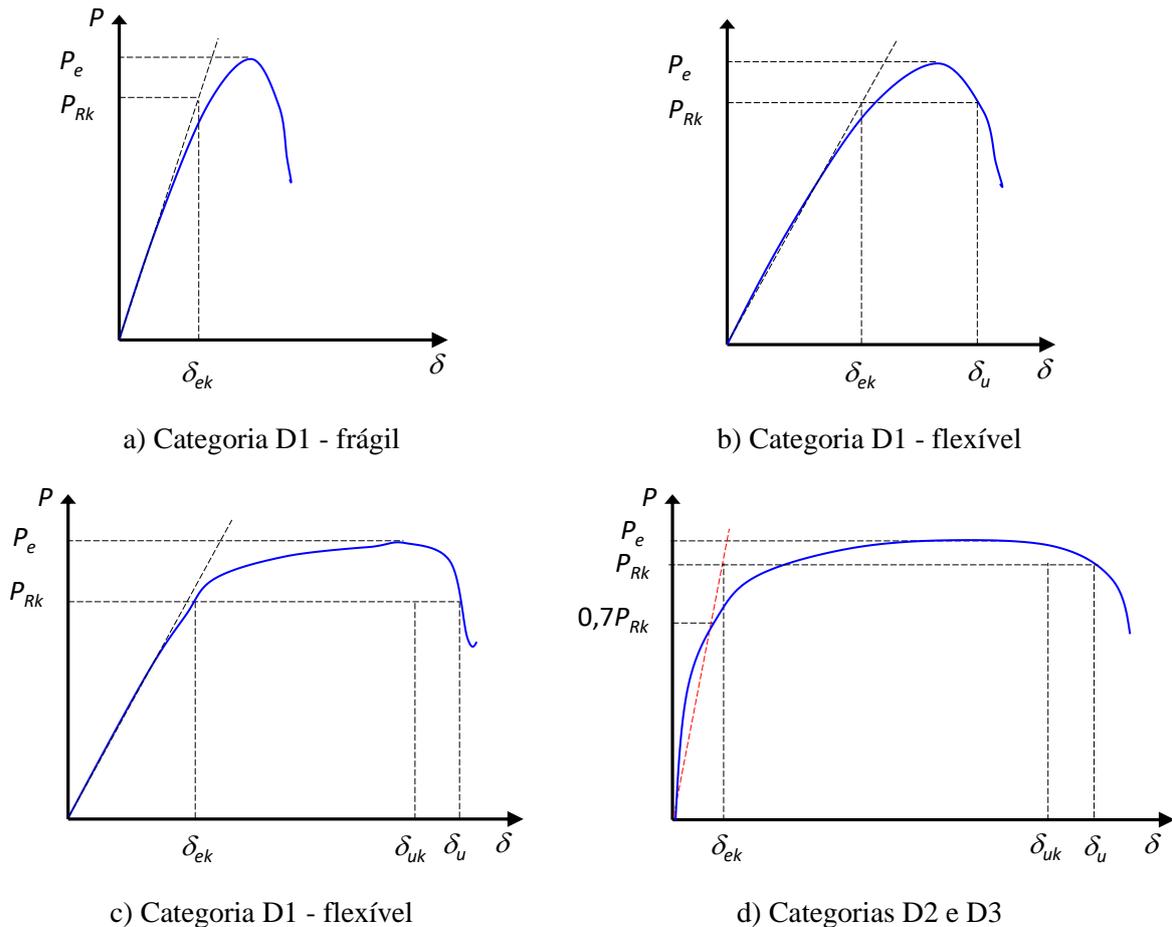
**Tabela 1:** Categorias de ductilidade propostas na nova versão da EN1994-1-1

Categoria	Valor característico do escorregamento elástico quando se atinge o valor característico da capacidade de carga	$\delta_{uk}$ Valor característico do escorregamento último em estado limite último	Definição
D0 D1		$\delta_u > \delta_{ek}$	Conector frágil  Conector flexível com evolução linear na curva que relaciona carga e escorregamento  Conector flexível com evolução bilinear ou trilinear na curva que relaciona carga e escorregamento
D2	$\delta_{ek} < 2,5 \text{ mm}$	$\delta_{uk} \geq 6,0 \text{ mm}$ $\delta_{uk} < 10 \text{ mm}$	Conector dúctil com capacidade de deformação suficiente para justificar o pressuposto de funcionamento plástico da conexão. A conexão atinge o valor característico da sua capacidade de carga, $P_{Rk}$ , em dois momentos: no ramo ascendente da curva que relaciona carga e escorregamento ( $\delta_{ek}$ ) e no ramo descendente da mesma curva, antes da rotura ( $\delta_{uk} \geq 6 \text{ mm}$ )
D3	$\delta_{ek} < 2,5 \text{ mm}$	$\delta_{uk} \geq 10 \text{ mm}$	Conector dúctil com capacidade de deformação suficiente para justificar o pressuposto de funcionamento plástico da conexão. A conexão atinge o valor característico da sua capacidade de carga, $P_{Rk}$ , em dois momentos: no ramo ascendente da curva que relaciona carga e escorregamento ( $\delta_{ek}$ ) e no ramo descendente da mesma curva, antes da rotura ( $\delta_{uk} \geq 10 \text{ mm}$ )

$\delta_{ek}$  e  $\delta_{uk}$  são definidos na Figura 2.

O dimensionamento de vigas mistas pode ser realizado assumindo o comportamento plástico da conexão, o que resulta numa distribuição plástica dos esforços de corte ao longo da viga. Esse pressuposto só é possível quando são utilizados conectores dúcteis. Essa condição de ductilidade é garantida quando são utilizados conectores da classe D2 ou D3, de acordo com a Tabela 1.

De um modo geral, os conectores devem ter capacidade de deformação suficiente para justificar qualquer redistribuição inelástica dos esforços de corte que seja assumida no projeto.



**Fig. 2:** Categorias de ductilidade de conectores metálicos

A versão atual do Eurocódigo 4 inclui disposições que permitem quantificar a capacidade resistente de pernos de cabeça quando embebidos num elemento maciço de betão ou nas nervuras de uma laje mista, mas não inclui informação acerca de outros tipos de conectores. No que toca à ductilidade, é apenas estipulado que um conector dúctil deve ser capaz de assegurar que o valor de escorregamento  $\delta_{uk}$  é sempre maior ou igual a 6 mm. No mesmo documento, é indicado que a avaliação do valor de  $\delta_{uk}$  deve ser realizada com recurso ao ensaio de tipo *push-out*.

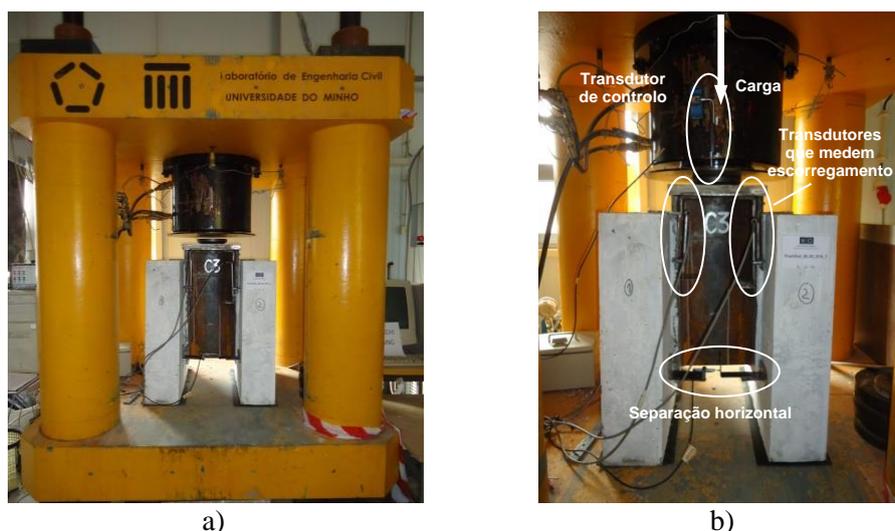
Na versão futura do Eurocódigo 4, está definido que os pernos embebidos em lajes maciças de betão, cuja classe de resistência não exceda C60/75 e a altura do conector não seja inferior a 3,9 vezes o diâmetro da respetiva haste, podem ser integrados na categoria D2. Os pernos embebidos em lajes mistas com chapa trapezoidal podem também ser incluídos na categoria D2 se a capacidade resistente do conector for calculada de acordo com o que está previsto neste regulamento.

O ensaio de tipo *push-out* permite obter, por via experimental as curvas que relacionam a carga aplicada e a correspondente deformação sofrida pelos elementos de conexão. É o ensaio standard que se realiza quando é necessário avaliar o comportamento de conectores metálicos.

### 3. Ensaio de tipo *push-out*

#### 3.1 Aspectos gerais

O comportamento da conexão aço-betão em viga mistas pode ser simulado através do ensaio de tipo *push-out*, que permite avaliar os mecanismos de rotura associados ao betão e aos conectores e também a relação entre a carga aplicada e o escorregamento entre a viga de aço e a laje de betão, ao longo do carregamento. Neste ensaio, 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], os provetes utilizados neste tipo de ensaio são compostos por duas lajes de betão armado posicionadas verticalmente e ligadas aos banzos de um perfil metálico através de conectores metálicos. Os conectores metálicos são soldados ao perfil metálico, em cada um dos banzos, e ficam posteriormente embebidos na laje de betão, após a betonagem, estabelecendo a ligação entre aço e betão. É um ensaio com simetria, onde 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. 3.a). As dimensões das lajes de betão correspondem a  $650 \times 600 \times 150 \text{ mm}^2$ .



**Fig. 3:** Estrutura de reacção e instrumentação para o ensaio de tipo *push-out*

Foram realizados vários ensaios de tipo *push-out* no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, ao longo do tempo. O equipamento utilizado 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 controlo de força ou 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. 3.b), ao longo do carregamento. Coloca-se também um transdutor para medir o deslocamento horizontal entre as lajes de betão, conforme a Fig. 3.b apresenta.

### 3.2 Procedimentos de ensaio

Para dar início ao ensaio, define-se um algoritmo composto por fases distintas, como é representado esquematicamente na Fig. 4. 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. A seguir, são realizados 25 ciclos de carga e descarga entre patamares de 5 e 30% do valor da carga de rotura esperada. De seguida, o ensaio passa a ser controlado pelo deslocamento do atuador, de acordo com velocidades pré-definidas. O ensaio prossegue pelo menos até que a carga aplicada seja inferior a 80% da carga máxima.

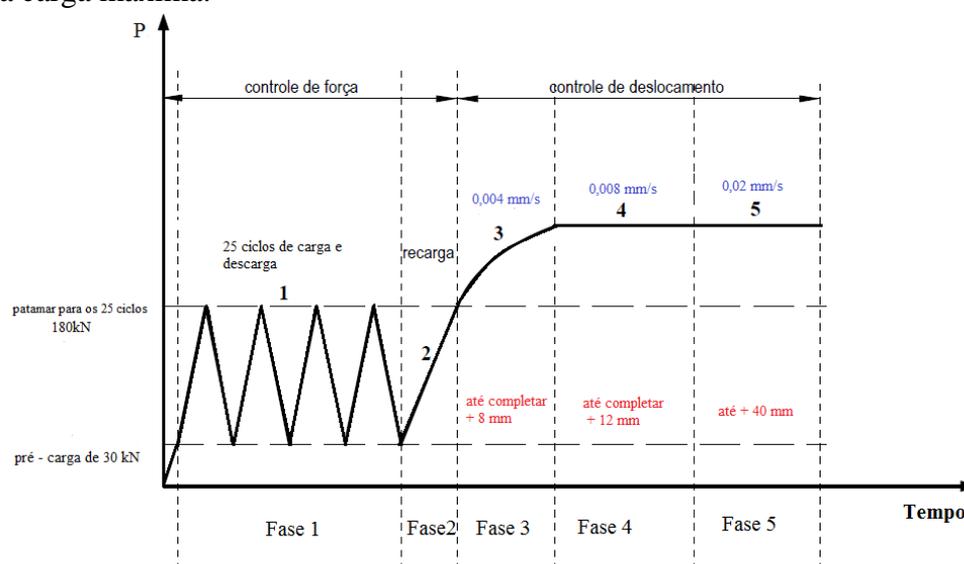


Fig. 4: Sequência de procedimentos no ensaio de tipo *Push-out*

## 4. Resultados experimentais obtidos em ensaio de tipo *push-out* e avaliação da ductilidade dos conectores

Nesta secção, procura-se avaliar a categoria de ductilidade de vários tipos de conectores metálicos, a partir de resultados experimentais obtidos com o ensaio de tipo *push-out* [3,4]. São analisados conectores dos seguintes tipos: pernos, T e Perfobond com dois níveis de armadura transversal. Da Figura 5 à Figura 9 representa-se, para cada caso, a curva que relaciona a carga aplicada e o escorregamento correspondente medido, no decorrer do ensaio. Em cada gráfico, representa-se ainda o patamar que corresponde à carga máxima medida durante o ensaio, o patamar correspondente ao valor característico da carga e o patamar correspondente 70% do valor característico da carga. No caso da categoria de ductilidade 1, o valor de  $\delta_{ek}$  referido na Tabela 1 corresponde ao escorregamento medido para o valor de carga  $P_{Rk}$  na fase ascendente da curva que relaciona força e escorregamento. No caso das categorias de ductilidade 2 e 3, o valor de  $\delta_{ek}$  referido na Tabela 1 é obtido a partir da reta que parte da origem e intersecta a curva carga escorregamento no ponto correspondente a  $0.7P_{Rk}$  na fase ascendente da curva que relaciona força e escorregamento, tal como se mostra na Figura 2.d.

Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos num ensaio com pernos de diâmetro igual a 19 mm, embebidos em betão com resistência à compressão,  $f_{cm}=53.6/57.2$  MPa (laje 1 e laje 2).

A análise da curva carga-escorregamento mostra os seguintes resultados,  $P_{max}=139.4$  kN,  $P_{Rk}=125.5$  kN,  $\delta_{ek}=0.64$  mm,  $\delta_{li}=7.80$  mm e  $\delta_{uk}=7.02$  mm. Estes resultados mostram que  $\delta_{ek}<2.5$  mm e  $\delta_{uk}>6$  mm, o que corresponde à Categoria de ductilidade 2.

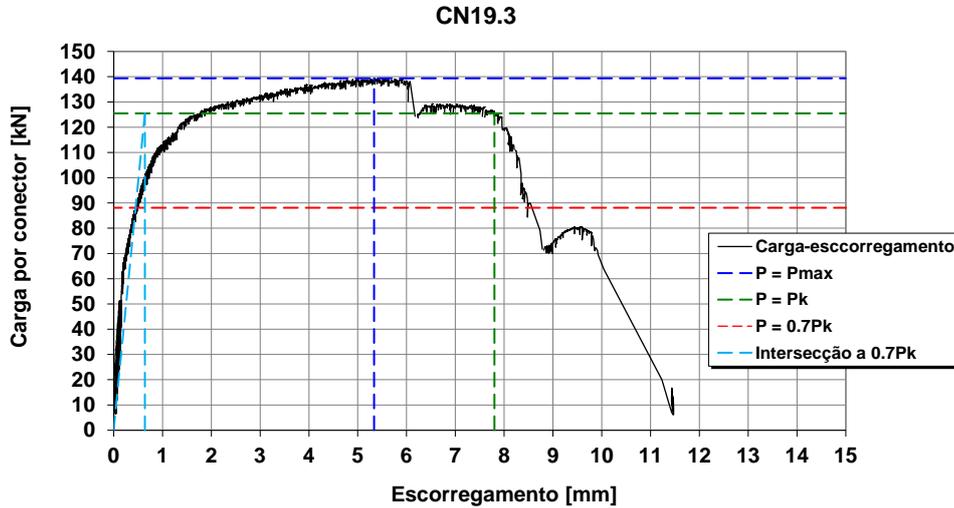


Fig. 5: Ensaio de tipo *push-out* com conector perno  $d=19$  mm

Na Fig. 6 apresentam-se os resultados obtidos num ensaio com pernos de diâmetro igual a 25 mm, embebidos em betão com resistência à compressão,  $f_{cm}=55.6/55.1$  MPa (laje 1 e laje 2).

A análise da curva carga-escorregamento mostra os seguintes resultados,  $P_{max}=192.1$  kN,  $P_{Rk}=171.0$  kN,  $\delta_{ek}=0.84$  mm,  $\delta_{li}=12.66$  mm e  $\delta_{uk}=11.40$  mm. Este resultado mostra que  $\delta_{ek}<2.5$  mm e  $\delta_{uk}>10$  mm, o que corresponde à Categoria de ductilidade 3.

Comparando o comportamento dos conectores de tipo perno com diâmetros diferentes, 19 e 25 mm, verifica-se que o no segundo caso, há uma maior fendilhação da laje de betão, que proporciona uma maior deformação da conexão. No ensaio com pernos de 19 mm de diâmetro, a rotura dos pernos condiciona o comportamento.

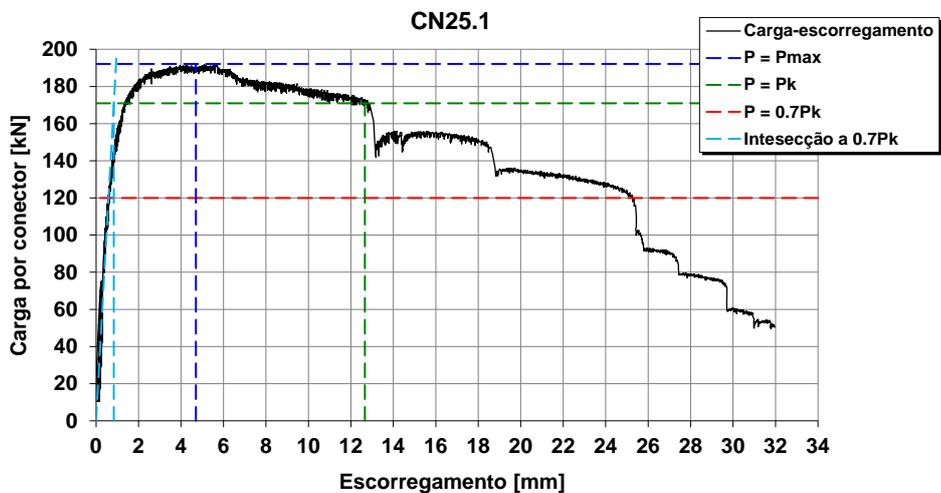
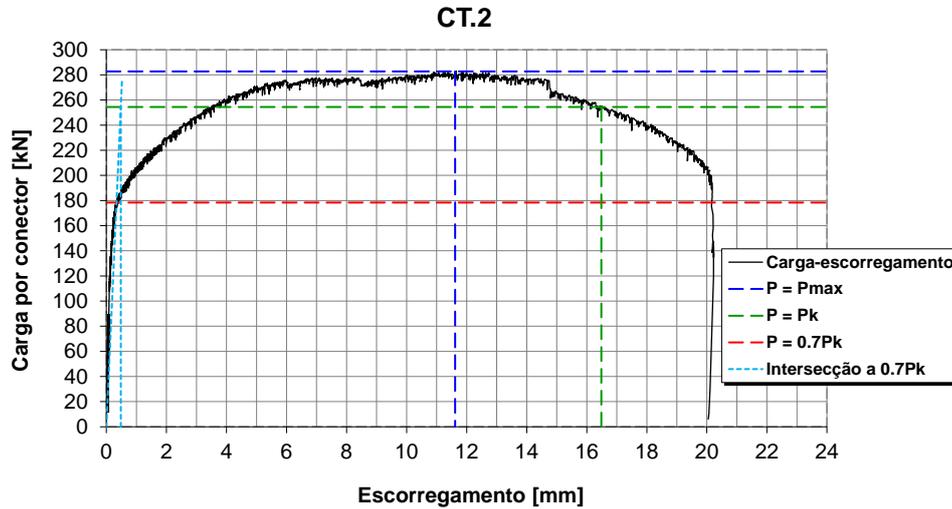


Fig. 6: Ensaio de tipo *push-out* com conector perno  $d=25$  mm

Na Fig. 7 apresentam-se os resultados obtidos num ensaio com conector T, embebidos em betão com resistência à compressão,  $f_{cm}=65.8/64.1$  MPa (laje 1 e laje 2).

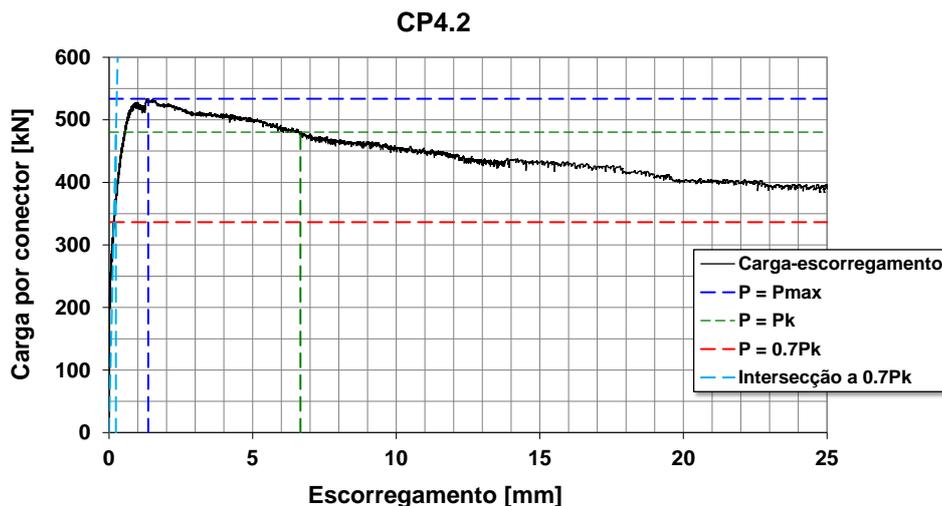
A análise da curva carga-escorregamento mostra que a carga máxima,  $P_{max}=282.7$  kN,  $P_{Rk}=254.4$  kN,  $\delta_{ek}=0.48$  mm,  $\delta_u=16.49$  mm e  $\delta_{uk}=14.84$  mm. Este resultado mostra que  $\delta_{ek}<2.5$  mm e  $\delta_{uk}>10$  mm, o que corresponde à Categoria de ductilidade 3.

O conector de tipo T apresenta uma elevada capacidade de deformação que resulta da compressão exercida pelo banzo do T e da deformação da alma do T.



Na Fig. 8 apresentam-se os resultados obtidos num ensaio com conector Perfobond, embebidos em betão com resistência à compressão,  $f_{cm}=58.4/57.4$  MPa (laje 1 e laje 2) e armadura transversal com diâmetro igual a 10 mm.

A análise da curva carga-escorregamento mostra que a carga máxima,  $P_{max}=533.6$  kN,  $P_{Rk}=480.3$  kN,  $\delta_{ek}=0.24$  mm,  $\delta_u=6.66$  mm e  $\delta_{uk}=6.00$  mm. Este resultado mostra que  $\delta_{ek}<2.5$  mm e  $\delta_{uk}>6$  mm, o que corresponde à Categoria 2.



Na Fig. 9 apresentam-se os resultados obtidos com conector Perfobond, embebidos em betão com resistência à compressão,  $f_{cm}=62.0/57.1$  MPa (laje 1 e laje 2) e armadura transversal com diâmetro igual a 12 mm.

A análise da curva carga-escorregamento mostra que a carga máxima,  $P_{max}=559.4$  kN,  $P_{Rk}=503.5$  kN,  $\delta_{ek}=0.10$  mm,  $\delta_u=12.28$  mm e  $\delta_{uk}=11.06$  mm. Este resultado mostra que  $\delta_{ek}<2.5$  mm e  $\delta_{uk}>10$  mm, o que corresponde à Categoria 3.

Comparando o comportamento dos conectores de tipo Perfobond com armadura de 10 mm e de 12 mm, verifica-se no segundo caso que a capacidade de carga é um pouco superior e que a perda de carga na fase de pós-pico é mais suave, o que leva a que o valor do escorregamento correspondente à carga característica seja maior. A maior quantidade de armadura transversal permite reter a capacidade de carga para maiores valores de deformação.

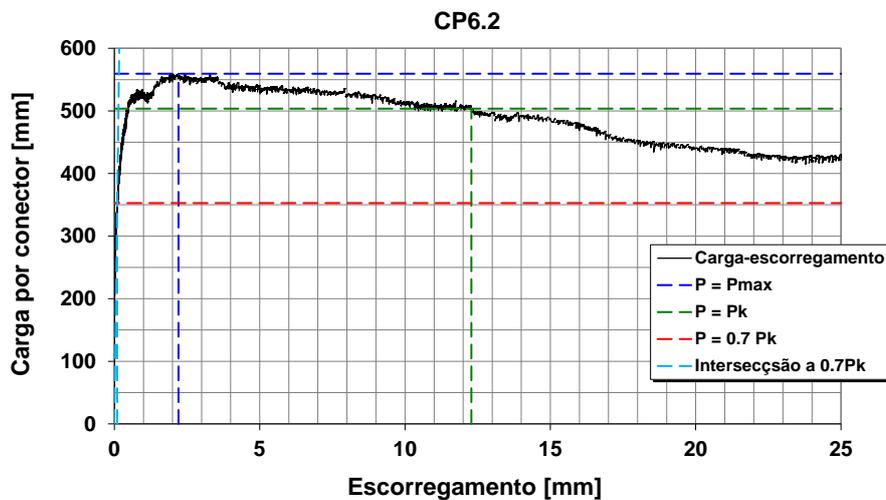


Fig. 9: Ensaio de tipo *push-out* com conector Perfobond e varões transversais com 12 mm de diâmetro

## 5. Conclusões

Os resultados apresentados mostram que todos os conectores testados, pernos, T e Perfobond, apresentam comportamento que os enquadra nas categorias de ductilidade 2 ou 3, o que permite considerar a sua utilização no dimensionamento de vigas mistas assumindo o comportamento plástico da conexão, o que resulta numa distribuição plástica dos esforços de corte ao longo da viga.

A avaliação da ductilidade e conseqüente classificação é muito influenciada pelo comportamento dos conectores e pelos modos de rotura associados a cada tipo de conector. Esses modos de rotura estão por sua vez dependentes da capacidade resistente dos materiais utilizados, nomeadamente, a classe de resistência do betão.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FCT - Fundação para Ciência e Tecnologia, ao abrigo do contrato da bolsa de doutoramento (SFRH/BD/148382/2019) atribuída ao autor <sup>b</sup>.

## Referências

- [1] NP EN 1994-1-1: 2011 - Eurocódigo 4 - Projecto de estruturas mistas aço-betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.
- [2] EN 1994-1-1: 2011 - Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. Documento em revisão, versão julho 2023.
- [3] I. Valente, 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. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Julho de 2007. <http://hdl.handle.net/1822/8478>
- [4] Valente, I. B., Cruz, P. J. S. (2009). Experimental Analysis of Shear Connection between Steel and Lightweight Concrete. Journal of Constructional Steel Research, nº 10/11, Vol 65, 2009, pp. 1954-1963, ISSN 0143-974X. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.06.001>