

Tema: Ligações: concepção, projeto e elementos de fixação

Avaliação numérica de modos de falha da ligação luva em perfis tubulares de seção retangular

Lucas Roquete¹

Matheus Miranda de Oliveira²

Edmundo Pedro Gonçalves Pena³

Arlene Maria Cunha Sarmanho⁴

Resumo

Os perfis tubulares são peças com grande utilização em estruturas treliçadas por possuírem uma ótima performance aos esforços axiais, além de permitirem o vencimento de grandes vãos livres com um peso próprio reduzido. Durante o processo de fabricação, montagem e transporte dessas peças, os tubos são subdivididos em barras com tamanhos menores, existindo assim, a necessidade da criação de um mecanismo para conectar um tubo ao outro, para a formação da estrutura desejada. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise numérica e teórica do comportamento e resistência da ligação tipo luva formada por perfis tubulares retangulares estruturais de aço. Essa ligação é feita utilizando um tubo adicional de menor seção transversal (altura e largura) posicionado internamente aos tubos, conectados por parafusos passantes alinhados ao eixo. A ligação foi avaliada quanto a esforços de tração e compressão, permitindo identificar os principais modos de falha e determinar sua capacidade resistente. Os modos de falha dominantes observados foram o escoamento da seção bruta, a ruptura da seção líquida e a ovalização dos furos, ocorrendo tanto nos tubos externos quanto nos tubos internos da ligação.

Palavras-chave: Estruturas de aço; Perfis tubulares; Ligações de emenda; Ligação luva.

Numerical evaluation of failure modes of the sleeve connection in rectangular section tubular profiles.

Abstract

Tubular profiles are widely used in truss structures due to their high resistance to axial forces and their ability to span large distances with reduced self-weight. During the manufacturing, assembly, and transportation processes of these components, the tubes are subdivided into smaller structures, requiring the creation of a connection mechanism to ensure the continuity of the desired structure. In this context, the goal of this study was to perform a numerical and theoretical analysis of the behavior and strength of the sleeve-type connection formed by rectangular structural steel tubular profiles. This connection is achieved by using an additional tube of smaller cross-section (height and width) positioned internally to the tubes, connected by through bolts aligned with the axis. The connection was evaluated under tensile and compressive loads, allowing for the identification of the main failure modes and determination of its load-carrying capacity. The dominant failure modes observed were the yielding of the gross section, rupture of the net section, and bearing failure, occurring in both the external and internal tubes of the connection.

Keywords: Steel structures; Tubular profiles; Continuous joint; Sleeve connection.



¹ Engenheiro Civil, doutor, professor, DTECH, Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ, Ouro Branco, MG, Brasil.

² Engenheiro Civil, mestre, estudante de doutorado, DECIV, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

³ Estudante de Engenharia Civil, doutor, professor, DTECH, Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ, Ouro Branco, MG, Brasil.

⁴ Engenheira Civil, doutora, professora, DECIV, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os perfis tubulares de aço são amplamente utilizados em várias regiões do mundo, incluindo a Europa, Sudeste Asiático, Austrália e América do Norte. Esses perfis oferecem uma solução eficiente para elementos estruturais que precisam vencer grandes vãos livres, devido à sua resistência elevada e peso próprio reduzido. Além disso, a padronização dos perfis facilita a fabricação e a conexão, contribuindo para a rapidez na montagem da estrutura (Gerken, 2003).

No contexto brasileiro, o uso de perfis tubulares na construção metálica tem crescido significativamente. Esses perfis de aço apresentam excelente capacidade resistente aos esforços axiais em comparação com as seções abertas. Por isso, são amplamente empregados em sistemas estruturais treliçados, nos quais os esforços axiais são predominantes. Além disso, a capacidade de vencer grandes vãos livres com peso próprio reduzido torna esses perfis ideais para treliças (Wardenier et al., 2010).

Devido a questões logísticas, técnicas e de fabricação, os tubos são divididos em estruturas com comprimentos menores do que os necessários para certas estruturas. Isso requer a criação de um mecanismo de conexão para unir os tubos e garantir a continuidade da estrutura desejada. Portanto, estudos sobre ligações em perfis tubulares têm se tornado cada vez mais importantes, levando a um aumento das investigações teóricas sobre o comportamento e o desenvolvimento de novas tipologias de conexão, com o aproveitamento das características mecânicas, a fim de facilitar o processo de montagem da estrutura (Araujo et al., 2016).

Atualmente, a ABNT NBR 16239 (2013) para projetos de estruturas de aço e mistas de aço e concreto em edifícios com perfis tubulares prevê apenas a ligação flangeada. Essa ligação é composta por duas placas (placas do flange) conectadas por solda de filete na extremidade dos perfis a serem unidos, com as placas unidas entre si por parafusos. Embora seja o tipo de ligação mais utilizado, ela pode causar desconforto estético devido à aparente descontinuidade na barra do elemento estrutural.



Figura 1: Ligação Flangeada

Fonte: Vieira (2011)

Nesse contexto, foi desenvolvida uma nova tipologia de ligação de emenda de barras, chamada de ligação tipo luva. Essa ligação, que consiste em dois tubos externos circulares unidos por um tubo interno e parafusos, foi estudada anteriormente para perfis tubulares circulares por Amparo (2014), Amparo et al. (2015b), Roquete et al. (2017b), Roquete (2018), Oliveira (2019),

Oliveira et al. (2020), Roquete et al. (2021) e Roquete et al. (2022). A ligação tipo luva foi desenvolvida com o objetivo de facilitar a montagem e melhorar a estética da estrutura treliçada, sendo considerada mais agradável visualmente quando comparada à ligação flangeada. Além disso, outros estudos também abordaram análises numéricas da ligação tipo luva e seus modos de falha, como Vieira et al. (2011), Amparo et al. (2014), Amparo et al. (2015a), Roquete et al. (2016) e Roquete et al. (2017a).

De acordo com Salmon e Johnson (1990), os estados limites ou modos de falha para elementos estruturais, como chapas e perfis conectados por parafusos e submetidos a forças axiais de tração, incluem falha por ruptura da chapa (seção líquida), cisalhamento da chapa, pressão de contato na chapa, pressão de contato no conector, falha por tração no conector, flexão no conector e cisalhamento do conector. Portanto, os modos de falha dominantes na ligação tipo luva, sob tração e compressão, como descrito por Roquete (2018), Roquete et al. (2020) e Roquete et al. (2021) e Oliveira (2019), são: escoamento da seção bruta (ESB), ruptura da seção líquida (RSL), esmagamento da parede do furo (ovalização do furo - OF), cisalhamento do parafuso (CP) e flexão dos parafusos (FP). Esses modos de falha podem ocorrer tanto no tubo externo quanto no tubo interno da ligação.

Diferentemente dos estudos anteriores, o objetivo deste trabalho é avaliar a ligação tipo luva para perfis tubulares retangulares de aço por meio de um estudo teórico e numérico. A Figura 2 apresenta um modelo esquemático da ligação tipo luva avaliada, composta por dois tubos externos (TE) e um tubo interno (TI) unidos por parafusos alinhados. A ligação é analisada sob tração e compressão por meio de um estudo paramétrico com 62 modelos numéricos de elementos finitos, variando o número de parafusos e as propriedades geométricas dos tubos. Por fim, os resultados são comparados com as formulações existentes na literatura.

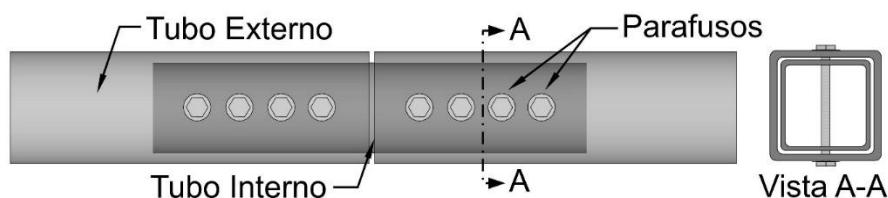


Figura 2: Ligação tipo luva

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado o desenvolvimento de um modelo numérico utilizando o Método dos Elementos Finitos, por meio do software ANSYS 22, uma ferramenta amplamente utilizada em estudos e análises estruturais. Para facilitar a construção do modelo e permitir modificações na geometria de forma automatizada, bem como controlar os parâmetros no modelo numérico, foi utilizada a programação em linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). Nesta seção, serão apresentadas as características e propriedades da modelagem numérica, o critério de falha adotado, o estudo paramétrico realizado e uma análise teórica da ligação.

2.1 Modelagem numérica

O modelo numérico da ligação tipo luva, estudada nesse trabalho, consiste em dois grupos de tubos retangulares. No primeiro grupo, os tubos internos têm dimensões de 90x60 mm e os tubos externos têm dimensões de 110x80 mm. No segundo grupo, os tubos internos têm dimensões de 110x80 mm e os tubos externos têm dimensões de 130x100 mm. A espessura do tubo interno é de 5 mm para todos os modelos, enquanto a espessura do tubo externo varia de 2,5(mm); 3,0(mm); 3,5(mm); 4,0(mm) e 4,5(mm).

Foram considerados de 2 a 5 parafusos nos modelos, sem modelagem da cabeça dos parafusos, seguindo o trabalho de Roquete (2018). O comportamento do material nos modelos numéricos foi representado pelo modelo de material multilinear elástico (*Multilinear Isotropic Hardening*), permitindo a análise na fase plástica.

Para a modelagem dos tubos, foi utilizado o elemento casca (SHELL) e para a modelagem dos parafusos, foi utilizado o elemento sólido (SOLID). O SHELL181, foi escolhido para representar os tubos, sendo ele um elemento estrutural homogêneo com quatro nós e seis graus de liberdade por nó, que permite malhas irregulares e aplicação de carga em todas as direções. Já o SOLID186, escolhido para representar os parafusos, que possui vinte nós e três graus de liberdade por nó, também aceitando malhas irregulares e aplicação de carga em todas as direções. Considerou-se o contato entre as áreas dos furos dos tubos com a lateral do parafuso na constituição do modelo numérico. Essa interação foi feita utilizando o contato Node-to-Surface ou Surface-to-Surface com os elementos CONTA175 e TARGE170.

A geração da malha foi realizada de forma livre, utilizando principalmente elementos quadriculares, com a opção de elementos tetraédricos e triangulares como alternativa. Na região dos furos foram criadas subdivisões nas linhas, para melhorar a criação das malhas. As malhas tiveram variação de tamanho para obter uma melhor convergência dos resultados, com malhas de 6 mm para os elementos de casca dos tubos e malhas de 5 mm para os elementos sólidos dos parafusos.

As condições de contorno foram estabelecidas acoplando os nós das extremidades dos tubos para distribuir igualmente o deslocamento aplicado ao longo da seção transversal. Em uma das extremidades, foi aplicada restrição de deslocamento e rotação para simular um engaste no tubo. Na outra extremidade, foi aplicado um deslocamento de 15 mm para tração e compressão nos nós dos perfis tubulares na direção do eixo z. A solução do modelo numérico foi obtida utilizando o método incremental iterativo Newton-Raphson Padrão.

Na Figura 3 é ilustrado o modelo numérico desenvolvido para as análises.

2.2 Critério de falha

Para avaliação da ligação luva adotou-se o critério de von Mises para indicar o início da falha da ligação. No momento em que material atinge o escoamento, mesmo com adição de carregamento, a tensão de von Mises permanece constante com acréscimo das deformações. Logo, para identificação um modo de falha em análises numéricas a deformação de von Mises também é utilizada, especificando-se um determinado valor de deformação no qual é assumida

a falha do material. Neste trabalho, assumiu-se que os modos de falha de Ovalização (OF) e Ruptura da Seção Líquida (RSL) são determinados pela a deformação excessiva do material, como também utilizado por Oliveira et al. (2020), Roquete et al. (2021) e Roquete et al. (2022). Assim, no instante que a deformação total de von Mises ultrapassa a deformação última de ruptura do material é caracterizada a falha. A falha por Escoamento da Seção Bruta (ESB) é determinada quando no momento do pico de carga da ligação, em que não foram identificados os demais modos de falha.

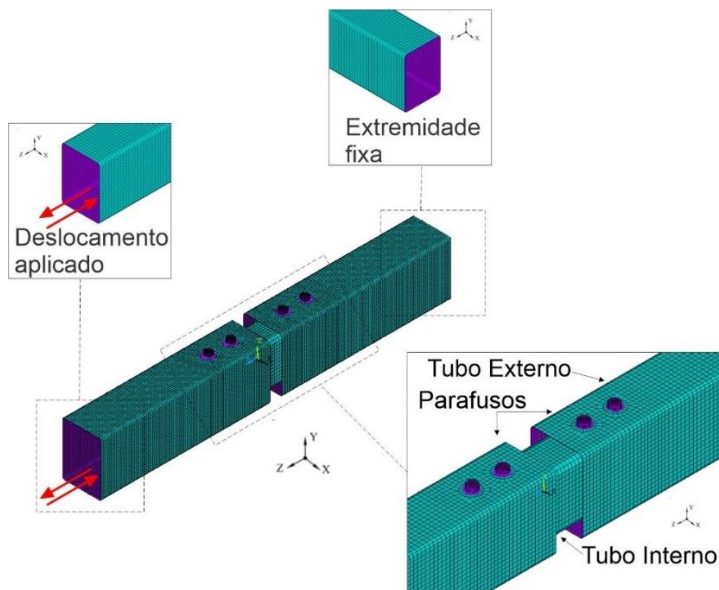


Figura 3: Modelo numérico

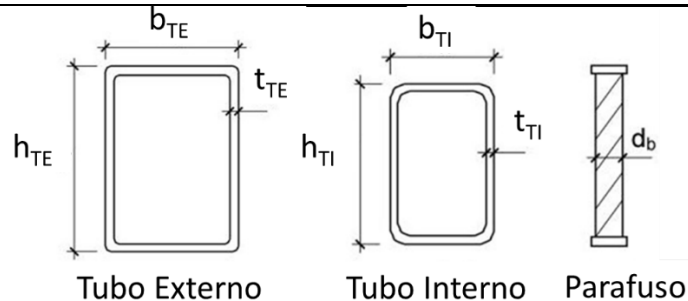
2.3 Estudo Paramétrico

Foram gerados 62 modelos variando-se a geometria e o número de parafusos com intuito de obter uma análise do comportamento da ligação e dos tubos, divididos em 31 modelos para compressão e 31 para tração.

As propriedades geométricas de cada grupo de modelos podem ser observadas na Tabela 1, são apresentados o número de parafusos usados, espessura do tubo interno, espessura do tubo externo, tensão de escoamento (f_y) dos tubos de 250MPa, tensão de ruptura dos tubos (f_u) de 360MPa, todos os modelos contam com parafusos de 15 milímetros de diâmetro, tensão de escoamento (f_{yb}) de 635 MPa e tensão de ruptura (f_{ub}) de 825 MPa. O módulo de elasticidade do aço considerado nas análises foi de 200 000 MPa e o coeficiente de Poisson 0,3. Para permitir a transmissão dos esforços entre os tubos e os parafusos foram utilizados os elementos de contato. O diâmetro total dos furos foi de 18,5 milímetros, valor calculado conforme prescrito no item 5.2.4.1 da ABNT NBR 8800 (2008).

Tabela 1. Propriedades geométricas dos modelos do estudo paramétrico

Modelo	Número de parafusos	Tubo externo			Tubo interno	
		Altura h_{TE} (mm)	Largura b_{TE} (mm)	Espessura t_{TE} (mm)	Altura h_{TI} (mm)	Largura b_{TI} (mm)
1	2					
2	3					
3	4			2.5		
4	5					
5	2					
6	3			3		
7	4					
8	5					
9	2					
10	4	110	80	3.5	90	60
11	5					
12	2					
13	3			4		
14	4					
15	5					
16	2					
17	3			4.5		
18	4					
19	5					
20	2					
21	4			2.5		
22	5					
23	2					
24	3			3.5		
25	4	130	100		110	80
26	5					
27	2					
28	3			4		
29	4					
30	5					
31	3			4.5		



2.4 Análise Teórica

Atualmente não existem prescrições normativas para a determinação da resistência dos modos de falha da ligação luva. Os estados limites da ligação verificados nesse trabalho são baseados nos resultados apresentados por Roquete (2018), Oliveira (2019) além os estados limites últimos dos tubos e parafusos segundo a ABNT NBR 8800 (2008).

A partir dos modelos numéricos apresentados na Tabela 1, foi realizado a avaliação teórica da ligação tipo luva sob compressão e sob tração. Nos itens seguintes estão apresentadas as formulações de cada modos de falha da ligação encontrados durante a análise numérica dos modelos: Escoamento da seção bruta dos tubos (ESB), Ovalização do furo (OF) e Ruptura da seção líquida (RSL).

2.4.1 Escoamento da seção bruta dos tubos (ESB)

O escoamento da seção bruta é caracterizado quando o perfil de seção retangulares atinge a deformação plástica, ultrapassando o limite elástico de deformação do aço, determinado conforme a equação 1.

$$N_{c,Rk} = P_{teo} = A_g \times f_y \quad (1)$$

Onde: A_g - área bruta da seção; f_y - tensão de escoamento do aço;

2.4.2 Ovalização do furo (OF)

O módulo de falha da ruptura da seção líquida é descrito como a estricção seguido do rompimento da peça junto à borda do furo, de acordo com o proposto por Roquete (2018), Roquete et al. (2021) e Roquete et al. (2022) e pela ABNT NBR 8800 (2008) é determinado pela formulação apresentadas a seguir (equação 2 a 4).

$$N_{t,Rk} = P_{teo} = A_e \times f_u \left\{ \begin{array}{l} A_e = C_t \times A_n \\ A_n = A_g - 2d_f t \\ C_t = 1 - \frac{e_c}{l_c}; e_c = \frac{d^2 + 2db}{4(d+b)} \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$\text{para } n < 4: l_c = l_{f1} + (n-1)l_{f2} \quad (3)$$

$$\text{para } n \geq 4: l_c = l_{f1} + 3l_{f2} \quad (4)$$

Onde: A_e - área líquida efetiva da seção do tubo; A_g - área bruta da seção do tubo; f_u - resistência à ruptura do aço; C_t - coeficiente de redução da área líquida; d_f - diâmetro do furo (d_b + folga); t - espessura do tubo; e_c - excentricidade da ligação; l_c - comprimento efetivo da ligação; d - dimensão do tubo perpendicular ao parafuso; b - dimensão do tubo paralela ao parafuso.

2.4.3 Ruptura da seção líquida (RSL)

A norma brasileira ANBT NBR 8800 (2008) apresenta uma formulação para a determinação da força resistente de cálculo de pressão de contato em furos, considerando o rasgamento entre dois furos consecutivos ou entre um furo e borda, quando a deformação no furo para forças de serviço for uma limitação de projeto, de acordo com o item 6.3.3.3 da ABNT NBR 8800 (2008), conforme apresentado na equação 5.

$$N_{Rk} = P_{teo} = 2,4d_b \times t \times f_u \quad (5)$$

Onde: t - a espessura da parede; d_b - o diâmetro do parafuso; f_u - resistência à ruptura do aço.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos modos de falha encontrados nos modelos numéricos avaliados, bem como nas formulações apresentadas. Também são indicados os modos de falha do modelo e o local em que ocorrem, se no tubo interno ou externo.

Para uma análise inicial dos modelos, foi calculada a relação entre a carga de falha numérica e a carga de falha teórica para os 31 modelos. Na ligação sob tração, observou-se uma média de 0,87, com um coeficiente de variação (CoV) de 0,241. Na ligação sob compressão, a média foi de 0,83, com um coeficiente de variação de 0,218. O alto valor do coeficiente de variação pode ser atribuído à ausência de dados experimentais disponíveis.

Conforme recomendado por Roquete (2018) e Oliveira (2019) em estudos realizados em perfis tubulares circulares, é necessário evitar que os modos de falha se concentrem no tubo interno da ligação, devido a impossibilidade de controle visual. Dessa forma, no presente estudo foram desconsiderados os modelos que apresentaram falhas no tubo interno. Assim, apenas o modo de falha de ovalização dos furos foi observado nos tubos externos da ligação. Nesse contexto, o valor da relação entre as cargas de falha numérica e teórica se elevou para 0,97 com CoV igual 0,22 analisando o comportamento da ligação a tração e a compressão. Assim, a Equação 4 pode representar satisfatoriamente o modo de falha da ligação.

Na Tabela 2 é possível observar que as formulações apresentadas anteriormente podem representar o comportamento da ligação, visto que analisando os modos de falhas que ocorrem em ambos os tubos, tem-se uma relação média entre os resultados numéricos e teóricos de 0,87 para a tração e de 0,83 para compressão. Todavia, devido a recomendação de direcionar o modo de falha para o tubo externo da ligação, relação média se elevou para 0,97. Recomenda-se para trabalhos futuros análises experimentais da ligação em perfis tubulares retangulares para a calibração e validação do modelo numérico.

Na Figura 4 está apresentada a distribuição dos modelos na comparação entre os resultados teóricos e numéricos para o modo de falha de ovalização dos furos no tubo externo para a tração e compressão.

Na Figura 5 observa-se que o aumento do número de parafusos influencia na capacidade resistente da ligação. A ligação apresentou comportamento semelhante para a tração e para a

compressão. Um elevado aumento de resistência quando o número de parafusos da ligação se passou de 2 para 3 parafusos foi verificado. Nota-se também que ocorre um ganho de resistência da ligação aumentado o número de parafusos para 4 e 5 parafusos. Todavia, enquanto a ligação de 4 e 5 parafusos apresenta uma resistência próximas, não observado um ganho significativo quando se comparado ambos.

Tabela 2. Resultados numéricos e teóricos para modelos do estudo paramétrico

Modelos	Ligação sob tração					Ligação sob compressão				
	Modo de falha	Local da falha	P _{num} (kN)	P _{teo} (kN)	P _{num} /P _{teo}	Modo de falha	Local da falha	P _{num} (kN)	P _{teo} (kN)	P _{num} /P _{teo}
1	OF	EXT	172,9	129,6	1,33	OF	EXT	148,08	129,6	1,14
2	OF	EXT	255,33	194,4	1,31	OF	EXT	220,07	194,4	1,13
3	RSL	INT	331,56	414,88	0,8	OF	INT	318,21	518,4	0,61
4	RSL	INT	332,25	414,88	0,8	ESB	INT	354,95	375	0,95
5	OF	EXT	172,98	155,52	1,11	OF	EXT	158,23	155,52	1,02
6	OF	EXT	255,44	233,28	1,09	OF	EXT	229,63	233,28	0,98
7	RSL	INT	331,34	414,88	0,8	OF	EXT	236,68	311,04	0,76
8	RSL	INT	332,27	414,88	0,8	ESB	INT	353,39	375	0,94
9	OF	EXT	170	181,44	0,94	OF	INT	171,61	259,2	0,66
10	RSL	INT	331,65	414,88	0,8	OF	EXT	285,44	362,88	0,79
11	RSL	INT	332,25	414,88	0,8	ESB	INT	353,18	375	0,94
12	OF	EXT	180,3	207,36	0,87	OF	EXT	168,7	207,36	0,81
13	OF	EXT	269,09	311,04	0,87	OF	INT	246,19	388,8	0,63
14	RSL	INT	331,72	414,88	0,8	ESB	INT	316,26	375	0,84
15	RSL	INT	332,25	414,88	0,8	ESB	INT	294,12	375	0,78
16	OF	EXT	179,74	233,28	0,77	OF	EXT	166,87	233,28	0,72
17	OF	EXT	359,24	349,92	1,03	OF	EXT	228,49	349,92	0,65
18	RSL	INT	331,73	414,88	0,8	ESB	INT	285,43	375	0,76
19	RSL	INT	332,26	414,88	0,8	ESB	INT	290,94	375	0,78
20	OF	EXT	168,26	129,6	1,3	OF	EXT	163,6	129,6	1,26
21	OF	EXT	331,14	259,2	1,28	OF	EXT	307,13	259,2	1,18
22	RSL	INT	411,16	512,21	0,8	ESB	INT	381,46	475	0,8
23	OF	INT	170,93	259,2	0,66	OF	EXT	118,18	181,44	0,65
24	RSL	INT	255,08	473,46	0,54	OF	INT	247,97	388,8	0,64
25	RSL	INT	334,07	512,21	0,65	OF	EXT	299,78	362,88	0,83
26	RSL	INT	439,4	512,21	0,86	OF	INT	386,46	648	0,6
27	OF	INT	162,73	259,2	0,63	OF	INT	165,77	259,2	0,64
28	OF	INT	247,32	388,8	0,64	OF	INT	247,32	388,8	0,64
29	RSL	INT	338,54	512,21	0,66	OF	EXT	328,75	414,72	0,79
30	RSL	INT	411,53	512,21	0,8	OF	EXT	412,02	518,4	0,79
31	OF	INT	337,79	388,8	0,87	OF	EXT	315,3	349,92	0,9
Média					0,87					0,83
CoV					0,241					0,218

Na Figura 6 foi verificado a influência da espessura do tubo externo da ligação na capacidade resistente da ligação para a tração e compressão. Notou-se que o modelo submetido a tração com a espessura do tubo externo de 4,5mm apresentou uma capacidade resistente maior em relação aos modelos com espessura do tubo externo inferior, que apresentaram uma resistência final similares. Para os modelos a compressão não se observou uma variação de capacidade resistente final, apenas uma diferença de rigidez na parte inicial da curva carga-deslocamento.

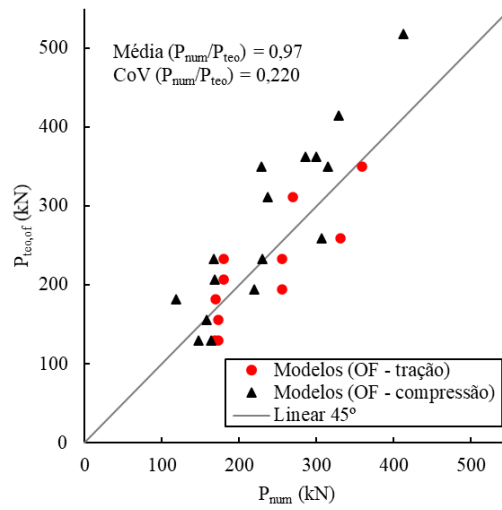


Figura 4: Relação Numérico Teórico Para Falha no Tubo Externo

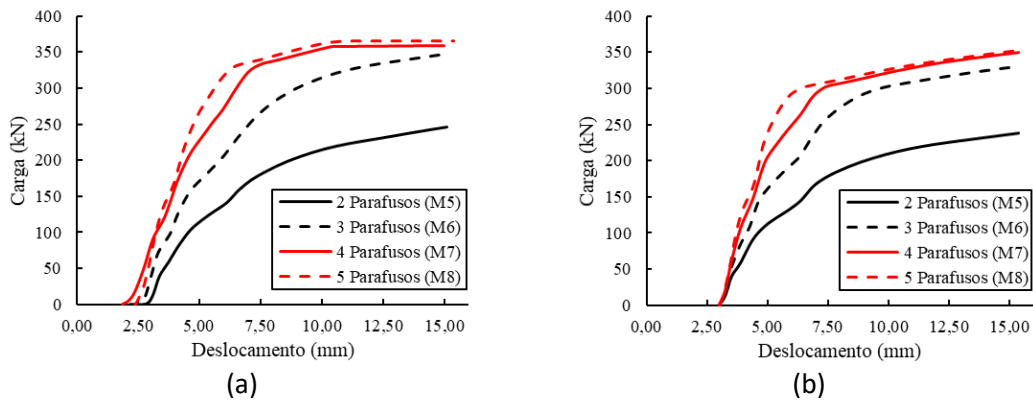


Figura 5: Influência do Número de Parafuso: (a) Compressão; (b) Tração

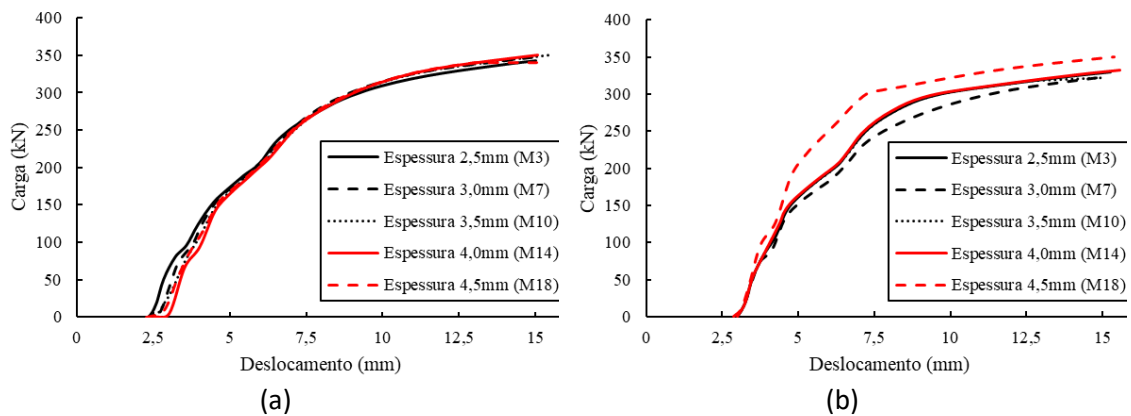


Figura 6: Influência da Espessura do Tubo Externo: (a) Compressão; (b) Tração

4 CONCLUSÃO

Não mencionar trabalhos não finalizados. Podem ser apresentadas novas hipóteses, quando bem justificadas e incluídas as recomendações, porém, estas precisam ser claras e fundamentadas nos objetos dos estudos realizados.

Nesse estudo, foi desenvolvido um modelo numérico utilizando o método dos elementos finitos, por meio do software ANSYS, para analisar a ligação tipo luva em perfis tubulares retangulares de aço. O modelo foi construído utilizando elementos de casca e sólido para representar os tubos e parafusos, respectivamente. Foram realizadas análises de critérios de falha de acordo com a literatura.

Foram simulados 62 modelos da ligação luva, sendo metade submetidos à compressão e metade à tração. Os resultados mostraram que os modos de falha dominantes foram a ruptura da seção líquida, o escoamento da seção bruta e a ovalização dos furos. Em modelos de compressão, a ovalização dos furos foi a falha mais comum, seguida pelo escoamento da seção bruta. Em modelos de tração, a ovalização dos furos ocorreu em menos modelos do que a ruptura da seção líquida. As falhas por ovalização dos furos ocorreram tanto nos tubos externos quanto nos tubos internos da ligação, enquanto as falhas por ruptura da seção líquida e escoamento da seção bruta se limitaram aos tubos internos.

Realizou-se também uma análise da relação entre a carga de falha numérica e a carga de falha teórica da ligação. Observou-se que a relação média para a ligação sob tração foi de 0,87, com um coeficiente de variação (CoV) de 0,241. Já para a ligação sob compressão, a relação média encontrada foi de 0,83, com um coeficiente de variação de 0,218.

Ao analisar especificamente o modo de falha de ovalização dos furos nos tubos externos da ligação e aplicar a mesma relação mencionada anteriormente, obteve-se um valor médio dessa relação de 0,97, com um coeficiente de variação igual a 0,22, considerando o comportamento da ligação tanto na tração quanto na compressão simultaneamente.

Notou-se que as formulações apresentadas anteriormente são capazes de representar o comportamento da ligação. Ao analisar os modos de falha que ocorrem em ambos os tubos, obteve-se uma relação média de 0,87 entre os resultados numéricos e teóricos para a tração, e de 0,83 para a compressão. Considerando apenas as falhas nos tubos externos, conforme recomendado por Oliveira et al. (2020) e Roquete et al. (2021), obteve-se uma relação média de 0,97.

Também foi avaliada a influência do número de parafusos na ligação para determinar sua capacidade resistente, e observou-se um ganho de resistência nas combinações analisadas. Além disso, realizou-se uma análise da influência da espessura do tubo externo da ligação, e constatou-se que a carga final aplicada aos modelos foi muito semelhante, sem uma variação significativa para as espessuras analisadas.

Como sugestão para trabalhos futuros, é recomendada uma análise da combinação ideal de número de parafusos em relação ao aumento de carga, levando em consideração o custo

adicional da ligação. Em suma, com base nos critérios mencionados anteriormente para a elaboração do modelo numérico, conclui-se que o modelo desenvolvido é adequado e pode ser utilizado para extrapolação de modelagens e análises futuras. Recomenda-se também que trabalhos futuros incluam análises experimentais da ligação em perfis tubulares retangulares, visando a calibração e validação do modelo numérico, bem como a redução do coeficiente de variação encontrado.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UFSJ, UFOP, CNPQ e FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- 1 AMPARO, L. R. 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.
- 2 AMPARO, L. R.; ESCANIO, L. A.; SARMANHO, A. M.; PEREIRA, C. O. V. R. Análise Numérica e experimental de ligação tipo luva em perfis tubulares com parafusos cruzados. CILAMCE 2015. Anais...Rio de Janeiro: XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2015a
- 3 AMPARO, L. R.; SARMANHO, A. M.; ARAÚJO, A. H. M.; REQUENA, J. A. V. Analysis of the possible failure modes in CSH bolted sleeve connections. (E. Batista, Vellasco & Lima, Eds.)Tubular Structures XV. Anais...Rio de Janeiro: 2015b
- 4 AMPARO, L. R.; ESCANIO, L. A.; SARMANHO, A. M.; REQUENA, J. A. V. Avaliação da influência da variação do número de parafusos na ligação tipo luva em perfis tubulares com parafusos cruzados. CILAMCE 2016. Anais...Brasília: XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2016
- 5 AMPARO, L. R.; ARAÚJO, A. H. M.; REQUENA, J. A. V.; SARMANHO, A. M. Analysis of CSH bolted sleeve connections. EUROSTEEL 2014. Anais...Nápole, Itália: 2014
- 6 ANSYS INC. ANSYS Version 22. EUA: Swanson Analysis System, 2022.
- 7 ARAUJO, A. H. M. DE; SARMANHO, A. M.; BATISTA, E. DE M.; REQUENA, J. A. V.; FAKURY, R. H.; PIMENTA, R. J. Projeto de estruturas de edificações com perfis tubulares de aço. Belo Horizonte: g, 2016.
- 8 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.
- 9 GERKEN, F. DE S. Perfis tubulares: aspectos arquitetônicos e estruturais. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2003.

- 10 NBR 16239. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. 1. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.
- 11 OLIVEIRA, M. M. DE. Análise de ligações tipo luva sob compressão. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.
- 12 OLIVEIRA, M. M. DE; ROQUETE, L.; SARMANHO, A. M. C.; PEREIRA, D. J. R.; ALVES, V. Bearing failure in bolted sleeve connections with circular hollow sections under compression. REM - International Engineering Journal, v. 73, n. 2, p. 153–161, Jun. 2020.
- 13 ROQUETE, L. Estudo de ligações tipo luva em perfis tubulares. Tese de Doutorado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.
- 14 ROQUETE, L.; OLIVEIRA, M. M. DE; SARMANHO, A. M. C.; XAVIER, E. M.; ALVES, V. N. Behavior and design formulation of steel CHS with sleeve connections. Journal of Constructional Steel Research, v. 177, p. 106465, Feb. 2021.
- 15 ROQUETE, L.; MIRANDA DE OLIVEIRA, M.; MARIA CUNHA SARMANHO, A.; MARTINS XAVIER, E.; NICCHIO ALVES, V. Design of sleeve connections with cross-bolted on circular hollow sections under axial tension. Engineering Structures, v. 250, p. 113393, Jan. 2022.
- 16 ROQUETE, L.; SARMANHO, A. M. C.; ESCANIO, L. A.; SOUZA, D. L. C. E; OLIVEIRA, M. M. DE. Identificação de modos de falha em perfis tubulares com ligação tipo luva e parafusos cruzados a 90o usando um modelo numérico. (XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Ed.)CILAMCE 2017. Anais...Florianópolis: 2017a
- 17 ROQUETE, L.; SARMANHO, A. M. C.; MAZON, A. A. O.; REQUENA, J. A. V. Influence of shear lag coefficient on circular hollow sections with bolted sleeve connections. REM - International Engineering Journal, v. 70, n. 4, p. 393–398, Dec. 2017b.
- 18 SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E. Steel Structures - Design and Behavior. Emphasizing Load and Resistance Factor Design. Third Edit ed. [s.l: s.n.].
- 19 SIMÕES, R.; JORDÃO, S.; FREITAS, P. Ligações de emenda entre perfis tubulares. Revista da Estrutura de Aço. Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA. Volume 3. Número 2., p. 168–186, 2014.
- 20 VIEIRA, R. C.; VIEIRA, R. DE F.; REQUENA, J. A. V.; ARAÚJO, A. H. M. Numerical analysis of CHS bolted sleeve connections. EUROSTEEL 2011. Anais...Budapest, Hungary: 2011
- 21 WARDENIER, J.; PACKER, J. A.; ZHAO, X.-L.; VEGTE, A. VAN DE. Hollow sections in structural applications. 2nd. ed. Genebra: CIDECT, 2010.