



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Matheus Miranda de Oliveira

ANÁLISE DE LIGAÇÕES TIPO LUVA SOB COMPRESSÃO

Ouro Preto – MG
Julho de 2019



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Matheus Miranda de Oliveira

ANÁLISE DE LIGAÇÕES TIPO LUVA SOB COMPRESSÃO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas e Construção.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Arlene Maria Cunha Sarmanho
Coorientador: Prof. Dr. Lucas Roquete

Ouro Preto – MG
Julho de 2019

O482a Oliveira, Matheus Miranda de.
Análise de ligações tipo luva sob compressão [manuscrito] / Matheus
Miranda de Oliveira. - 2019.
93f.: il.: color; graf; tabs.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Arlene Maria Cunha Sarmanho.
Coorientador: Prof. Dr. Lucas Roquete.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.
Área de Concentração: Estruturas e Construção.

1. Estruturas metálicas. 2. Perfis tubulares circulares. 3. Ligações tubulares.
4. Ligação luva. 5. Análise numérica. I. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. II.
Roquete, Lucas. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.01

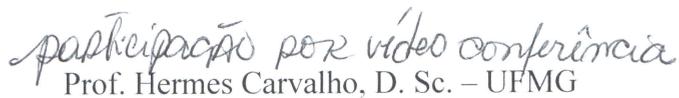
ANÁLISE DE LIGAÇÕES TIPO LUVAS SOB COMPRESSÃO

AUTOR: MATHEUS MIRANDA DE OLIVEIRA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 30 de julho de 2019, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


Prof. Arlene Maria Cunha Sarmanho, D. Sc. – UFOP (Presidente)


Prof. Lucas Roque Amparo, D. Sc. – UFSJ


Prof. Hermes Carvalho, D. Sc. – UFMG



Prof. Vinícius Nicchio Alves, D. Sc. – UFOP

E repousará sobre ele o Espírito do Senhor, o espírito de sabedoria e de entendimento, o espírito de conselho e de fortaleza, o espírito de conhecimento e de temor do Senhor. (Isaías 11:2)

Dedico essa dissertação a minha família, em especial aos meus avós.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à Deus, por me conceder fé, equilíbrio, sabedoria e saúde para conseguir vencer mais uma etapa.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Nilton e Maria do Carmo, pelo apoio e incentivo incondicional aos meus estudos para que eu pudesse chegar até esse momento. Agradeço todo o amor, o carinho e a compreensão. A minha irmã Luana, por toda paciência, compreensão e incentivo em todas as horas. A minha namorada Sibebe, por toda atenção e apoio nos momentos mais difíceis. Aos meus avós, símbolo de serenidade e solidariedade. Essa realização é a prova da nossa união, do nosso companheirismo e do bem-querer.

Agradeço todos os amigos e familiares que contribuíram em cada fase do mestrado, pelos conselhos, ajuda e momentos divertidos. A todos do laboratório de estruturas (LABEST), professores, funcionários, doutorandos, mestrandos e alunos de iniciação científica, por todo conhecimento compartilhado, pelas dicas, pelos momentos descontraídos e por sempre estarem dispostos a ajudar e partilhar ideias.

A minha orientadora Arlene, um exemplo de pesquisadora e de pessoa, agradeço a confiança, a oportunidade, o ensino e a atenção, essenciais para o meu desenvolvimento. Buscar o aprendizado ficou mais prazeroso a partir da dedicação e paciência entregues.

Ao meu coorientador Lucas, um amigo dos tempos de graduação, agradeço o apoio e os conselhos em todos os momentos da minha vida, um grande ser humano que pretendo cultivar a amizade. Fico grato por confiar em meu potencial e me ajudar nos momentos de desânimo e desespero.

Agradeço a FAPEMIG, a CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento dessa pesquisa e a UFOP por conceder essa oportunidade.

RESUMO

A utilização de perfis tubulares de aço na construção metálica é difundida como uma alternativa aos tradicionais perfis abertos e em algumas aplicações é a mais viável. Nesse contexto, tem-se buscado facilitar a execução, montagem e manutenção, bem como reduzir custos e melhorar o *design* das estruturas. Assim, esse trabalho apresenta estudos sobre um novo tipo de emenda entre perfis tubulares de seção circular aplicado a sistemas treliçados, a ligação tipo luva. A ligação explorando a eficiência quanto a resistência a tração e compressão dos perfis tubulares, bem como seu apelo estético. A ligação luva é composta por dois tubos de seção circular ligados por parafusos passantes a um terceiro tubo interno e também de seção circular e com menor diâmetro. A ligação permite uma harmonia na continuidade do perfil, tornando-se uma ligação que induz esteticamente a uma continuidade das barras ligadas na estrutura real. Algumas pesquisas anteriores avaliaram a ligação luva com parafusos passantes e com a furação alinhada e cruzada sob força axial de tração. Neste trabalho avaliou-se o comportamento da ligação luva sob compressão. Foi desenvolvido um modelo numérico em elementos finitos utilizando o programa computacional ANSYS, permitindo a análise numérica com variações de diversas características geométricas da ligação. As análises numéricas/paramétricas propiciaram a identificação dos possíveis modos de falha da ligação, sendo eles: escoamento da seção bruta, flexão nos parafusos, cisalhamento do parafuso e ovalização dos furos. Além disso, pôde-se estudar parâmetros geométricos limites para o dimensionamento e utilização da luva sob compressão. Ao final foi possível propor e avaliar formulações existentes para a determinação da capacidade resistente da ligação atestando sua eficiência e aplicabilidade.

Palavras-chave: Estruturas metálicas, perfis tubulares circulares, ligações tubulares, ligação luva, análise numérica.

ABSTRACT

Hollow steel sections are used in steel structures as an alternative to the traditional use of open cross sections and is the most viable option in some applications. In this context, the facilitation of execution, assembly and maintenance has been sought, as well as the reduction of costs and better structural design. Therefore, this work presents studies about a new type of connection between circular hollow sections (CHS) in a truss system, the sleeve connection. This connection explores the efficiency, aesthetics and resistance of hollow sections subjected to tension and compression. The sleeve connection is composed of two tubes with circular sections connected by bolts to an inner tube with a smaller diameter. The connection allows harmony in the continuity of the profile, aesthetically inducing a continuity of bars connected to the real structure. Previous researches analyzed sleeve connections with staggered bolts and crossed bolts dispositions and under axial tension. In this work, the behavior of sleeve connections under compression was analyzed. A numerical model with finite elements was developed using the commercial software ANSYS, that allowed a numerical analysis with geometric properties variations. The numerical/parametric analyses provided the identification of the possible failure modes of the connection: yielding of gross cross section, bolt bending, shear failure of bolts and bearing failure. Furthermore, it was possible to study geometric parameters limits to the design and use of sleeve connections under compression. At the end, formulations were proposed to determine the ultimate bearing capacity of the connection, attesting its efficiency and applicability.

Keywords: steel structures, circular hollow sections, tubular joints, sleeve connection, numerical analysis.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	19
1.2	Justificativa.....	20
1.3	Metodologia.....	21
1.4	Descrição do trabalho	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	Estudos sobre emendas entre perfis tubulares	22
2.2	Estudos sobre a ligação luva.....	25
3	REVISÃO TEÓRICA DA LIGAÇÃO LUVA.....	33
3.1	Nomenclatura e parâmetro.....	33
3.2	Modos de falha.....	35
3.2.1	Força axial de compressão resistente dos tubos	35
3.2.2	Cisalhamento do parafuso – CP.....	36
3.2.3	Flexão nos parafusos – FP.....	37
3.2.4	Esmagamento da parede do furo (ovalização do furo - OF).....	41
4	MODELAGEM NUMÉRICA	43
4.1	Considerações iniciais.....	43
4.2	Propriedades mecânicas dos materiais.....	44
4.3	Modelo e geometria da ligação	46
4.4	Elementos finitos	50
4.5	Estudo de malha	54
4.6	Condições de contorno, carregamento e método de solução	57
4.7	Critérios de falha	57
4.7.1	Critério de von Mises.....	58
4.7.2	Pico de resistência	59
5	ANÁLISE PARAMÉTRICA E PROPOSTAS DE FORMULAÇÕES.....	60
5.1	Propriedades mecânicas dos modelos.....	60
5.2	Propriedades geométricas dos modelos	60
5.2.1	Série A.....	61
5.2.2	Série B.....	62
5.2.3	Série C	63

5.2.4	Série D	64
5.2.5	Série E.....	65
5.3	Resultados da análise paramétrica	66
5.3.1	Modo: Escoamento da seção bruta – ESB.....	66
5.3.2	Modo: Flexão nos Parafusos – FP	75
5.3.3	Modo: Ovalização do furo – OF.....	78
5.3.4	Formulações para dimensionamento da ligação luva sob compressão ..	85
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	89
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Aplicações de perfis tubulares no Brasil.....	16
Figura 1.2: Aplicação de perfis tubulares em coberturas.....	16
Figura 1.3: Ligações flangeadas circulares e retangulares aeroporto Trancredo Neves em Confins	18
Figura 1.4: Ligação luva parafusada.....	19
Figura 2.1: Detalhes e tipologia de flanges	23
Figura 2.2: Tipo emenda de perfis tubulares.....	24
Figura 2.3: Emenda com chapa escondida para perfis tubulares.....	24
Figura 2.4: Detalhe da ligação parafusada.....	25
Figura 2.5: Representação da ligação luva com parafusos alinhados.....	26
Figura 2.6: Representação da ligação luva com parafusos cruzados.....	26
Figura 2.7: Esquema das luvas ensaiadas para parafusos alinhados	27
Figura 2.8: Modelo numérico desenvolvido por Vieira (2014).....	28
Figura 2.9: Modelos numéricos desenvolvidos por Roquete (2018).....	30
Figura 2.10: Ilustrações da falha da ligação por ruptura da seção líquida	31
Figura 3.1: Nomenclaturas utilizadas para análise da ligação tipo luva.....	34
Figura 3.2: Flexão no parafuso: esquema do modelo mecânico	38
Figura 3.3: Esquema da influência da força axial na região do furo a partir de uma planificação da seção do tubo	39
Figura 4.1: Diagrama multilinear adotado para a representação dos perfis e parafusos	45
Figura 4.2: Variações de modelo numérico da ligação luva	46
Figura 4.3: Dimensões da ligação em milímetros.....	47
Figura 4.4: Geometria do modelo numérico	48
Figura 4.5: Geometria do volume cilíndrico dos parafusos.....	49

Figura 4.6: Detalhamento da configuração final do modelo.....	50
Figura 4.7: Elementos finitos tipo casca.....	51
Figura 4.8: Elementos finitos tipo sólido.....	51
Figura 4.9: Elementos de contato e superfície: CONTA 175 e TARGE 170	52
Figura 4.10: Elementos finitos de contato no modelo numérico	52
Figura 4.11: Comparação dos elementos finitos	54
Figura 4.12: Diferentes refinamentos de malha.....	55
Figura 4.13: Comparação dos tipos de malha.....	56
Figura 4.14: Modelo da ligação luva com malha refinada	56
Figura 4.15: Condições de contorno da extremidade dos modelos.....	57
Figura 4.16: Identificação das falhas por deformação excessiva atingida	58
Figura 4.17: Identificação das falhas por tensão excessiva atingida	59
Figura 4.18: Detalhe do critério de pico de resistência.....	59
Figura 5.1: Limite de esbeltez relativa para o modo de falha de ESB nos modelos numéricos	68
Figura 5.2: Relação da esbeltez relativa com a relação entre área bruta dos tubos externo e interno para ESB dos modelos numéricos	69
Figura 5.3: Relação entre carregamento numérico e teórico para o modo de falha de ESB com $\lambda_{rel} \geq 1,6$	69
Figura 5.4: Comportamento do Modelo A12 (8 parafusos e $\lambda_{rel}=1,38$).....	72
Figura 5.5: Comportamento do Modelo B24 (8 parafusos e $\lambda_{rel}=1,74$).....	73
Figura 5.6: Comportamento do Modelo B25 (10 parafusos e $\lambda_{rel}=1,74$).....	74
Figura 5.7: Relação entre o carregamento numérico e teórico para o modo de falha de FP	76
Figura 5.8: Relação entre o carregamento numérico e teórico para o modo de falha de FP com $\lambda_{rel} \geq 1,6$	77

Figura 5.9: Relação entre o capacidade resistente numérico e teórico para o modo de falha de OF	80
Figura 5.10: Limite de esbeltez relativa para o modo de falha de OF nos modelos numéricos	81
Figura 5.11: Detalhes geométricos dos parâmetros da formulação de ovalização dos furos (OF)	82
Figura 5.12: Distribuição de tensões na região de ocorrência da ovalização (Modelo B23) .	82
Figura 5.13: Comportamento do Modelo B23 (6 parafusos e $\lambda_{rel}=1,74$).....	83
Figura 5.14: Relação entre o carregamento numérico e teórico proposto para o modo de falha de OF	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Resultados do estudo dos elementos.....	53
Tabela 4.2: Resultados do estudo das malhas.....	55
Tabela 5.1: Propriedades geométricas da série A.....	62
Tabela 5.2: Propriedades geométricas da série B.....	63
Tabela 5.3: Propriedades geométricas da série C	64
Tabela 5.4: Propriedades geométricas da série D (continua).....	64
Tabela 5.5: Propriedades geométricas da série E.....	65
Tabela 5.6: Resultados numéricos e teóricos para o modo de ESB nos modelos.....	67
Tabela 5.7: Resultados numéricos e teóricos para o modo de FP nos modelos	75
Tabela 5.8: Resultados numéricos e teóricos para o modo de OF nos modelos	79
Tabela 5.9: Resultados numéricos e teórico proposto para o modo de OF nos modelos	84
Tabela 5.10: Força axial resistente de cálculo para a ligação luva com parafusos alinhados sob compressão	86