

COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL DE CONFIGURAÇÕES INOVADORAS DE LIGAÇÕES DE EMENDA EM PERFIS TUBULARES

EXPERIMENTAL BEHAVIOUR OF INNOVATIVE SPLICE JOINTS BETWEEN TUBULAR SECTIONS

R. Simões¹, S. Jordão¹, J. Silva²

¹Prof. Auxiliar, ²Engenheiro Civil

ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra



RESUMO

As estruturas tubulares têm um comportamento estrutural muito eficaz, sendo no entanto o seu uso bastante penalizado por aspetos associados à conceção e execução das ligações. Com o presente trabalho pretende-se desenvolver e comprovar a eficácia de configurações inovadoras de ligações de emenda aparafusadas, em termos de desempenho estrutural estético. Nas ligações concebidas foram considerados parafusos de cabeça saliente, parafusos de cabeça de embeber e parafusos tipo “socket”. O comportamento experimental das ligações estudadas, em particular no que se refere à sua resistência e modo de colapso, é comparado com os modelos de dimensionamento previstos no Eurocódigo 3, Partes 1.1 e 1.8.

ABSTRACT

Tubular structures have an efficient structural behaviour; however, their use is frequently impaired due to the difficulties associated with the design and execution of joints. This work aims to develop and establish the effectiveness of innovative configurations of splice bolted joints between tubular sections, in terms of structural behaviour and aesthetic performance. Bolts with salient head, countersunk bolts and socket bolts were used in the conception and design of bolted joints. The experimental behaviour of the analysed joints, namely the resistance and the collapse modes, were compared with the corresponding design models in Eurocode 3, Parts 1.1 and 1.8.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Ligações de emenda

As estruturas metálicas constituídas por perfis tubulares (circulares, quadrados ou retangulares) apresentam vantagens incontornáveis, quer ao nível do seu desempenho estrutural quer ao nível estético. Entre as vantagens destacam-se: i) elevada resistência à torção; ii) elevada resistência

a fenómenos de instabilidade por flexão, flexão-torção e mesmo encurvadura lateral; iii) possibilidade de otimização das estruturas em termos de resistência e rigidez, bastando por vezes variar a espessura da parede da secção sem alterar as suas dimensões externas; iv) capacidade de reforço através do preenchimento do seu interior com betão; v) proteção contra a corrosão mais eficaz devido à ausência de arestas, entre outras.

De uma maneira geral, e comparando com perfis de secção aberta, os perfis de secção tubular permitem obter soluções estruturais mais leves, o que se traduz em menores custos de matéria-prima, transporte e montagem e consequentemente maiores vantagens em termos de sustentabilidade.

Em estruturas de grandes dimensões, a necessidade de dividir os elementos principais em módulos de dimensão adequada ao transporte, implica a existência de ligações de emenda. Sendo estas ligações para executar em obra, na sua conceção deve dar-se preferência à solução aparafusada em detrimento da solução soldada. As ligações de emenda aparafusadas mais habituais em elementos sujeitos a esforço axial recorrem a chapas de topo ou outras chapas acessórias; em geral constituem um elemento de interrupção geométrica, levando a que sejam preteridas em obras onde a componente estética seja determinante. Na Fig. 1 são ilustrados alguns tipos de ligações de emenda entre perfis tubulares.

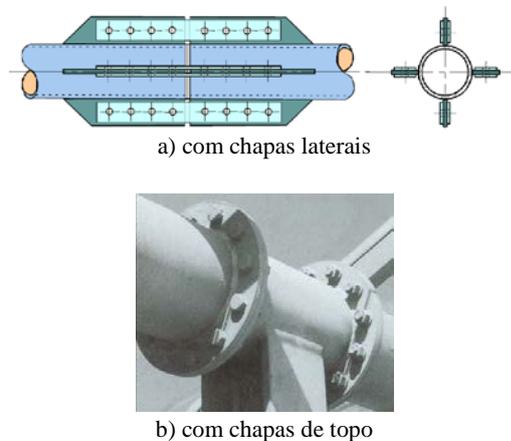


Fig. 1 – Ligações de emenda em perfis tubulares

No presente artigo é apresentada uma configuração inovadora para a execução de ligações de emenda entre dois perfis tubulares por aparafusamento (ver Fig. 2), mas com um aspeto bastante discreto (Silva, 2014). Esta solução difere das ligações ao corte convencionais pois, devido à inacessibilidade ao interior do tubo, os parafusos são roscados em placas de emenda interiores e não em porcas. O comportamento real desta configuração de

emenda será obtido com base em ensaios experimentais realizados no âmbito do presente trabalho e comparado com os modelos de cálculo regulamentares disponíveis (CEN, 2005a; CEN, 2005b).



Fig. 2 – Ligação de emenda proposta

Esta configuração de ligação de emenda resulta da evolução de trabalhos anteriores (Carvalho, 2012; Freitas, 2013), onde foram identificados os fatores mais influentes no comportamento estrutural deste tipo de ligação, como seja o tipo de parafuso, a espessura do perfil, a espessura da chapa interior de ligação, entre outros, o que permitiu melhorar sucessivamente a configuração de forma a obter valores elevados de resistência e rigidez.

1.2. Modelos de dimensionamento do Eurocódigo 3 para ligações ao corte

O procedimento de cálculo para ligações convencionais ao corte prescrito no Eurocódigo 3, Parte 1.8 (CEN, 2005a) considera os seguintes modos de rotura: i) resistência ao esmagamento ou pressão diametral $F_{b,Rd}$ (Eq. (1)); ii) parafusos ao corte $F_{v,Rd}$ (Eq. (2)); iii) resistência à tração do perfil e chapas de ligação interiores $N_{t,Rd}$, incluindo a resistência da secção útil A_{net} (Eq. (3)) (CEN, 2005b):

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}}, \quad (1)$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}, \quad (2)$$

$$N_{t,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \\ N_{u,Rd} = \frac{0.9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \end{array} \right\}, \quad (3)$$

em que k_1 , α_b e α_v são fatores de redução dependentes do posicionamento dos furos, f_u e f_y são as tensões de rotura e de cedência do aço do perfil ou chapas de

ligação, f_{ub} , d e A_s são a tensão de rotura, o diâmetro nominal e a área da secção útil do parafuso, A é a área da secção transversal bruta do parafuso, t é a espessura do tubo ou chapas de ligação e γ_{M2} e γ_{M0} são os coeficientes parciais de segurança.

2. ESTUDOS ESPERIMENTAIS

2.1. Ensaios preliminares

Conforme referido anteriormente, a configuração de ligação de emenda apresentada neste trabalho, resulta da evolução de um estudo preliminar que incluiu o teste de diversas configurações de base, onde foram usados parafusos de cabeça de embeber (CE), parafusos com cabeça de tremoço (CT) e parafusos “hollo-bolt flush-fit” (HB) (ver Fig. 3), com diâmetros de 8, 10 e 12 mm, de classes 8.8 ou 10.9, cuja descrição detalhada pode ser consultada em Simões et al., (2013). Na Fig. 4 ilustra-se um provete para ensaio (com parafusos de cabeça de tremoço) com o detalhe de colocação de dois transdutores de deslocamentos CDP 25 para medição da deformação da ligação. Neste conjunto de ensaios as chapas interiores cobrejuntas possuíam espessuras elevadas, da ordem de 3 a 4 vezes a espessura dos tubos a emendar, que era de 5 mm.



Fig. 3 – Parafusos usados em estudos anteriores



Fig. 4 – Provete de ensaio com parafusos de cabeça de tremoço

Na Fig. 5 são representadas as curvas força-deslocamento médias dos três grupos de ensaios (com os três tipos de parafuso) realizados nesta fase. Em todos os ensaios

a rotura ocorreu por corte nos parafusos, em alguns casos acompanhada por esmagamento da parede do perfil tubular. A partir das curvas representadas na Fig. 5 verifica-se que as ligações com parafusos de cabeça de embeber (CE) e com parafusos “hollo-bolt flush-fit” (HB) apresentam uma rigidez baixa, sendo atingida a força máxima para valores de deformação muito elevada. Este comportamento, não adequado do ponto de vista de aplicação prática, deveu-se fundamentalmente ao facto de os parafusos rodarem em torno de eixos perpendiculares ao eixo do tubo (ver Fig. 6), provocando muita deformação localizada na parede do perfil tubular e inclusivamente uma rotura prematura do parafuso junto à base da cabeça, zona influenciada pela redução de secção causada pelo furo sextavado executada na cabeça, para aperto do parafuso (Fig. 7).

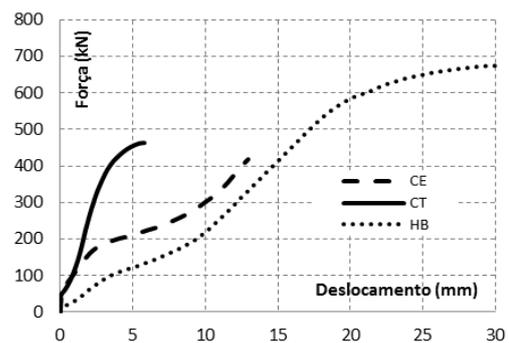


Fig. 5 – Curvas força-deslocamento

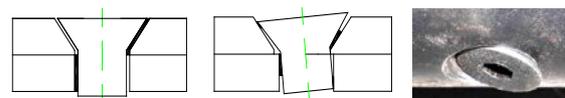


Fig. 6 – Efeito da rotação progressiva do parafuso



Fig. 7 – Rotura do parafuso

Nos ensaios em provetes com parafusos de cabeça de tremoço, a cabeça saliente impediu que estes rodassem, permitindo atingir a sua capacidade resistente ao corte, para deformações mais reduzidas que as

verificadas nos provetes com os parafusos de cabeça de embeber. Neste caso o comportamento mecânico foi satisfatório, pois a cabeça saliente impediu a rotação; contudo, esta configuração já não cumpre totalmente o requisito estético pretendido, que passa por ter uma ligação com os parafusos embebidos nas peças de ligação.

Em face dos resultados obtidos nesta fase, concluiu-se que, para se conseguir ligações de emenda entre perfis de secção tubular com parafusos de cabeça de embeber, que aliem o desejado efeito estético a um adequado comportamento mecânico, é fundamental que a chapa exterior (neste caso a parede do perfil tubular) possua uma espessura superior à altura do escareado da cabeça dos parafusos; desta forma consegue-se afastar o plano de corte da base da cabeça do parafuso e em simultâneo evitar a referida e indesejada rotação.

2.2. Ensaios experimentais na nova configuração

Com base nos testes preliminares desenvolveu-se uma nova configuração, que consistiu na introdução de 2 pequenos troços de tubo de elevada espessura (neste caso 20 mm), soldados ao perfil tubular na zona da emenda, com cordões de topo com penetração total. Desta forma, o escareado necessário para embeber os parafusos de cabeça de embeber (e analogamente os parafusos tipo “socket”) não utilizam a totalidade da espessura (ver Fig. 8), afastando o plano de corte da base da cabeça do parafuso.

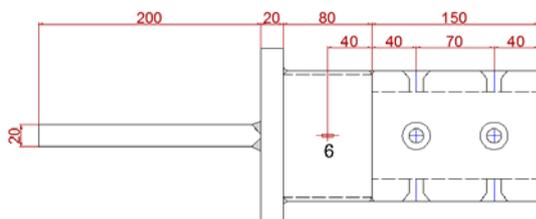


Fig. 8 – Geometria dos provetes

Foram realizados 4 grupos de ensaios (com 2 provetes em cada) num total de 8 ensaios, usando dois tipos de parafusos: de cabeça de embeber (CS) e de cabeça tipo “socket” (SH) com diâmetros de 12 e 16 mm. Na Tabela 1 é apresentada a descrição detalhada dos ensaios realizados. Os

provetes dos ensaios com parafusos M12, classe 8.8 (grupos 1 e 2) foram dimensionados de forma que o modo de rotura fosse o corte nos parafusos; por outro lado, os provetes para os ensaios dos grupos 3 e 4, com parafusos M16, classe 10.9, foram dimensionados de forma a que os provetes rompessem por esmagamento ou rotura por tração das chapas de emenda interiores. O aço dos perfis tubulares e chapas de ligação interiores é de classe S 275.

Na Fig. 9 é ilustrado o detalhe dos provetes durante a montagem. Nos ensaios os provetes foram submetidos a uma carga de tração crescente até à rotura, aplicada por intermédio de uma máquina universal, com uma velocidade de deformação de cerca de 0.01 mm/s. Na Fig. 10 é ilustrado um provete instalado na máquina de ensaio. Para além da medição da força e da deformação da ligação, medida entre as duas placa de ancoragem, foram medidas extensões em diversos pontos; as medições de extensão permitiram comprovar os modos de rotura verificados e serviram ainda para obter informação necessária pa-

Tabela 1 – Descrição dos provetes

	Grupos de ensaios			
	1	2	3	4
Designação	M12-CS-t6	M12-SH-t6	M16-CS-t6	M16-SH-t6
Modo de rotura esperado	Parafusos ao corte		Esmagamento ou rotura por tração	
Tipo de parafuso	Cabeça de embeber	Cabeça tipo “socket”	Cabeça de embeber	Cabeça tipo “socket”
Diâmetro (mm)	M12	M12	M16	M16
Classe	8.8	8.8	10.9	10.9
Chapas interiores (mm)	6	6	6	6
Perfil tubular (mm)	120x4			
Troço de tubo (mm)	121x20			



Fig. 9 – Detalhes da montagem dos modelos

ra a calibração de modelos numéricos entretanto desenvolvidos (Silva, 2014).

Como esperado, nos ensaios dos provetes com parafusos M12 de classe 8.8, a rotura ocorreu por corte nos parafusos, conforme se ilustra na Fig. 11; neste caso o esmagamento das chapas interiores foi pouco significativo. Nos ensaios dos provetes com parafusos M16 de classe 10.9, a rotura envolveu esmagamento, acabando por ocorrer rotura por tração das chapas interiores de emenda, ao longo da área útil reduzida na zona dos furos, como se pode visualizar na Fig. 12.



Fig. 10 – Provette instalado na máquina de ensaio



Fig. 11 – Parafusos e chapas após ensaios (M12)



Fig. 12 – Parafusos e chapas após ensaio (M16)

Os resultados dos ensaios realizados demonstraram que a utilização de um tubo exterior de espessura elevada, em relação à altura da cabeça dos parafusos, permitiu eliminar todos os problemas detetados nos ensaios preliminares, antes descritos de forma sintética no sub-capítulo 2.1. Neste conjunto de ensaios a ligação apresentou

um comportamento idêntico ao de uma ligação normal com parafusos ao corte.

A partir dos resultados dos ensaios obtiveram-se as curvas força-deformação que se ilustram nas Figs. 13 a 16.

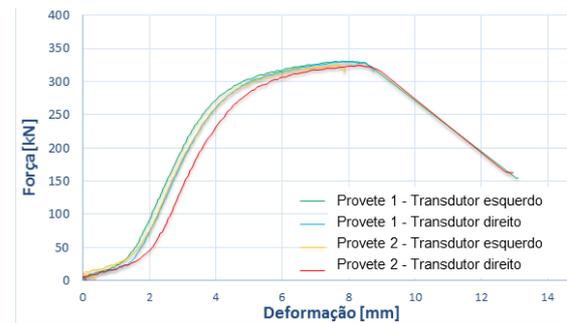


Fig. 13 – Ensaio do grupo 1, com parafusos M12 de classe 8.8, cabeça de embeber

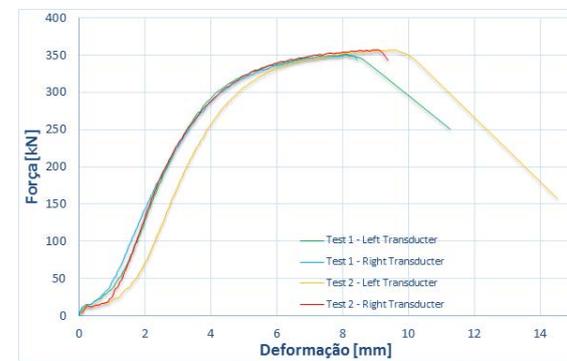


Fig. 14 – Ensaio do grupo 2, com parafusos M12 de classe 8.8, cabeça tipo “socket”

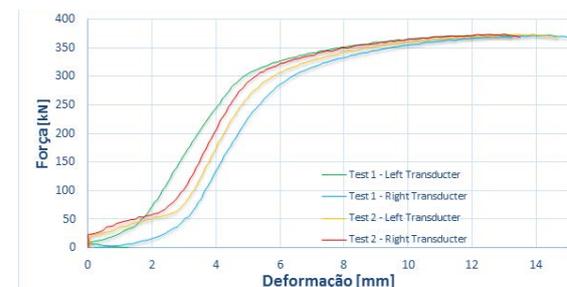


Fig. 15 – Ensaio do grupo 3, com parafusos M16 de classe 10.9, cabeça de embeber

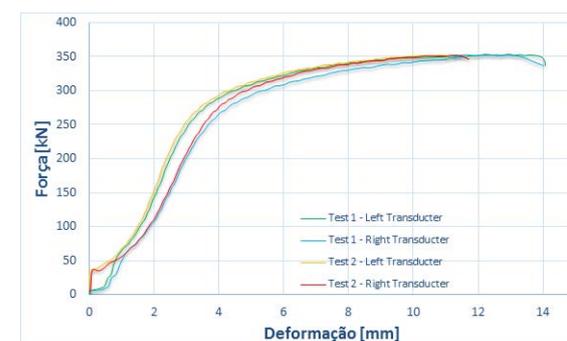


Fig. 16 – Ensaio do grupo 4, com parafusos M16 de classe 10.9, cabeça tipo “socket”

Nos ensaios dos grupos 1 e 2 a rotura ocorreu para valores de força de 330.17 kN e 351.12 kN, respetivamente. Nos ensaios dos grupos 3 e 4 a rotura ocorreu para valores de força de 370.55 kN e 351.08 kN, respetivamente; tendo em conta os modos de rotura verificados, as ligações dos grupos 3 e 4 apresentaram maior ductilidade.

3. COMPARAÇÃO COM OS MODELOS DE CÁLCULO DO EURO-CÓDIGO 3

Tendo em conta o desempenho estrutural das ligações ensaiadas fez-se uma comparação entre as forças máximas atingidas e os valores de resistência que seriam expectáveis por aplicação das formulações analíticas previstas no Eurocódigo 3, Parte 1.8 (CEN, 2005a) e Eurocódigo 3, Parte 1.1 (CEN, 2005b), descritas anteriormente no sub-capítulo 1.2 deste documento. Esta análise comparativa é apresentada na Tabela 2. Nesta tabela apresentam-se ainda previsões de resistência para as várias ligações ensaiadas, obtidas com base em modelos numéricos entretanto desenvolvidos (Silva, 2014), mas não apresentados neste documento.

Tabela 2 – Forças máximas experimentais, numéricas e analíticas

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Componentes	M12, cabeça de embeber, chapas 6 mm de espessura	M12, cabeça tipo “socket”, chapas 6 mm de espessura	M16, cabeça de embeber, chapas 6 mm de espessura	M16, cabeça tipo “socket”, chapas 6 mm de espessura
Experimental (kN)	330.17	351.12	370.55	351.08
Numérico (kN)	307.30	314.89	342.03	345.36
Razão (N/E)	0.93	0.89	0.92	0.98
Analítico (kN)	323.71	323.71	333.07	333.07
Razão (A/E)	0.98	0.92	0.89	0.94

Com base nas razões entre os valores analíticos e os valores experimentais

(razão A/E), apresentados na Tabela 2, verifica-se que existe uma boa concordância. Verifica-se igualmente uma boa concordância entre valores numéricos e valores experimentais (razão N/E).

4 - CONCLUSÕES

Em face dos resultados experimentais obtidos neste programa de ensaios podem ser estabelecidas as seguintes conclusões:

A ligação de emenda desenvolvida consegue aliar um bom aspeto estético a um bom desempenho estrutural.

Aumentando a resistência (espessura e/ou classe do aço) das chapas interiores de emenda, esta configuração tem potencial para desenvolver uma resistência à tração igual ou superior à resistência à tração do perfil tubular a emendar.

As formulações analíticas previstas no Eurocódigo 3, aplicáveis a ligações correntes com parafusos ao corte, permitem obter valores seguros para a resistência da ligação em causa, apesar de se tratar de uma tipologia com parafusos de cabeça de embeber ou tipo “socket”, sem porcas na extremidade oposta.

Do ponto de vista de execução esta configuração poderá exigir o cumprimento de tolerâncias muito reduzidas; contudo tem a vantagem de não necessitar de soldaduras em obra.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo FERPINTA pelo fabrico e fornecimento de todos os modelos experimentais e pela colaboração no desenvolvimento da solução.

REFERÊNCIAS

- Silva, J. D. F. (2014) “Study of splice bolted connections in truss steel structures with hollow sections”, Tese de Mestrado Integrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- CEN (2005a), EN 1993-1-8, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-8: Design of joints, European Committee for

- Standardization, Brussels (Norma Portuguesa NP EN 1993-1-8).
- CEN (2005b), EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels (Norma Portuguesa NP EN 1993-1-1).
- Carvalho A. (2012) “Avaliação Experimental de Configurações Inovadoras Para a Execução de Ligações de Emenda de Barras Metálicas de Secção Tubular”, Tese de Mestrado Integrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Freitas P. (2013) “Configurações inovadoras de ligações de emenda de barras metálicas de secção tubular”, Tese de Mestrado Integrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, 2013.
- Simões, R., Jordão S. e Freitas, P. (2013) “Avaliação do Comportamento de Ligações de Emenda entre Perfis Tubulares” em Simões da Silva, L., Silvestre, N., Santos, F. (eds.), IX Congresso de Construção Metálica e Mista / 1º Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável, pp II.59-68, cmm Press, Coimbra.