



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
CAMPUS ALTO PARAPEBA**

**ISABELLA ESTEVÃO MONTEIRO  
LUCAS DA SILVA TANUS**

***ANÁLISE TEÓRICO-NUMÉRICA DE LIGAÇÕES LUVA  
EM PERFIL TUBULAR RETANGULAR SOB ESFORÇOS  
AXIAIS***

**OURO BRANCO-MG  
ABRIL DE 2022**



Universidade Federal  
de São João del-Rei

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
CAMPUS ALTO PARAOPÉBA**

**ISABELLA ESTEVÃO MONTEIRO  
LUCAS DA SILVA TANUS**

***ANÁLISE TEÓRICO-NUMÉRICA DE LIGAÇÕES LUVA  
EM PERFIL TUBULAR RETANGULAR SOB ESFORÇOS  
AXIAIS***

Trabalho de Conclusão de  
Curso apresentado à Coordenação do  
Curso de Graduação em Engenharia  
Civil, da Universidade Federal de São  
João del-Rei, *Campus* Alto Paraopeba,  
como requisito parcial para a obtenção  
do grau de Bacharel em Engenharia  
Civil

**Orientador:** Lucas Roquete  
**Coorientador:** Matheus Miranda de Oliveira

OURO BRANCO-MG  
ABRIL DE 2022

**Isabella Estevão Monteiro  
Lucas da Silva Tanus**

***ANÁLISE TEÓRICO-NUMÉRICA DE LIGAÇÕES  
LUA EM PERFIL TUBULAR RETANGULAR SOB  
ESFORÇOS AXIAIS***

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.*

Aprovado em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Lucas Roquete - UFSJ  
Orientador

---

Eng. Me. Matheus Miranda de Oliveira  
Coorientador

---

Prof. Dr. Gabriel Vieira Nunes – IFMG  
Avaliador

---

Prof. Dr.<sup>a</sup> Ana Amélia Oliveira Mazon - UFSJ  
Avaliador

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradecemos ao nosso orientador, Professor Dr. Lucas Roquete, por todo apoio e os anos de amizade e dedicação a essa pesquisa, graças a você pode-se criar um ambiente de discussões saudáveis que elevaram o nível deste trabalho, não poderia deixar de citar sua paciência em nos ensinar a usar a calculadora e os arredondamentos durante as suas aulas. Agradecemos em especial ao nosso coorientador Msc. Matheus de Oliveira por sempre estar disponível para retirar nossas dúvidas e nos tranquilizar nos momentos mais críticos, você foi essencial para a realização deste trabalho.

Agradecemos também a UFSJ e aos mestres que nos acompanharam durante a graduação por tornar essa pesquisa possível e, também a UFOP por disponibilizar os recursos necessários para as compilações dos modelos estudados.

Não podemos deixar de agradecer aos nossos pais e irmãos por todo o carinho e apoio durante a formação.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	11
2.1. Modelagem numérica .....	11
2.2. Critério de falha .....	13
2.3. Estudo Paramétrico.....	13
2.4. Análise Teórica.....	14
2.4.1. Escoamento da Seção Bruta (ESB) .....	15
2.4.2. Ruptura da Seção Líquida (RSL) .....	15
2.4.3. Ovalização do Furo (OF).....	16
<b>3. RESULTADOS</b> .....	16
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	19
<b>5. AGRADECIMENTOS</b> .....	20
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	20

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ligação Flangeada .....	10
Figura 2: Ligação tipo luva .....	11
Figura 3: Modelo numérico.....	13
Figura 4: Relação Numérico Teórico Para Falha no Tubo Externo .....	17
Figura 5: Influência do Número de Parafuso: (a) Compressão; (b) Tração .....	18
Figura 6: Influência da Espessura do Tubo Externo: (a) Compressão; (b) Tração .....	19

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Propriedades geométricas dos modelos do estudo paramétrico .....	14
Tabela 2. Resultados numéricos e teóricos para modelos do estudo paramétrico .....	16

*ANÁLISE TEÓRICO-NUMÉRICA DE LIGAÇÕES LUVA EM PERFIL TUBULAR  
RETANGULAR SOB ESFORÇOS AXIAIS*

**Lucas da Silva Tanus<sup>1</sup>**

*lucas.tanus@hotmail.com*

**Isabella Estevão Monteiro<sup>1</sup>**

*isabellamonnteiro@gmail.com*

**Matheus Miranda de Oliveira<sup>2</sup>**

*matheusmoliveira4@gmail.com*

**Lucas Roquete<sup>1</sup>**

*lucasroquete@gmail.com*

*<sup>1</sup> Departamento de Tecnologia em engenharia Civil Computação e Humanidades, Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ - Campus Alto Paraopeba, Ouro Branco/MG, Brasil*

*<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Morro do Cruzeiro, Ouro Preto/MG, Brasil*

**Resumo.** Os perfis tubulares são largamente utilizados em estruturas treliçadas por possuírem elevada resistência aos esforços axiais, além de permitirem superar grandes vãos livres com um peso próprio reduzido. Durante o processo de fabricação, montagem e transporte dessas peças, os tubos são subdivididos em estruturas menores, existindo assim, a necessidade da criação de um mecanismo para conectar um tubo ao outro, para permitir a continuidade da estrutura desejada. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo realizar uma análise numérica e teórica do comportamento e a resistência da ligação tipo luva formada por perfis tubulares retangulares estruturais de aço. A ligação dos tubos é realizada utilizando-se um tubo adicional de menor altura e largura posicionadas internamente aos tubos, e conectados por meio de parafusos passantes posicionados de forma alinhada (em eixo). Essa ligação foi avaliada submetida a esforços de tração ou compressão. Assim, foi possível observar os modos de falhas dominantes na ligação estudada e determinar sua capacidade resistente. Os modos de falha dominantes foram o escoamento da seção bruta, ruptura da seção líquida e a ovalização dos furos. Esses modos de falha ocorreram tanto nos tubos externos quanto nos tubos internos da ligação. Por fim, os resultados numéricos e teóricos foram comparados e foi possível avaliar a influência dos parâmetros geométricos nos modos de falha.

**Palavras-chave:** Estruturas metálicas, perfis tubulares retangulares, ligação luva, ligação parafusada.



## 1. INTRODUÇÃO

Os perfis tubulares em aço são utilizados em larga escala em algumas partes do mundo podendo-se citar a Europa, Sudeste Asiático, Austrália e América do Norte. Esses perfis oferecem uma boa solução para elementos estruturais que precisam vencer grandes vãos livres por serem mais leves e econômicos devido a sua elevada resistência e baixo peso próprio. Outro ponto de destaque é a padronização dos perfis, o que torna a sua fabricação e ligação um processo mais fácil de ser realizado, sendo um dos pontos mais relevantes, pois proporciona uma grande rapidez na montagem da estrutura (Gerken, 2003).

Nesse contexto, a utilização de perfis de seção tubular na construção metálica apresentou um crescimento acelerado no Brasil. Os perfis de aço com seção tubular quando comparado às seções abertas possuem excelente capacidade resistente aos esforços axiais. Assim, estes perfis são amplamente empregados em sistemas estruturais treliçados pelo fato dos esforços axiais serem predominantes nesses tipos de sistema estrutural. Além disso, outro fator para utilização desses perfis em treliças é a possibilidade de vencer grandes vãos livres com peso próprio reduzido (Wardenier *et al.*, 2010).

Por questões logísticas, técnicas e de fabricação, os tubos são divididos em estruturas com comprimento menor que o necessário para determinadas estruturas, havendo, então, a necessidade de criação de um mecanismo para conectar um tubo ao outro a modo de formar a estrutura desejada permitindo a sua continuidade. Por isso, têm-se tornado necessário os estudos relacionados às ligações em perfis tubulares, o que têm levado, em todo mundo, ao crescimento das investigações teóricas acerca do comportamento e criação de novas tipologias de ligação, com aproveitamento das características mecânicas, que facilitem os processos de montagem da estrutura (Araujo *et al.*, 2016).

Atualmente a ABNT NBR 16239 (2013): Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares, para ligação parafusada em perfis tubulares prevê, apenas a ligação flangeadas. As ligações flangeadas são constituídas por duas placas (placas do flange) ligadas por solda de filete na extremidade dos perfis a serem conectados, com as placas unidas entre si por parafusos a Figura 1 apresenta uma imagem desta ligação, esse tipo de ligação é o mais utilizado, no entanto ela pode causar um certo desconforto estético aos usuários por mostrar uma certa descontinuidade da barra do elemento estrutural.



**Figura 1: Ligação Flangeada**

**Fonte: Vieira (2011)**

Nesse contexto, uma nova tipologia de ligação de emenda de barras, denominada de ligação tipo luva, foi desenvolvida. A ligação tipo luva, constituída de dois tubos externos circulares unidos por meio de um tubo interno e parafusos, foi estudada 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). Essa ligação foi desenvolvida para atender os princípios de facilidade de montagem e de estética. Assim, a ligação é uma alternativa de montagem de uma estrutura treliçada, sendo esteticamente mais agradável quando comparada com a ligação flangeada. Além disso, outros trabalhos também apresentam estudos numéricos da ligação luva e seus os 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).

Conforme Salmon e Johnson (1990), os estados limites ou modos de falha para elementos estruturais, chapas e perfis, conectados por parafusos e submetidos a uma força axial de tração são: 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, cisalhamento do conector. Nesse trabalho não são avaliadas as falhas nos parafusos, portanto, os modos de falha dominantes na ligação tipo luva sob tração e compressão, conforme descrito por Roquete (2018) e Oliveira (2019), são os seguintes: escoamento da seção bruta (ESB); ruptura da seção líquida (RSL) e esmagamento da parede do furo (ovalização do furo (OF)). Esses modos de falha podem acontecer tanto no tubo externo quanto no tubo interno da ligação.

Diferentemente dos trabalhos anteriores, este trabalho tem como objetivo avaliar a ligação tipo luva para perfis tubulares retangulares de aço por meio de um estudo teórico e numérico. Na Figura 2 está apresentado um modelo esquemático da ligação tipo luva avaliada,

composta por dois tubos externos (TE) e um tubo interno (TI) unidos com parafusos alinhados. Dessa forma, a ligação sob tração e compressão por meio um estudo paramétrico com 62 modelos numérico de elementos finitos é avaliada, com variações do número de parafusos e propriedades geométricas dos tubos. Por fim, os resultados são comparados com as formulações existentes na literatura.

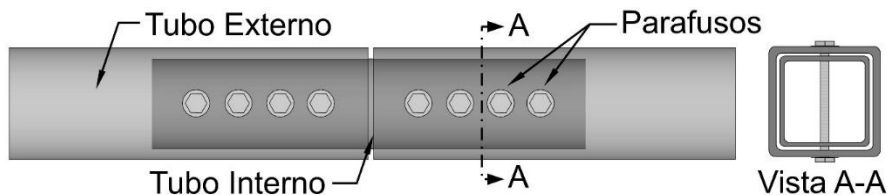


Figura 2: Ligação tipo luva

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi desenvolvido um modelo numérico utilizando o Método dos Elementos Finitos para análises estruturais por meio do software ANSYS 18.2 (2017), programa frequentemente utilizado em estudos e análises estruturais. A fim de automatizar a construção do modelo e facilitar alterações em sua geometria, com o controle dos parâmetros no modelo numérico, utilizou-se a programação em linguagem APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). Neste item são apresentadas as características e propriedades da modelagem numérica, critério de falha, estudo paramétrico e uma análise teórica da ligação.

### 2.1. Modelagem numérica

A ligação tipo luva foi modelada constituindo dois grupos de tubos retangulares, no primeiro grupo os tubos internos apresentam dimensão de 90x60(mm) e os tubos externos 110x80(mm), já no segundo grupo os tubos internos possuem dimensão de 110x80(mm) e externo 130x100(mm). Ambos os grupos apresentam a espessura do tubo interno de 5(mm) e para o tubo externo a variação entre 2,5(mm); 3,0(mm); 3,5(mm); 4,0(mm) e 4,5(mm). Nos dois grupos o número de parafusos varia de 2 a 5, os modelos foram elaborados sem a modelagem da cabeça dos parafusos pois não influencia nos resultados, conforme apresentado por Roquete (2018). Para melhorar a criação das malhas, elaborou-se o modelo numérico ao longo de distâncias definidas no eixo longitudinal da ligação. E para representar o comportamento do material nos modelos numéricos, foi considerado o modelo de material multilinear elástico (*Multilinear Isotropic Hardening*) que permite a análise na fase plástica do

material.

A escolha dos elementos a serem utilizados neste estudo foram casca (SHELL) e sólido (SOLID), para a modelação dos tubos e parafusos, respectivamente, conforme utilizado por Oliveira et al. (2020) e Roquete et al. (2021). 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 em um modelo pode ser feita de forma livre ou mapeada. Para a modelagem utilizou-se a malha livre. Essa solução foi adotada tanto para os parafusos quanto para os tubos. Além disso, na geração da malha utilizou-se elementos quadriculares como opção principal, possibilitando o uso de elementos tetraédricos e triangulares como opção alternativa. Os modelos tiveram variação nos tamanhos das malhas para buscar uma melhor convergência dos resultados. Para os elementos de tipo cascas dos tubos utilizou-se malhas de 6 milímetros. Já para os elementos tipos sólidos dos parafusos utilizou-se malhas de 5 milímetros.

Para estabelecer as condições de contorno, os nós das extremidades dos tubos foram acoplados de forma que o deslocamento aplicado fosse igualmente distribuído ao longo da seção transversal. Nesses nós, em uma das extremidades foram restringidos o deslocamento e a rotação, simulando um engaste no tubo. Na outra extremidade aplicou-se um deslocamento de 15 milímetros para a tração e compressão nos nós dos perfis tubulares na direção do eixo z, simulando a compressão ou tração imposta sobre a ligação, uniformemente distribuída pelos nós, utilizando incrementos de deslocamentos de 0,5(mm). Para a solução do modelo numérico empregou-se o método incremental iterativo Newton-Raphson Padrão. Na Figura 3 está ilustrado o modelo numérico desenvolvido para as análises.

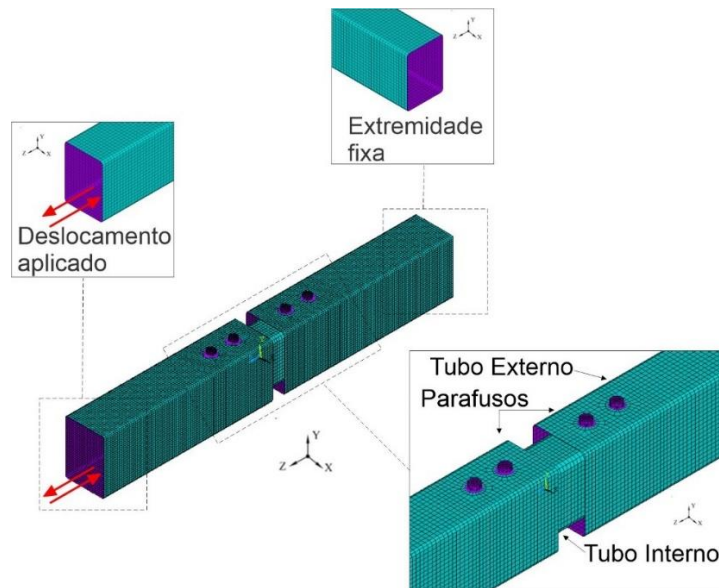


Figura 3: Modelo numérico

## 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.

## 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

Modelos	Número de parafusos	Tubo externo			Tubo interno*	
		Altura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Altura (mm)	Largura (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		

\*Em todos os modelos numéricos, a espessura do tubo interno foi igual a 5mm.

## 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 neste 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 (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 abaixo.

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

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

#### 2.4.2. Ruptura da Seção Líquida (RSL)

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

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

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

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. Ovalização do Furo (OF)

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 a seguir.

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

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

## 3. RESULTADOS

Na Tabela 2 está apresentado os resultados obtidos dos modos de falha encontrados nos modelos numéricos avaliados e pelas formulações apresentadas. Além disso, são mostrados os modos de falha do modelo e o local de ocorrência: tubo interno ou externo.

Para uma primeira análise dos modelos fez-se a relação carga de falha numérica e carga de falha teórica para todos os 31 modelos. Para a ligação sob tração, foi observado uma relação média de 0,87 com um coeficiente de variação (CoV) de 0,241 e para a ligação sob compressão a média foi de 0,83 e o coeficiente de variação de 0,218. O valor do CoV elevado pode ser explicado pelo fato da inexistência de dados experimentais.

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
Mean					0,87					0,83
CoV					0,241					0,218

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 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 a compressão.

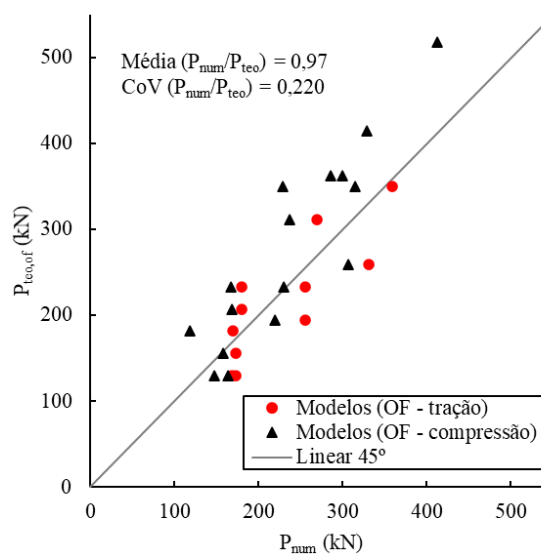


Figura 4:Relação Numérico Teórico Para Falha no Tubo Externo

Na Tabela 2 foi 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 5 observou-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. Notou-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.

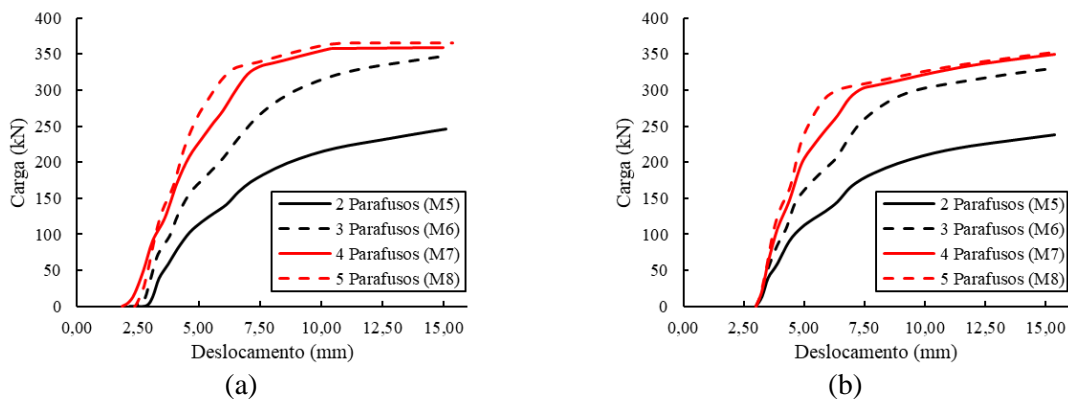


Figura 5: Influência do Número de Parafuso: (a) Compressão; (b) Tração

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.

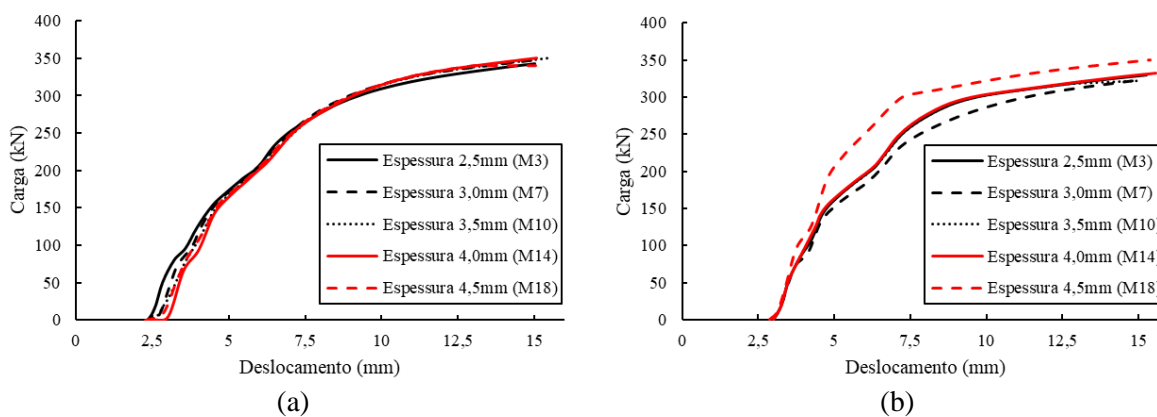


Figura 6: Influência da Espessura do Tubo Externo: (a) Compressão; (b) Tração

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um estudo para o desenvolvimento e verificação de um modelo numérico para a ligação tipo luva em perfis tubulares retangulares de aço submetidos à esforços axiais modelados com elementos de casca (SHELL 181) e de sólido (SOLID 186), para a modelação dos tubos e parafusos, respectivamente, conforme utilizado por Oliveira et al. (2020) e Roquete et al. (2021). As análises numéricas foram desenvolvidas via método dos elementos finitos através do software ANSYS 18.2 (2017). As análises dos critérios de falhas foram realizadas segundo Oliveira et al. (2020), Roquete et al. (2021) e Roquete et al. (2022).

Foi desenvolvido um modelo numérico, por meio de APDL, para avaliar o comportamento da ligação. A APDL criada permite a avaliação de forma parametrizada do modelo construído. Assim, foram simulados 62 modelos da ligação luva com perfis retangulares submetidos à esforços axiais sendo 31 modelos submetidos a compressão e 31 modelos submetidos a tração. O modelo desenvolvido numericamente permitiu avaliar o comportamento da ligação luva em perfil de seção tubular retangular. Após avaliação foi possível observar que os modos de falha dominantes nos modelos analisados foram de ruptura da seção líquida, escoamento da seção bruta ou ovalização dos furos.

Dos 31 modelos analisados a compressão, 23 modelos apresentaram falha dominante a ovalização dos furos e 8 modelos apresentaram falha dominante de escoamento da seção bruta. Enquanto os 31 modelos analisados a tração, 15 modelos apresentaram como falha dominante a ovalização dos furos e a ruptura da seção líquida ocorreu em 16. Observou-se que as falhas por ovalização dos furos ocorreram tanto nos tubos externos quanto nos tubos internos da ligação, já a falha por ruptura da seção líquida e escoamento da seção bruta se limita aos tubos internos.

Realizou-se também uma análise da relação entre a carga de falha numérica pela carga de falha teórica da ligação observou-se que a relação da ligação sob tração teve média de 0,87

com um coeficiente de variação (CoV) de 0,241, já para a ligação sob compressão foi encontrada uma relação média de 0,83 e um coeficiente de variação de 0,218. Analisando apenas o modo de falha de ovalização dos furos observado nos tubos externos da ligação e aplicando a mesma relação apresentada anteriormente temos que o valor médio dessa relação é de 0,97 com um coeficiente de variação igual 0,22 analisando o comportamento da ligação a tração e a compressão simultaneamente.

Notou-se 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. Considerando apenas as falhas nos tubos externos que recomendam Oliveira et al. (2020) e Roquete et al. (2021), obteve-se uma relação média de 0,97. Recomenda-se para trabalhos futuros análises experimentais da ligação em perfis tubulares retangulares para a calibração e validação do modelo numérico e para a redução do coeficiente de variação encontrado.

Avaliou-se também a influência do número de parafuso na ligação para a determinação da sua capacidade resistente, em que foi possível observar o ganho de resistência das combinações analisadas. Além disso, realizou-se a análise da influência da espessura do tubo externo da ligação em que foi possível notar que a carga final submetida os modelos foram muito parecidos não ocorrendo uma variação significativa para as espessuras analisadas. Sugere-se como trabalhos futuros uma análise da combinação ótima de número de parafusos por ganho de carga em relação ao aumento de custo da ligação. Por fim, com os critérios descritos anteriormente para elaboração do modelo numérico, conclui-se o modelo desenvolvido encontra-se adequado e pode ser utilizado para extrapolação de modelagens e análises futuras.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFSJ e a UFOP.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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

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

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

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

ANSYS INC. **ANSYS Version 18.2**. EUA: Swanson Analysis System, 2017.

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.

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.

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.

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.

OLIVEIRA, M. M. DE. **Análise de ligações tipo luva sob compressão**. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.

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.

ROQUETE, L. **Estudo de ligações tipo luva em perfis tubulares**. Tese de Doutorado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

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.

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.

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 90° usando um modelo numérico**. (XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Ed.)CILAMCE 2017. **Anais...**Florianópolis: 2017a

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.

SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E. **Steel Structures - Design and Behavior. Emphasizing Load and Resistance Factor Design**. Third Edit ed. [s.l: s.n.].

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.

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

WARDENIER, J.; PACKER, J. A.; ZHAO, X.-L.; VEGTE, A. VAN DE. **Hollow sections in structural applications**. 2nd. ed. Geneva: CIDECT, 2010.