

Influence of distance between outer tubes in bolted sleeve connections under compression

Matheus Miranda de Oliveira¹, Ellen Caroline Rezende Neto², Raissa de Oliveira Simão², Lucas Roquete², Ellen Martins Xavier¹, Arlene Maria Cunha Sarmanho¹, Vinicius Nicchio Alves¹

¹ *Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

matheusmoliveira4@gmail.com, ellen.mxavier@hotmail.com, arlene.sarmanho@gmail.com, vnichio@hotmail.com

² *Departamento de Tecnologia em Engenharia Civil, Computação e Humanidades, Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Campus Alto Paraopeba, Ouro Branco, MG, Brasil.*

ellencrneto@gmail.com, raissaosimao@gmail.com, lucasroquete@gmail.com

Abstract. The sleeve connection with circular hollow sections (CHS) allows a harmony in the continuity of tubular profiles, becoming a discreet connection in the real structure and contributing to a new aesthetic identity for connections between these steel profiles. This connection was proposed to facilitate the execution and maintenance, reduce costs and enable other projects of the structures formed by CHS. This work presents a numerical study about the influence of distance between outer tubes in sleeve connections, with aligned bolts, under compression. Possible failure modes and the values necessary for the efficient operation of the connection without the possibility of outer tubes touching, changing the behavior of the connection, were evaluated. The study was carried out by a numerical analysis using the finite element method (FEM) in a commercial software, allowing the geometric parameters variations. With the study results, it was possible to evaluate the behavior of sleeve connection and to define a minimum distance between the outer tubes, contributing to the dimensioning and assembly of the connection in truss systems.

Keywords: sleeve connections, numerical analysis, bolted connections, circular hollow sections, steel structures

1 Introdução

O presente trabalho aborda uma análise sobre a influência da distância entre os tubos externos (L_{te}) da ligação luva com perfis tubulares circulares sob compressão. Os perfis tubulares de aço possuem maior leveza, melhor aspecto estético e são capazes de vencer grandes vãos [1]. Por esse motivo, sua utilização na construção civil tem sido empregada em sistemas treliçados e estruturas de shoppings, supermercados, aeroportos, estádios, passarelas de pedestres, entre outros [2].

O comportamento de treliças de perfis tubulares está diretamente relacionado com o desempenho das ligações, que podem ser feitas por meio de ligações tubo-tubo soldadas [3,4] ou parafusadas [5,6]. A dificuldade da realização dessas ligações e o seu custo podem ser considerados um empecilho para a utilização dos perfis tubulares, pois é necessário um tempo maior de planejamento para a fabricação da ligação, o que diminui o ritmo de produção, e consequentemente eleva o custo da estrutura [7].

Para proporcionar melhorias estéticas e de manutenção, facilitar a montagem de estruturas e possibilitar a continuidade do perfil de maneira harmoniosa e elegante, o modelo de ligação em luva foi proposto. A ligação tipo luva é formada por dois tubos externos tubulares circulares de aço unidos por meio de um tubo interno circular de diâmetro menor e parafusos passantes alinhados (Figura 1).

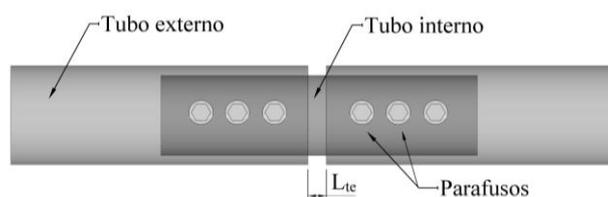


Figura 1: Ligação tipo luva com parafusos alinhados

Inicialmente, a ligação luva com perfis tubulares circulares foi estudada submetida a esforços axiais de tração, Vieira et al. [8] desenvolveram um modelo numérico em elementos finitos que permitiu identificar a falha de ruptura da seção líquida (RSL) do tubo externo nos modelos analisados e necessidade da determinação do coeficiente *shear lag*. Esse coeficiente foi avaliado por Silva [9], Amparo [10] e Roquete *et al.* [11], por meio de ensaios experimentais da ligação luva, além disso, os estudos identificaram a flexão dos parafusos (FP) como estado limite da ligação e também falhas por ovalização dos furos (OF). Em seguida, formulações para a determinação da força axial resistente dos modos de falha por RSL, OF e FP foram propostas por Vieira [7] e Roquete *et al.* [12], no entanto não apresentaram boas correlações. Nesse contexto, Roquete [13] desenvolveu um amplo trabalho com ensaios experimentais e modelagem numérica, o qual identificou e propôs formulações com boas correlações para todos os modos de falha da ligação encontrados, sendo eles: escoamento da seção bruta (ESB), cisalhamento dos parafusos (CP), RSL, OF e FP.

Subsequentemente, a ligação luva foi avaliada sob compressão por Oliveira [14] em um estudo numérico paramétrico utilizando o método dos elementos finitos, o qual identificou todos os modos de falha citados anteriormente, com exceção da falha por RSL. Oliveira *et al.* [15] apresentaram uma formulação para a determinação da capacidade resistente para a falha de OF. Todos os estudos anteriormente desenvolvidos avaliaram os modos de falha com características geométricas seguindo os padrões das prescrições normativas ABNT NBR 8800 [16].

Devido a possibilidade dos tubos externos se encostarem quando submetidos ao esforço axial de compressão, o presente trabalho avalia, por meio de um estudo paramétrico utilizando um modelo computacional de elementos finitos, o comportamento e os possíveis modos de falha da ligação luva com parafusos alinhados sob compressão, com a variação da distância entre os tubos externos, definindo uma limitação de projeto para essa distância.

2 Análise numérica

2.1 Estudo paramétrico

Foram desenvolvidos 31 modelos da ligação luva para o estudo paramétrico com 12 parafusos, com variações do diâmetro e espessura dos tubos, do diâmetro dos furos e da distância entre os tubos externos da ligação, todos as propriedades geométricas dos modelos estão apresentadas na Tabela 1. Os valores adotados para distância entre os furos e entre furo e borda estão acima do limite mínimo recomendado pela prescrição normativa ABNT NBR 8800 [16].

Tabela 1: Propriedades geométricas - Estudo paramétrico (continua).

Série	Modelos	Nº de parafusos	Tubo externo		Tubo interno		Parafusos		Distâncias			
			D_{ext} (mm)	t_{ext} (mm)	D_{int} (mm)	t_{int} (mm)	d_b (mm)	L_{f1} (mm)	L_{f2} (mm)	L_{te} (mm)	d_f (mm)	
S1	M01	12	73,0	4,50	60,3	4,5	11,5	31,05	34,5	10	11,5	
	M02									15		
	M03									10		
S2	M04	12	88,9	4,50	73,0	4,5	13,0	35,10	39,0	15	14,5	
	M05									20		
	M06									10		
S3	M07	12	88,9	5,00	73,0	4,5	13,0	35,10	39,0	15	14,5	
	M08									20		
	M09									5		
S4	M10	12	88,9	4,50	73,0	11,0	15,0	40,50	45,0	10	16,5	
	M11									15		
	M12									20		
	M13									25		
	M14									30		

Tabela 1: Propriedades geométricas - Estudo paramétrico (conclusão).

S5	M15	12	101,6	4,50	88,9	4,5	14,5	39,15	43,5	5	16,0
	M16									10	
	M17									15	
S6	M18	12	101,6	4,50	88,9	12,5	16,0	43,20	48,0	5	17,5
	M19									7,5	
	M20									10	
	M21									15	
S7	M22	12	101,6	6,00	88,9	12,5	16,0	43,20	48,0	10	17,5
	M23									15	
	M24									20	
	M25									25	
S8	M26	12	114,3	4,50	101,6	12,5	16,0	43,20	48,0	5	17,5
	M27									10	
	M28									15	
	M29									20	
S9	M30	12	114,3	6,00	101,6	12,5	16,0	43,20	48,0	5	17,5
	M31									15	
D _{ext} – diâmetro do tubo externo					l _{f1} – distância entre o centro do furo e a borda						
t _{ext} – espessura do tubo externo					l _{f2} – distância entre o centro do furo e o centro do furo adjacente						
D _{int} – diâmetro do tubo interno					l _e – distância entre os tubos externo						
t _{int} – espessura do tubo interno					d _f – distância do furo da ligação						
d _b – diâmetro dos parafusos											

As seguintes propriedades e características mecânicas do aço foram consideradas: para os tubos foram adotadas a tensão de escoamento no valor de 350 MPa e a tensão última de ruptura no valor de 485 MPa; para os parafusos considerou-se o aço ASTM A325, com tensão de escoamento no valor de 635 MPa e tensão última de ruptura no valor de 825 MPa. O módulo de elasticidade do aço utilizado foi de 200 000 MPa e o coeficiente de Poisson 0,3.

2.2 Modelo Numérico

Para o desenvolvimento do modelo numérico em elementos finitos foi utilizado o software comercial ANSYS 12.1. A representação das características do aço dos materiais foi feita por meio de um diagrama multilinear, conforme apresentado por Salmon e Johnson [17] e Roquete [13], permitindo a avaliação do comportamento do aço na fase elástica e plástica.

Os tubos foram representados utilizando o elemento finito SHELL 181, o qual possui quatro nós e seis graus de liberdade por nó, adequado para analisar estruturas de cascas finas e moderadamente espessas e que aceita malhas irregulares, possibilitando também a aplicação de forças em qualquer direção; os parafusos foram representados pelo elemento SOLID 186, o qual possui vinte nós com três graus de liberdade por nó, além da capacidade de simular materiais com característica do aço presente no estudo. Para simular o contato entre os parafusos e a seção transversal dos tubos foram utilizados o par de contato CONTA 175 e TARGE 170. A malha do em todos componentes da ligação foi definida de forma livre, detalhada na Figura 2.

Para definir as condições de apoio do modelo numérico, foram avaliados ensaios experimentais desenvolvidos por Roquete [13]. Portanto, uma das extremidades do tubo foi engastada, todos os deslocamentos e rotações impedidos, e a outra extremidade foi aplicado o deslocamento na direção axial para proporcionar a força de compressão, ilustrados na Figura 3. Em todos os modelos foram aplicados 30 mm de deslocamento e o método de solução adotado foi o Newton-Raphson.

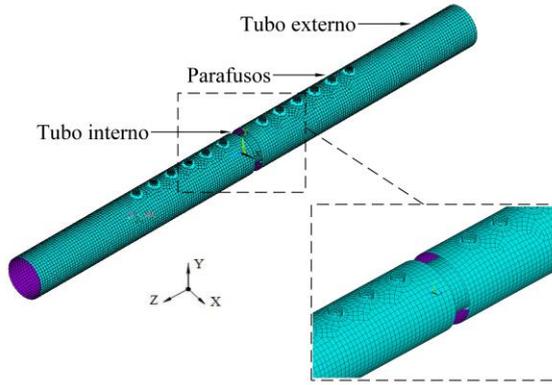


Figura 2: Detalhe da geração da malha

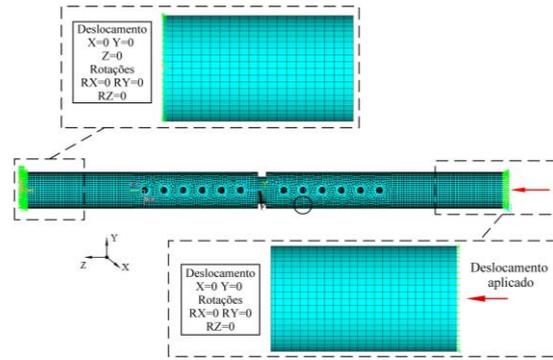


Figura 3: Detalhe das condições de contorno e aplicação de deslocamentos

3 Resultados e discussões

3.1 Comportamento da ligação

Os modelos numéricos permitiram a determinação do modo de falha e do valor da carga numérica (P_{num}). Foi possível observar que em todos os modelos o modo de falha predominante na ligação sob compressão foi o escoamento da seção bruta (ESB), ocorrendo tanto no tubo interno (TI) quanto no tubo externo (TE). Para comparação com o valor numérico obtido, o valor da resistência à falha por escoamento dos tubos foi calculado segundo a ABNT NBR 8800 [16]. Todos os resultados numéricos e teóricos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados numéricos e teóricos da ligação

Modelos	L_{te} (mm)	Modo de falha	Local da falha	P_{num} (kN)	P_{teor} (kN)	P_{num}/P_{teor} (kN)	$L_{te,FALHA}$ (mm)		
M01	10	ESB	TI	274,95	276,09	0,996	4,61		
M02	15			274,13				0,993	4,56
M03	10	ESB	TI	338,44	338,94	0,999	4,78		
M04	15			339,68				1,002	4,93
M05	20			338,42				0,998	4,8
M06	10			336,75				0,994	4,61
M07	15			331,21				0,977	4,43
M08	20	333,07	0,983	4,67					
M09	5	ESB	TE	428,36	417,61	1,026	4,65		
M10	10			418,08				1,001	4,55
M11	15			418,59				1,002	4,57
M12	20			425,72				1,019	4,67
M13	25			422,14				1,011	4,61
M14	30			418,62				1,002	4,59
M15	5			410,16				0,982	4,72
M16	10			417,21				0,999	5,00
M17	15	417,57	1,000	4,94					
M18	5	ESB	TE	483,89	480,45	1,007	4,90		
M19	7,5			480,51				1,000	4,90
M20	10			480,57				1,000	4,91
M21	15			481,14				1,001	4,88
M22	10			631,48				1,001	5,16
M23	15			630,88				1,000	5,17
M24	20			630,98				1,000	5,18
M25	25	630,86	1,000	5,17					
M26*	5	ESB	TE	543,47	543,29	1,000	5,21		
M27	10			543,53				1,000	5,24
M28	15			543,46				1,000	5,20
M29	20			543,40				1,000	5,22
M30*	5	ESB	TE	715,28	714,49	1,001	5,54		
M31	15			735,25				1,029	5,63
				Média		1,001	4,96		
				CoV		0,010	0,062		

*Modelos que os tubos externos se encostaram

O valor médio da relação entre os valores numéricos e teórico foi de 1,001 com coeficiente de variação (CoV) igual a 0,010, evidenciando a boa correlação entre o modelo de elementos finitos desenvolvido e a formulação teórica. Além disso, observou-se que a variação da distância entre os furos não influenciou significativamente no

valor da resistência da ligação.

O comportamento carga-deslocamento dos modelos das séries S1, S2, S3 e S4 estão ilustrados na Figura 4. Avaliando todas as séries observou-se que as séries S1, S2, S3 e S5 as falhas ocorreram no tubo interno, o momento da falha é caracterizado na mudança de direção na curva carga-deslocamento antes do pico de carga, indicados nas Figura 4 (a),(b),(c), todavia, o escoamento do tubo interno não diminui a capacidade resistente da ligação. No restante das séries, as falhas ocorreram no tubo externo da ligação, como pode ser observadas no pico de carga da série S4, ilustrada na Figura 4(d).

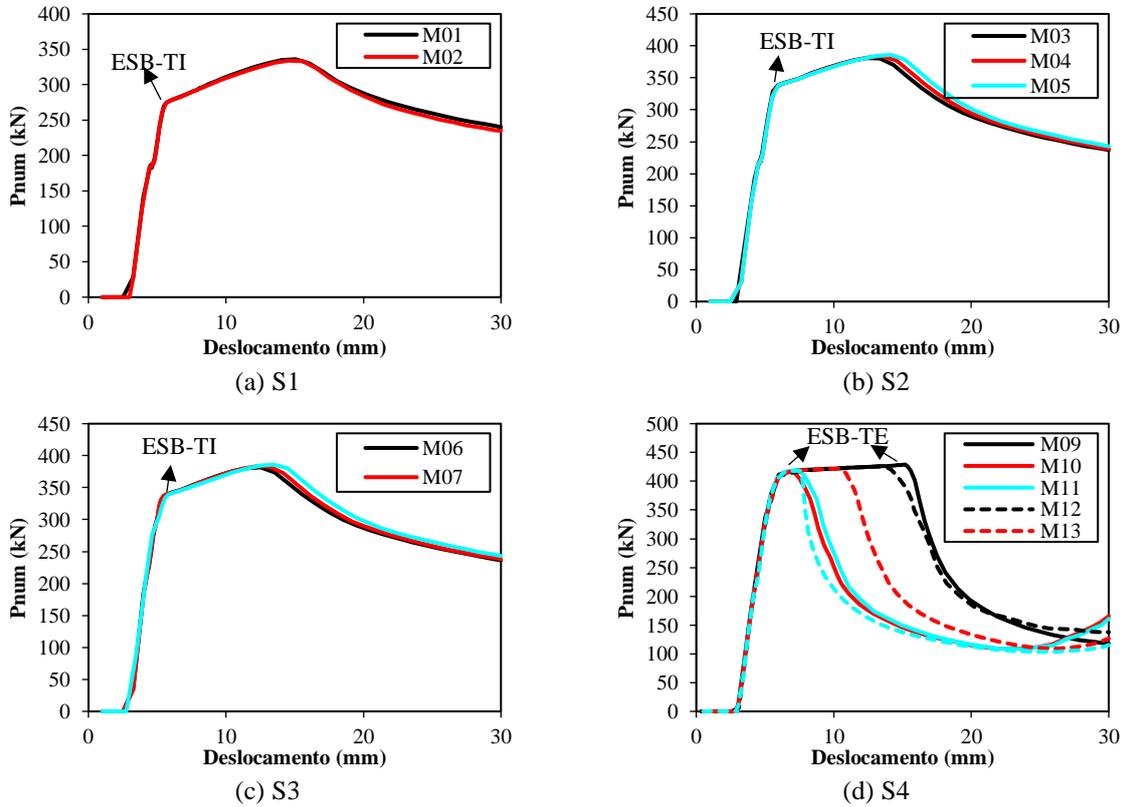


Figura 4: Curva carga axial versus deslocamento dos modelos numéricos: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4

Nesse estudo, a variação do local dos modos de falha por escoamento da seção bruta está relacionada com a diferença entre as áreas brutas dos tubos. Assim, para evitar que o mecanismo de falha ocorra no tubo interno da ligação, deve-se adotar como critério de projeto valores da área bruta dos tubos internos superior ao do tubo externo. Logo, as falhas ocorrerão no tubo externo, permitindo o monitoramento do comportamento dos tubos.

3.2 Tensões de von Mises

A distribuição de tensões de von Mises foi avaliada para melhor entendimento da ligação. Na Figura 5 é apresentada a evolução das tensões do tubo interno do modelo M05 a partir do momento de ocorrência do escoamento do tubo interno (tensões superiores a 350MPa), iniciando-se na região central e espreado para a região dos furos.

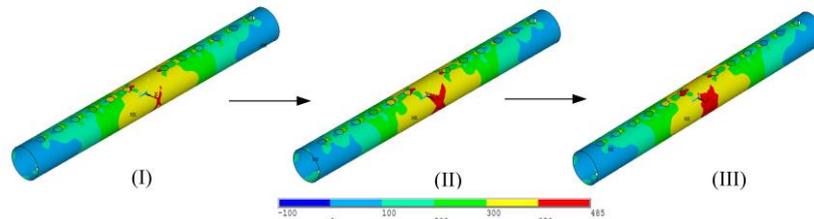


Figura 5: Evolução das tensões de von Mises no tubo interno do modelo M05

A configuração final dos modelos da Série 2 estão ilustradas na Figura 6. Observa-se que a variação da distância entre os tubos externos não influencia na distribuição de tensões, o tubo externo não alcançou as tensões de escoamento e o tubo interno apresentou plastificação total na região central.

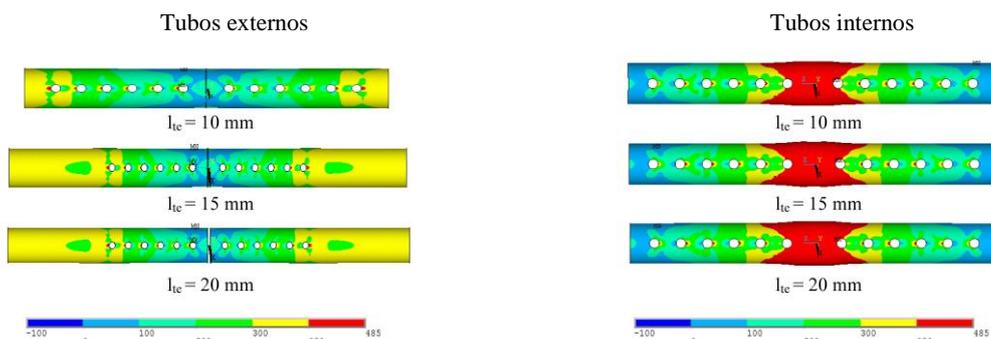


Figura 6: Distribuição de tensões de von Mises dos modelos da Série 2

Os modelos da série 4 apresentaram falha por escoamento da seção bruta no tubo externo da ligação, os detalhes das distribuições de tensões dos modelos M13 e M14 estão mostrados na Figura 7. Mesmo variando a distância entre os tubos externos as tensões se concentraram em regiões após o último furo da ligação, evidenciando a falha do tubo externo. Logo, não houve falha do tubo interno da ligação luva, que apresentou tensões inferiores à de escoamento.

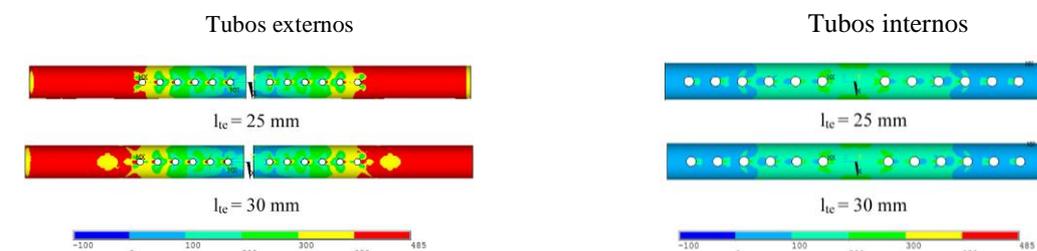


Figura 7: Distribuição de tensões de von Mises dos modelos M13 e M14 da Série 4

3.3 Distância entre os tubos externos

A distância entre os tubos externos foi avaliada no momento da falha da ligação. A ligação com 12 parafusos estudada, que possui uma rigidez elevada, apresentou pequenos deslocamentos. Além disso, os resultados permitiram observar um padrão de deslocamento dos tubos, quando a falha ocorre por escoamento da seção bruta, todos resultados das distâncias entre os tubos externos estão mostrados na Tabela 2.

Nos modelos que apresentaram falha por escoamento da seção bruta no tubo interno, o deslocamento dos tubos externos continuou até o pico de carga da ligação. Porém, conforme foi proposto como diretriz de projeto o direcionamento da falha para o tubo externo da ligação, esses modelos foram descartados da análise para definição da distância mínima entre os tubos.

Além disso, observou-se que os tubos externos se encostaram nos modelos M26 e M30. Assim, esses modelos também foram descartados da análise. Logo, o valor médio da distância entre tubos externo da ligação luva no momento do pico de carga foi 4,96 mm com coeficiente de variação de 0,062.

Portanto, considerando o furo padrão ($d_b+1,5\text{mm}$) e falha por escoamento da seção bruta no tubo externo, propõe-se adotar distância entre tubos externos de no mínimo 10mm, sendo a favor da segurança. Além disso, ressalta-se que aumento de três vezes essa distância também não influenciou nos resultados da ligação.

4 Conclusões

O modelo numérico desenvolvido representou de forma satisfatória o comportamento da ligação. Todos os modelos apresentaram falha por escoamento da seção bruta, com valor médio da relação entre os resultados numéricos e teórico de 1,001 e CoV de 0,010.

A variação da distância entre os tubos externos não influenciou o comportamento da ligação, observadas nas

curvas carga-deslocamento de alguns modelos. Porém, foi possível determinar o momento e o local das falhas nos tubos, propondo-se um direcionamento de projeto: considerando as mesmas características dos materiais dos tubos, os tubos internos devem possuir área bruta superior ao do tubo externo.

As tensões de von Mises dos modelos simulados pôde ser avaliada. Nos modelos que apresentaram falha no tubo interno, as tensões de escoamento iniciaram na região central do tubo e espalharam para a região dos furos. No tubo externo, o escoamento ocorreu fora da região da ligação, evidenciando a rigidez e eficácia da ligação.

Por fim, o valor médio da distância entre os tubos que falharam escoamento da seção bruta no tubo externo foi de 4,96 e CoV 0,062. Assim, a favor da segurança e observado a não influência da variação da distância nos resultados, foi proposto a utilização de uma distância mínima de 10 mm entre os tubos externos da ligação, considerando furo padrão para encaixe dos parafusos.

Agradecimentos. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores.

Referências

- [1] Wardenier J, Packer JA, Zhao X-L, Vegte A van de. Hollow sections in structural applications. 2nd ed. Genebra: CIDECT; 2010.
- [2] Mazon AAO. Análise de sistemas treliçados com barras de extremidades achatadas enrijecidas. Tese de Doutorado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2018.
- [3] Tousignant K, Packer JA. Fillet weld effective lengths in CHS X-connections. I: Experimentation. J Constr Steel Res 2017;138:420–31. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.08.005>.
- [4] Pereira DJR, Sarmanho AMC, Nunes GV, Guerra MJL, Alves VN. Effect of fillet welds on T-joints with thin-walled chords. Proc Inst Civ Eng - Struct Build 2019;172:301–12. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00043>.
- [5] Couchaux M, Hjiat M, Ryan I, Bureau A. Tensile resistances of bolted circular flange connections. Eng Struct 2018;171:817–41. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.004>.
- [6] Liu X-C, Cui F-Y, Jiang Z-Q, Wang X-Q, Xu L, Shang Z-X, et al. Tension–bend–shear capacity of bolted-flange connection for square steel tube column. Eng Struct 2019;201:109798. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109798>.
- [7] Vieira RC. Análise numérica e experimental de ligações tubulares de aço do tipo luva parafusada. Tese de Doutorado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2014.
- [8] Vieira RC, Vieira R de F, Requena JAV, Araújo AHM. Numerical analysis of CHS bolted sleeve connections. EUROSTEEL 2011, Budapest, Hungary; 2011.
- [9] Silva JM da. Análise Teórico-experimental de ligações tubulares tipo luva. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2012.
- [10] Amparo LR. Análise teórico-experimental de ligações tipo luva compostas por perfis tubulares com parafusos em linha e cruzados. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2014.
- [11] Roquete L, Sarmanho AMC, Mazon AAO, Requena JAV. Influence of shear lag coefficient on circular hollow sections with bolted sleeve connections. REM - Int Eng J 2017;70:393–8. <https://doi.org/10.1590/0370-44672014700220>.
- [12] Amparo LR, Sarmanho AM, Araújo AHM, Requena JAV. Analysis of the possible failure modes in CHS bolted sleeve connections. In: Batista E, Vellasco & Lima, editors. Tubul. Struct. XV, Rio de Janeiro: 2015, p. 435–40.
- [13] Roquete L. Estudo de ligações tipo luva em perfis tubulares. Tese de Doutorado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2018.
- [14] Oliveira MM de. Análise de ligações tipo luva sob compressão. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2019.
- [15] Oliveira MM de, Roquete L, Sarmanho AMC, Pereira DJR, Alves V. Bearing failure in bolted sleeve connections with circular hollow sections under compression. REM - Int Eng J 2020;73:153–61. <https://doi.org/10.1590/0370-44672019730115>.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT; 2008.
- [17] Salmon CG, Johnson JE. Steel Structures - Design and Behavior. Emphasizing Load and Resistance Factor Design. Third Edit. 1990.