



AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE PARAFUSOS NA LIGAÇÃO TIPO LUVA EM PERFIS TUBULARES COM PARAFUSOS CRUZADOS

Lucas Roquete Amparo

lucasroquete@gmail.com

Departamento de Tecnologia em Engenharia Civil Computação e Humanidades, Universidade Federal de São João del Rei -UFSJ

Campus Alto Paraopeba, Fazenda do Cadete, 36420-000, Ouro Branco, Minas Gerais, Brazil.

Lucas Alves Escanio

Arlene Maria Cunha Sarmanho

lucasaescanio@gmail.com; arlene.sarmanho@gmail.com;

Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto UFOP - Campus Morro do Cruzeiro, 35400-000, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil.

João Alberto Venegas Requena

requena@fec.unicamp.br

Faculdade de Eng. Civil, Arq. e Urb., Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brazil

Abstract. *Este trabalho apresenta um estudo da variação da quantidade de parafusos na tipologia de ligação denominada como luva. O estudo tem como objetivo a avaliação da influência do número de parafusos nos modos de falha da ligação de flexão dos parafusos em perfis tubulares, submetidos à tração, conectados por um tubo interno (luva) por meio de parafusos passantes aos tubos, cruzados a 90°. Os estudos foram realizados por análises numéricas e experimentais. Para analisar essa influência no comportamento desta ligação e em seus possíveis modos de falha, foi desenvolvido um modelo numérico via método dos elementos finitos. O modelo numérico foi calibrado por meio de ensaios experimentais. A partir deste modelo foi possível a variação da quantidade de parafusos na ligação e a análise dos modos de falha da ligação e a capacidade resistente da mesma.*

Keywords: *Estruturas metálicas, Perfis tubulares, Ligações parafusadas, Análise numérica*

1 INTRODUÇÃO

Os perfis tubulares possuem ótimo desempenho estrutural aos esforços de tração, compressão, torção ou mesmo a esforços combinados, seu uso adequa-se perfeitamente aos sistemas treliçados em que os esforços axiais são dominantes. O uso dessa tipologia de perfil proporciona maior harmonia com o ambiente, ideal para melhores aspectos estéticos.

Visando a aplicabilidade dos perfis tubulares e levando em consideração a necessidade de emenda das barras, usadas para o vencimento de grandes vãos, inúmeros estudos são realizadas, em âmbito teórico, numérico e experimental com o objetivo de desenvolvimento de novas tipologias de ligação e propostas de metodologias de dimensionamento.

A tipologia de ligação mais comumente empregada é a ligação flangeada como apresentado em Rockey e Griffiths (1970), Couchaux *et al* (2009), Heinisuo *et al* (2012), Fidalgo (2014) e Pereira (2016). Com o objetivo de facilitar o transporte dos elementos e a montagem da estrutura uma nova tipologia de ligação vem sendo estudada (Vieira (2011), Silva (2012), Amparo (2014), Amparo *et al* (2014), Simões *et al* (2014), Vieira (2014), Amparo *et al* (2015a), Amparo *et al* (2015b) e Luo *et al* (2016)). A ligação é chamada de luva, composta por dois tubos externos (banzos de uma treliça) ligados internamente por um outro tubo (luva) através de parafusos passantes. Fig. 1 ilustra uma representação da ligação com parafusos cruzados. Os parafusos da ligação em luva ficam praticamente imperceptíveis à distância, dando a impressão de um tubo contínuo contribuindo para harmonia estética da estrutura.

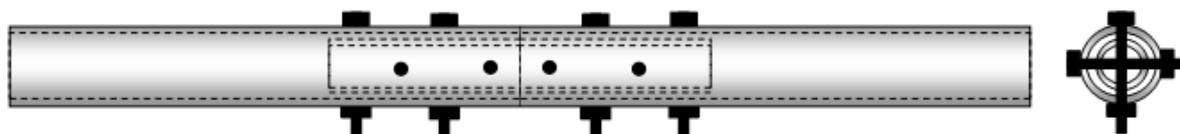


Figura 1. Representação da ligação tipo luva cruzados a 90°

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da variação do número de parafusos nos modos de falha da ligação luva em perfis tubulares, submetidos à tração, por meio de parafusos passantes aos tubos, cruzados a 90°. Para analisar essa influência no comportamento desta ligação e em seus possíveis modos de falha, foi desenvolvido um modelo numérico via método dos elementos finitos. O modelo numérico foi calibrado por meio de ensaios experimentais.

2 ANÁLISE NUMÉRICA

Para avaliação do comportamento da ligação um modelo numérico da ligação luva foi desenvolvido utilizando o software ANSYS (2009). Neste item são apresentadas as características e propriedades do modelo numérico em análise.

2.1 Modelo numérico

Para a criação do modelo numérico baseou-se nos ensaios experimentais realizados por Amparo (2014). O método numérico empregado para análise foi o Método dos Elementos Finitos com uso do software ANSYS 12.1 (ANSYS, 2009). De acordo com a tipologia de ligação em análise os aspectos dos modelos de elementos finitos são descritos a seguir.

O modelo foi gerado para ligação luva com cinco parafusos cruzados a 90°, tubo externo com diâmetro de 88,9 mm e espessura igual a 5,5 mm e tubo interno (luva) com diâmetro de 73,0 mm e espessura igual a 5,5 mm. Os parafusos do modelo possuíam diâmetro de 12,7 mm. As características mecânicas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características mecânicas dos modelos

Tubo Externo				Tubo Interno				Parafusos			
f_y (MPa)	ϵ_y (%)	f_u (MPa)	ϵ_u (%)	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	f_u (MPa)	ϵ_u (%)	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	f_u (MPa)	ϵ_u (%)
375,0	0,1875	568,8	18,232	399,5	0,1998	647,4	18,232	659,3	0,4988	930,6	9,531

O modelo numérico foi criado de acordo com a configuração do protótipo ensaiado, um tubo externo e um interno (Fig.2).

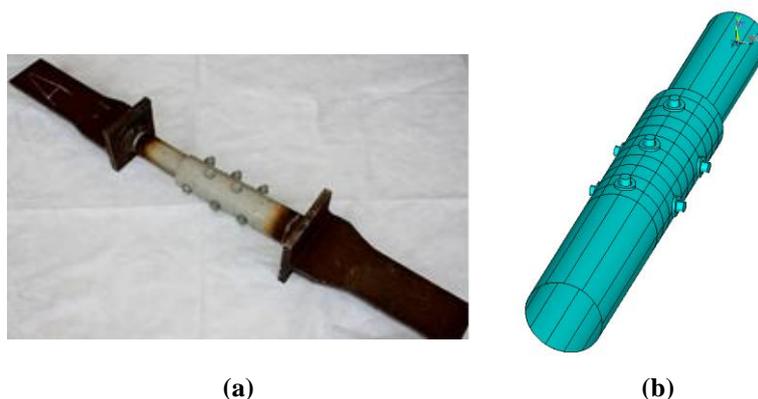


Figura 2. Configuração do modelo: (a) protótipo ensaiado (b) modelo numérico criado.

Para permitir a transmissão dos esforços entre o tubo interno e externo para os parafusos foram utilizados os elementos de contato apresentados a seguir. O tubo interno foi deslocado (Fig.3) para eliminar a folga existente entre os parafusos e os tubos. Evitando dessa maneira deslocamentos de corpo rígido devido a folga entre os parafusos e os tubos.

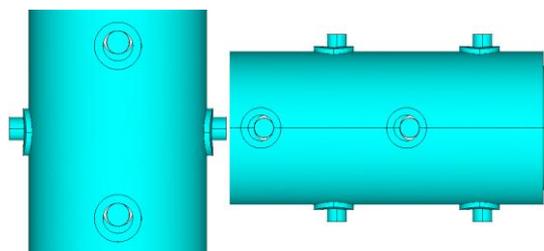


Figura 3. Configuração do modelo após o ajuste da folga

2.1.1 Elementos

Foram utilizados dois tipos de elementos diferentes na luva, um deles foi o elemento tipo sólido para representar os parafusos e para modelar os tubos foi utilizado um elemento tipo casca. O elemento sólido escolhido foi o SOLID186, Fig. 4. Este é um elemento de sólido estrutural homogêneo de ordem superior que possui 20 nós e que aceita malhas irregulares, possibilitando a aplicação de carga em qualquer direção. O elemento possui três graus de liberdade por nó. Para os tubos foi escolhido o elemento SHELL181, Fig. 5, é um elemento estrutural homogêneo de casca com quatro nós que aceita malhas irregulares, possibilitando

também a aplicação de carga em qualquer direção. O elemento possui seis graus de liberdade por nó (translações e rotações em X, Y e Z).

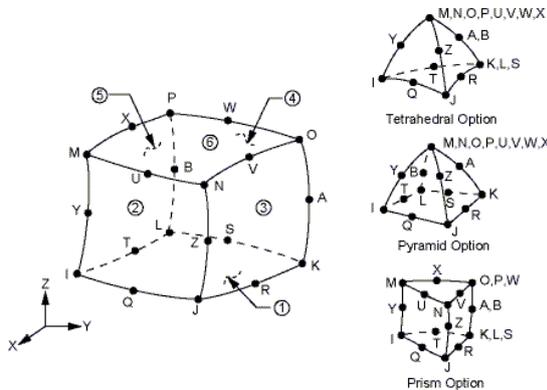


Figura 4. Elemento sólido SOLID 186

FONTE: ANSYS (2009)

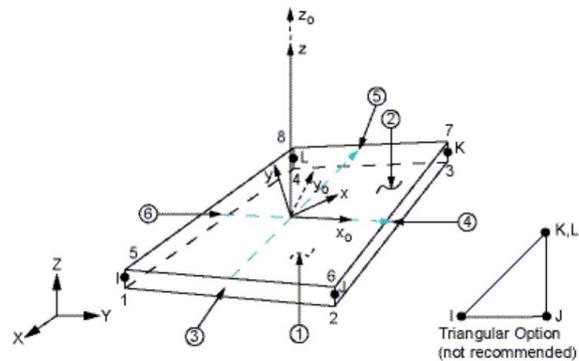


Figura 5. Elemento de casca SHELL 181

FONTE: ANSYS (2009)

O modelo numérico também leva em consideração o contato entre as áreas dos furos dos tubos com as áreas laterais dos parafusos utilizando o tipo de contato (Surface-to-Surface), utilizando elementos TARGE170 e CONTA174, Fig.6.

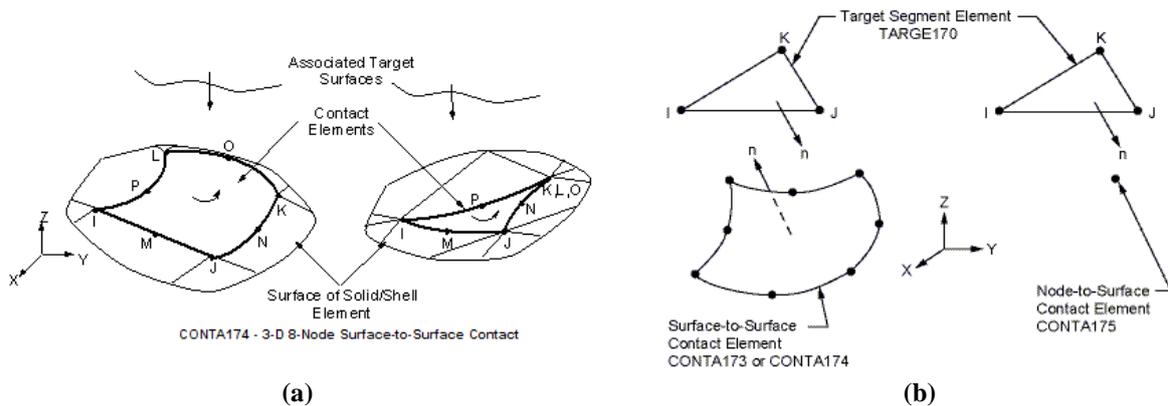


Figura 6. Elementos do par e contato superfície-superfície: (a) CONTA 174 (b) TARGE 170

FONTE: ANSYS (2009)

2.1.2 Malha e condições de contorno

A geração da malha em um modelo poder feita de forma livre ou mapeada. No modelo apresentado utilizou-se a malha livre, Fig 7. O tamanho da malha adotado, segundo estudo realizado por Amparo *et al* (2015a), foi de 7 mm para os elementos SHELL181 e de 4 mm para SOLID186.

Para estabelecer as condições de contorno, os nós das extremidades dos tubos foram acoplados de forma que o deslocamento aplicado no tubo interno fosse igualmente distribuído ao longo da extremidade do tubo (Fig. 8(a)). Nestes nós foi aplicado um deslocamento de 20 mm (direção horizontal), simulando a tração aplicada pela prensa, uniformemente distribuída pelos nós. Esse deslocamento foi aplicado porque os modelos experimentais alcançaram sua capacidade final com nível de deslocamentos aproximadamente iguais a

20 mm. Para a condição de extremidade engastada, os deslocamentos da extremidade do tubo externo foram impedidos em todas as direções (x,y e z), simulando a fixação do tubo na prensa onde foram ensaiados os protótipos (Fig. 8(b)).

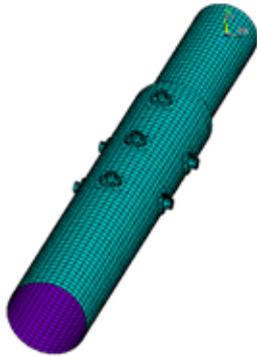


Figura 7. Malha do modelo.

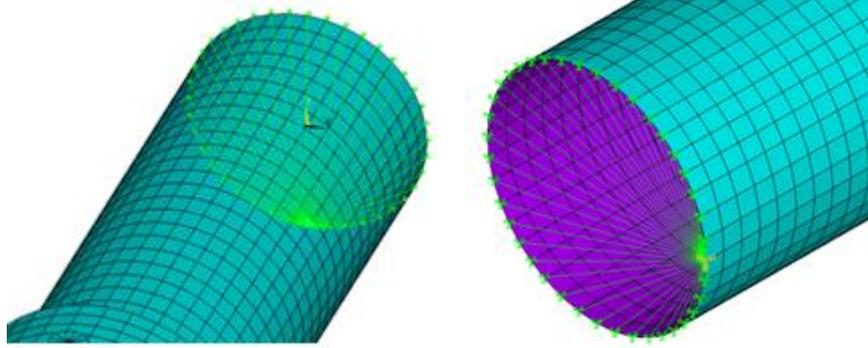


Figura 8. Condições de contorno: (a) acoplamento dos nós para aplicação do deslocamento no tubo interno; (b) acoplamento dos nós para impedir o deslocamento e a rotação da extremidade do tubo externo.

2.2 Análise não linear

Foi utilizada a linguagem de programação do software ANSYS 12.1, APDL (ANSYS Parametric Design Language) com o objetivo de automatizar a construção do modelo e facilitar suas variações de geometria com controle de todas as características inseridas no modelo numérico.

Foi feita uma análise não linear considerando as propriedades mecânicas do aço. Nesta análise houve a aplicação de deslocamento ao invés da aplicação de força. O deslocamento, no sentido do comprimento do perfil, é imposto nos nós de extremidades e com isso são obtidas as reações de carregamento.

Com relação a não linearidade do material, foi utilizado material multilinear (*Multilinear Isotropic Hardening*) com três pontos para representar a curva tensão versus deformação do aço dos tubos e parafusos, as deformações correspondentes ao final de cada trecho foram definidas com base no diagrama tensão versus deformação dos aços de alta resistência e baixo carbono apresentado por Salmon e Johnson (1990). A configuração para os parafusos está representada na Fig. 9(a) e para os tubos na Fig. 9(b).

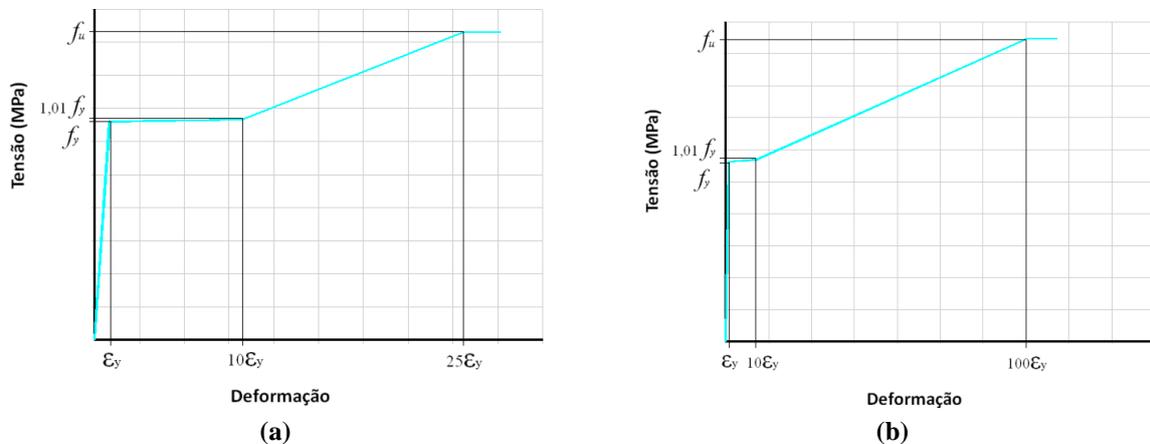


Figura 9. Relação constitutiva dos materiais

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Modelo Numérico *versus* Experimental

Este item apresenta a comparação dos resultados numéricos e experimentais. A ruptura dos protótipos ensaiados por Amparo (2014) foi caracterizada nos tubos internos da ligação (luva), foi observada a configuração de rasgamento da seção, ocorrendo na diagonal entre os dois últimos furos do tubo interno. Conclui-se então que existe uma concentração de tensões nesta região em diagonal de um furo para o seguinte. A Fig. 10(a) apresenta o comportamento do modelo numérico, após análise no software ANSYS. Uma comparação da configuração final do modelo experimental com 5 parafusos cruzados com o respectivo modelo numérico é apresentada na Figura 10(b).

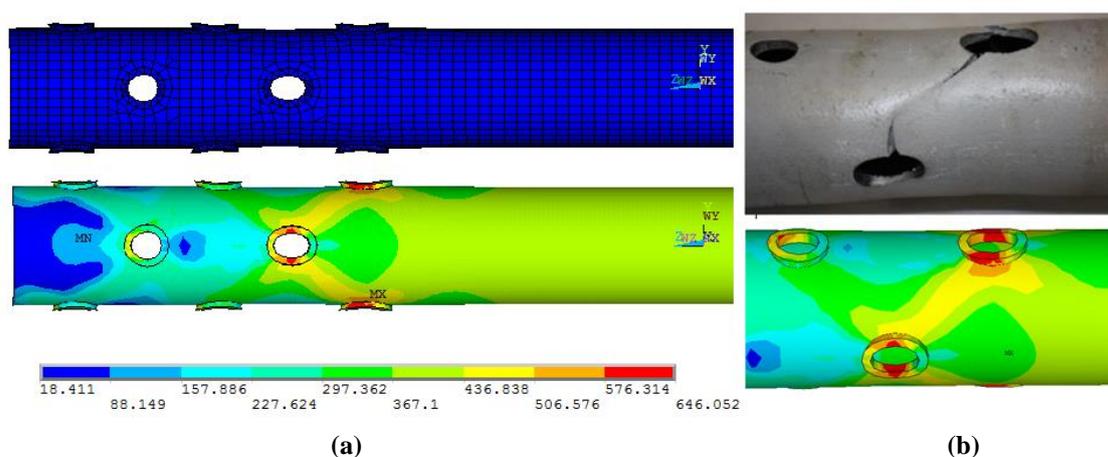


Figura 10. Configuração deformada: (a) tensão de Von Mises no tubo interno (b) comparação dos modelos experimental e numérico na região de ruptura

Observa-se que o modelo numérico reproduz o mesmo comportamento da luva, obtido no ensaio experimental. O estado limite relacionado a ovalização dos furos é perceptível em ambos modelos. Existe uma concentração de tensões com configuração em diagonal entre os dois últimos furos do tubo interno, local da ruptura no ensaio experimental.

A Fig.11 apresenta as curvas Força *versus* Deslocamento dos modelos experimentais da série (CC) dos protótipos CC-5X2Y3/1 e CC-5-X2Y3/2 (ligação luva com 5 parafusos cruzados a 90°, configuração idêntica ao modelo numérico) (Amparo, 2014) e do modelo numérico.

Observa-se que a curva do modelo numérico apresenta um comportamento semelhante às curvas dos modelos experimentais, com pequenas diferenças nos níveis de carga e de inclinações. Na fase elástica o comportamento do modelo numérico é aproximadamente o mesmo dos protótipos ensaiados. As diferenças podem ser atribuídas às imperfeições existentes nos protótipos da ligação. Apesar das diferenças observadas, avaliando o aspecto geral do comportamento das curvas dos modelos numérico e experimental, pode-se afirmar que o modelo numérico representa de forma adequada o modelo ensaiado.

Na Fig.11 observa-se um comportamento linear, com proporcionalidade de carga e deslocamento, na fase inicial de carregamento, fase elástica. Em um determinado ponto as curvas apresentam mudanças de inclinações. Essas mudanças de inclinação podem

caracterizar algum mecanismo de falha na ligação. Em sequência observa-se um pequeno trecho onde tem-se deslocamento com carregamento constante, nesta etapa pode-se associar o fenômeno da ovalização excessiva do furo (caracterizando a estrição da seção) seguido de um ganho de resistência até a ruptura.

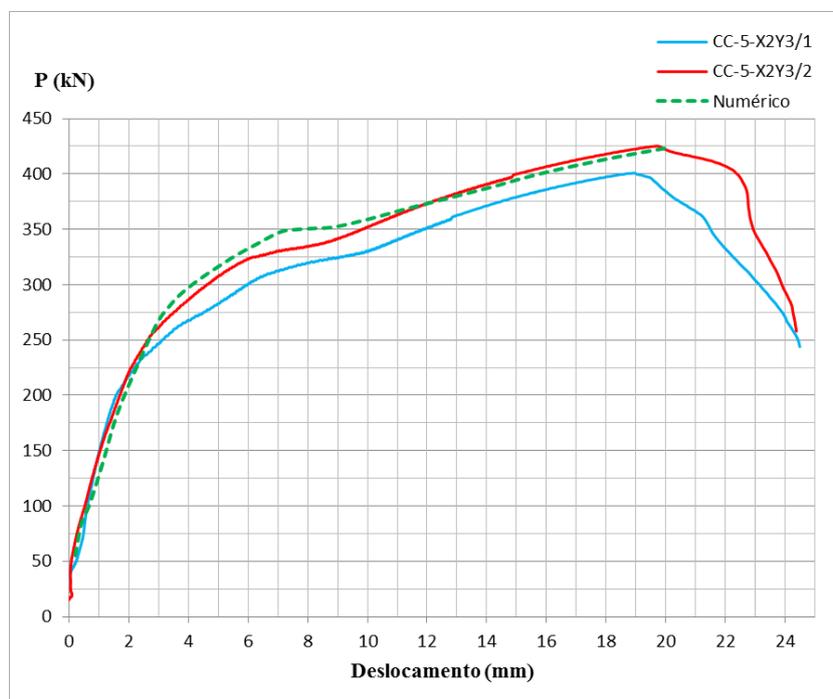


Figura 11. Curvas de Força versus Deslocamento dos modelos numérico e experimental.

3.2 Influência do número de parafusos

Para essa análise foram confeccionados e simulados 5 modelos com um, dois, três, quatro e cinco parafusos. As demais características físicas e geométricas foram as mesmas do modelo apresentados no Item 3.1. Para todos modelos aplicou-se um deslocamento de 20 mm. A Fig. 12 apresenta as curvas Força versus Deslocamento obtidas para cada modelo.

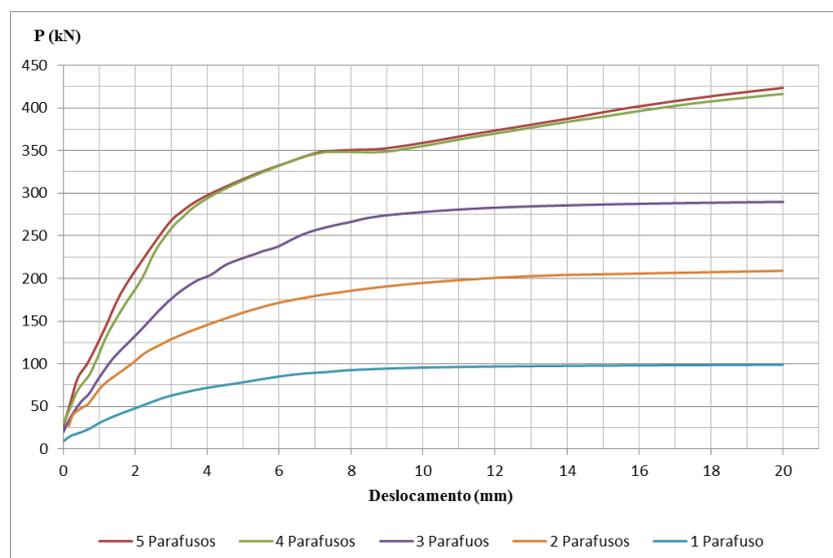


Figura 12. Curvas de Força versus Deslocamento

Observa-se que o aumento no número de parafusos melhora o comportamento da ligação. Há um ganho considerável de resistência com o acréscimo de um parafuso em cada modelo. Porém para a mudança de quatro para cinco parafusos não é possível observar diferença significativa na resistência da ligação. As curvas com uso de quatro e cinco parafusos apresentam o mesmo comportamento. As curvas dos modelos com um, dois e três parafusos apresentam comportamentos semelhantes, porém com níveis de carregamentos diferentes para mesmos deslocamentos, e abaixo do nível de carga dos modelos com quatro e cinco. As mudanças nos comportamentos estão associadas aos diferentes modos de falha para essa ligação.

Para o modelo com um parafuso foi observado que a flexão do parafuso é o primeiro modo de falha, caracterizado pelo início de escoamento na região central do parafuso, como observado na Fig. 13. Podendo ser associada à primeira mudança de inclinação da curva *versus* deslocamentos.

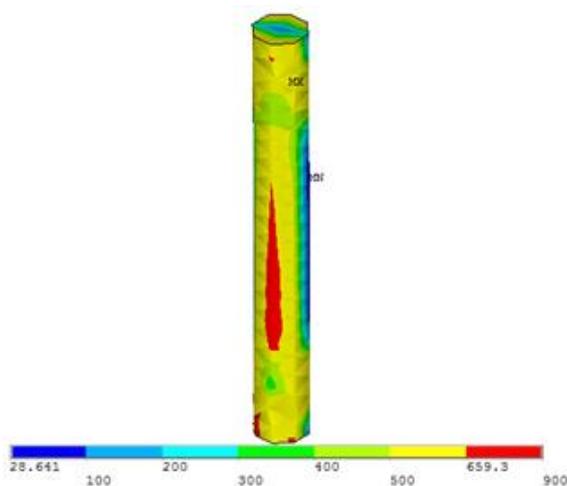


Figura 13. Tensão de von Mises (MPa) caracterizando o início de escoamento no parafuso.

Para o modelo com dois parafusos evidencia-se a ocorrência flexão do parafuso aproximadamente de forma simultânea, Fig.14. Os níveis de carga no primeiro e no segundo parafuso de 201,32 kN e 203,57 kN, respectivamente, para início do escoamento nas extremidades da região central dos parafusos. Para esse modelo é observado também o início do cisalhamento dos parafusos.

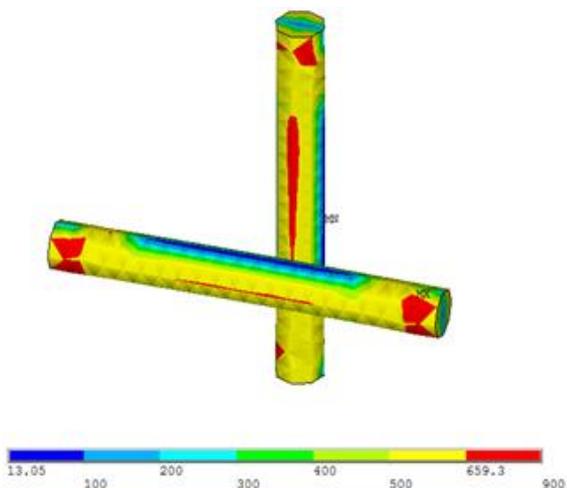


Figura 14. Tensão de von Mises (MPa) caracterizando o início de escoamento nos parafusos.

Para o modelo com três parafusos (Fig.15) foi observado flexão nos parafusos, porém com ocorrência não simultânea. Não foi caracterizada a presença de falha por cisalhamento. Neste caso deve ser avaliada a existência do início de outro modo de falha da ligação, como, por exemplo, a ovalização dos furos, influenciando perda de resistência da ligação.

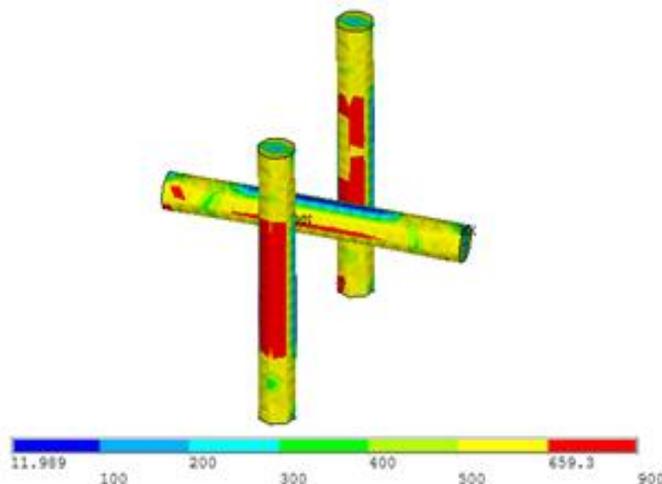


Figura 15. Tensão de von Mises (MPa) caracterizando o início de escoamento nos parafusos.

Para o modelo com quatro parafusos (Fig.16) foi observado flexão nos parafusos, também com ocorrência não simultânea. Em alguns parafusos foi observado o cisalhamento. Porém para este modelo é interessante observar a carga que provoca a flexão em cada parafuso na curva do comportamento global da ligação (Fig.16(b)). Observa-se que a primeira flexão ocorre no mesmo nível de carregamento onde tem-se carga constante com deslocamento, neste caso a flexão pode estar associada à ovalização dos furos.

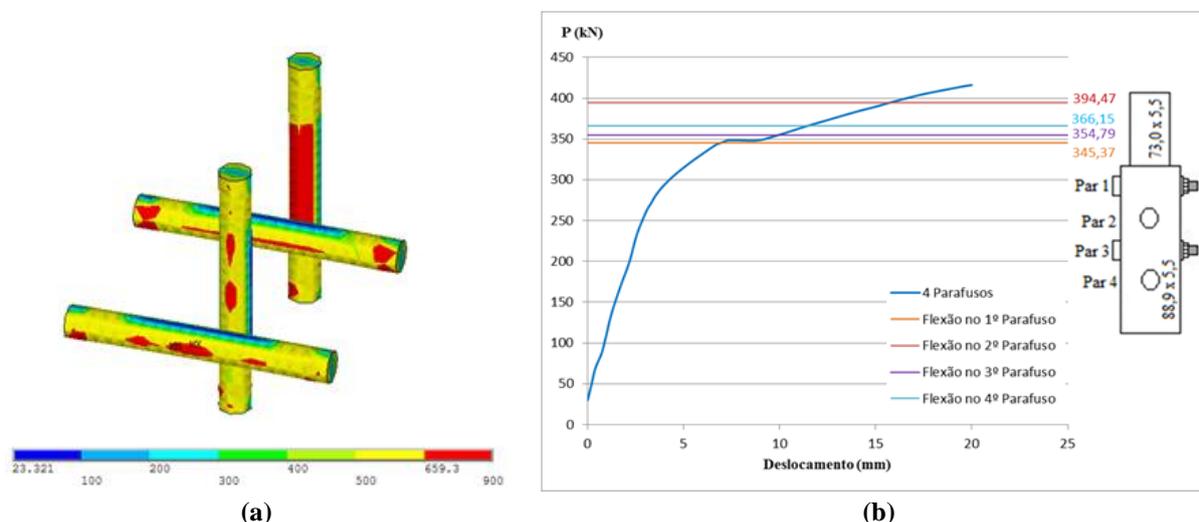


Figura 16. Modelo com quatro parafusos: (a) tensão de von Mises (MPa) (b) carga que provoca flexão nos parafusos associadas curva de carga versus deslocamento do modelo.

O modelo com cinco parafusos apresentou flexão somente em dois parafusos, e com nível de carga acima da ovalização dos furos (Fig. 17). Neste caso os modos de falha podem estar isolados, com ocorrência de flexão após a ovalização. Para este modelo por simplificação não será apresentado a distribuição de tensões de von Mises.

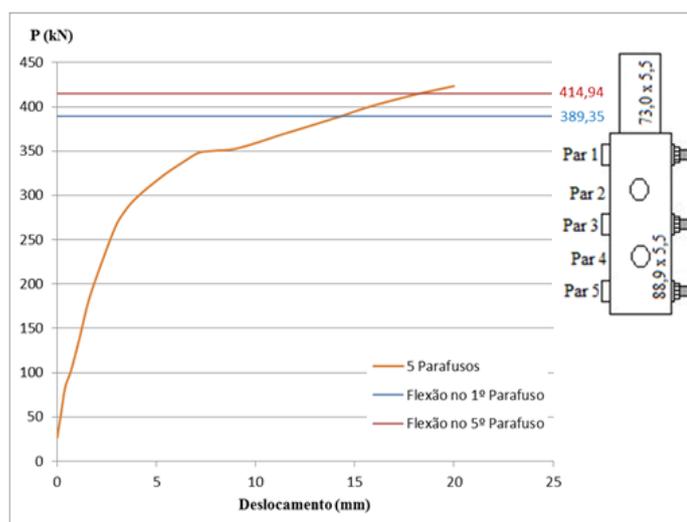


Figura 17. Carga que provoca flexão nos parafusos associadas curva de carga *versus* deslocamento do modelo

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um estudo da variação da quantidade de parafusos na tipologia de ligação denominada como luva, composta por dois tubos externos (banzos) ligados internamente por um outro tubo (luva) através de parafusos passantes.

O objetivo foi a avaliação da influência do número de parafusos nos modos de falha da ligação de flexão dos parafusos em perfis tubulares, submetidos à tração, conectados por um tubo interno (luva) por meio de parafusos passantes aos tubos, cruzados a 90°.

Para realização do estudo foram feitas análises numéricas. O modelo numérico foi desenvolvido via método dos elementos finitos com uso do software ANSYS 12.1 e calibrado por meio de resultados de ensaios experimentais desenvolvidos por Amparo (2014).

Os resultados experimentais e numéricos foram comparados a partir da análise numérica não linear. O modelo de elementos finitos mostrou-se adequado para a análise do comportamento da nova ligação, apesar de pequenas diferenças observadas nas curvas de Força *versus* Deslocamento.

A análise da flexão nos parafusos comprovou que este estado limite está presente na ligação tipo luva e deve ser analisado mais detalhadamente. Em todos os modelos numéricos foi possível observar que os parafusos sofrem flexão. Foi possível identificar isoladamente a ocorrência de flexão em cada parafuso (exceto em alguns parafusos do modelo com 5 parafusos). Em alguns modelos observou-se uma concentração elevada nas extremidades dos parafusos o que pode evidenciar a presença de cisalhamento. Em alguns modelos foi observado que o esmagamento da parede dos furos (ovalização) pode estar associado, ou ocorrendo antes do fenômeno da flexão.

Os resultados numéricos obtidos comparados com os experimentais e apresentaram elevadas capacidades de resistência e não apontaram fatores que inviabilizassem o uso dessa tipologia de ligação. Verificando-se, entretanto a necessidade de avaliação adequada dos modos de falha presentes na ligação, como, por exemplo, a flexão dos parafusos, não verificada em parafusos segundo a ABNT NBR 8800 (2008).

A partir desse estudo, associando aos resultados experimentais é possível a proposição de formulações analíticas para o dimensionamento dessa nova tipologia de ligação. Destaca-se, porém, a necessidade de avaliação isolada dos modos de falha presentes na ligação. A utilização de parafusos com diâmetros maiores pode diminuir a possibilidade de ocorrência de flexão excessiva, visto que a resistência à flexão dos parafusos está diretamente relacionada com o seu diâmetro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFOP, UNICAMP, CAPES, CNPq e FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- ABNT 2008. NBR 8800, 2008. *Projeto de Estrutura de Aço e de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios*. - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ANSYS, 2009. *User's Manual*. Help, Inc. theory reference (version 12.1).
- Amparo, L.R., 2014. Análise Teórico-Experimental de ligações tipo luva compostas por perfis tubulares com parafusos em linha e cruzados. *Dissertação de mestrado*. Universidade Federal de Ouro Preto, MG.
- Amparo, L. R., Freitas, A. M. S., Requena, J. A. V., Araújo, A. H. M., 2014. Theoretical and experimental analysis of bolted sleeve connections for circular hollow sections. *Eurosteel 2014*, Napoles, Italy.
- Amparo, L. R., Escanio, L. A., Freitas, A. M. S., Pereira, C. O.V.R., Requena, J. A. V., 2015a. Análise numérica e experimental de ligação tipo luva em perfis tubulares com parafusos cruzados connections. *XXXVI Ibero-Latin American Congress in Computational Methods in Engineering – CILAMCE2015*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Amparo, L. R., Freitas, A. M. S., Requena, J. A. V., Araújo, A. H. M., 2015b. Analysis of the possible failure modes in CSH bolted sleeve connections. *Anais do 15º ISTS - Tubular Structures XV, International Symposium on Tubular Structures*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Couchaux, M., Hjiatj, M., e Bureau, A., 2009. Effect of Contact on the Elastic Behavior of Bolted Connections. *Proceedings of the Nordic Steel Construction Conference*.
- Fidalgo, A. M., 2014. Estudo Teórico e Numérico do Comportamento de Ligações tipo Flange Circular para Estruturas Tubulares de Aço. *Dissertação de mestrado*. Faculdade de Engenharia Civil. Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, Campinas, Brasil.
- Heinisuo, M., Ronni, H., Perttola, H., Aalto, A., Tiainen, T., 2012. End and Base Plate Joints with Corner Bolts for Rectangular Tubular Member, *Journal of Constructional Steel Research* 15, pp. 85-92.
- Luo, F. J, Bai, Y., Yang, X. e Lu, Y., 2016. Bolted Sleeve Joints for Connecting Pultruded FRP Tubular Components. *Journal of Composites for Construction*. 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000580, 04015024.
- Pereira, C. O. V. R., 2016. Análise Numérico-Experimental de Resistência a Flexão em Ligações Tubulares Flangeadas. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, Brasil.
- Rockey, K. C.; Griffiths, D. W., 1970. The Behavior of Bolted Flanged Joints in Tension – Ring Flanges. 71 f. University of Wales – Faculty of Applied Science, Cardiff.

Salmon, C. G. e Johnson, J. E., 1990. *Steel Structures – Design and Behavior. Emphasizing Load and Resistance Factor Design*. Third Edition.

Silva, J. M., 2012. Análise teórica-experimental de ligações tipo tubulares tipo "luva". *Dissertação de mestrado*. Universidade Federal de Ouro Preto.

Simões, R., Jordão, S., Freitas, P., 2014. Ligações de emenda entre perfis tubulares. *Revista da Estrutura do Aço*, vol. 3, n. 2, pp. 168-186.

Vieira, R. C., Vieira, R. F. Requena, J. A. V and Araújo, A. H.M. (2011). Numerical Analysis of CHS bolted sleeve connections. *Eurosteel 2011*, Budapest, Hungary.

Vieira, R. C., 2014. Análise numérica e experimental de ligações tubulares de aço do tipo luva parafusada. *Tese de Doutorado*. Universidade Estadual de Campinas.

Vieira, R. C., Requena, J. A. V., Sarmanho, A. M., Araújo, A. H.M., (2016). Análise numérica de ligação em luva parafusada para perfis tubulares circulares. *Revista da estrutura de Aço*. Volume 5. Número 1 (abril/2016). p. 1 – 20, Brasil.