



Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
Departamento de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

---



Análise numérica de ligações em sistemas de armazenagem industrial

Lucas Alves Escanio

Ouro Preto - MG  
Fevereiro de 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE LIGAÇÕES EM SISTEMAS DE ARMAZENAGEM  
INDUSTRIAL**

**LUCAS ALVES ESCANIO**

ORIENTADORES: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Arlene Maria Cunha Sarmanho  
Prof. Dr. Vinícius Nicchio Alves

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil 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.

Ouro Preto, fevereiro de 2019

E743a

Escanio, Lucas Alves.

Análise numérica de ligações em sistemas de armazenagem industrial  
[manuscrito] / Lucas Alves Escanio. - 2019.

92f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Arlene Maria Cunha Sarmanho.

Coorientador: Prof. Dr. Vinícius Nicchio Alves.

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. Sistemas de armazenagem. 3. Ligações  
semirrígidas. 4. Análise numérica. 5. Elementos Finitos. I. Sarmanho, Arlene  
Maria Cunha. II. Alves, Vinícius Nicchio. III. Universidade Federal de Ouro  
Preto. IV. Título.

CDU: 624.01


Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)


ANÁLISE NUMÉRICA DE LIGAÇÕES EM SISTEMAS DE  
ARMAZENAMENTO INDUSTRIAL


AUTOR: LUCAS ALVES ESCÂNIO

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 05 de fevereiro de 2019, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

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

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

  
Prof. Flávio Teixeira de Souza, D. Sc. – IFMG

  
Prof. Alexandre Abrahão Cury, D. Sc. – UFJF

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e Pe. Libério por terem me iluminado e guiado os meus passos.

Aos meus Pais, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e incentivando. Mãe, a senhora nunca mediu esforços e sempre lutou para me proporcionar a melhor qualidade de ensino, muito obrigado. Pai, saiba que o senhor é o meu exemplo. Vocês dois são meu orgulho e minha inspiração.

A minha irmã Camila, pela grande ajuda e paciência seja ajudando na dissertação ou na vida. Ao meu irmão Daniel, minha referência de confiança. Um agradecimento especial para Tia Luzia e meu primo Anderson que sempre me incentivaram e me apoiaram incondicionalmente.

A Luíza, meu amor, que desde o resultado do mestrado até o final da dissertação foi meu apoio. Obrigado pelo esforço de sempre me ajudar e estar ao meu lado.

A professora Arlene pelas inúmeras oportunidades confiadas a mim ao longo da graduação e do mestrado. Obrigado por me conceder a oportunidade de aprender com você a ser engenheiro, pesquisador, professor e ser humano. Muito Obrigado Arlene!

Ao professor Vinícius pela imprescindível ajuda, desde o começo, no desenvolvimento desta dissertação. Obrigado pelo incentivo e pelo conhecimento compartilhado.

Ao Caio, Flávio e Gabriel pela sempre prontidão em me ajudar, desde o começo da IC até no final do mestrado. Ao Nadele, Daniel, Messias, JB, Gilney e a todos os amigos do Laboratório de Estruturas da UFOP por toda ajuda e pela amizade.

Ao ICSA que fez parte dessa minha caminhada no mestrado.

Obrigado a UFOP e CAPES pelo auxílio e ao RU.

## RESUMO

Sistemas de armazenagem tipo *porta-pallets* são utilizados em edificações industriais, armazéns e supermercados para a armazenagem de diferentes tipos de produtos. Estas estruturas são compostas geralmente por perfis de aço formados a frio, sendo suas colunas formadas por seções com perfurações ao longo de seu comprimento para possibilitar o encaixe das ligações. Esta conexão entre a coluna e o pilar se dá, geralmente, por ligações sem parafusos ou solda. Devido aos diferentes tipos de geometria das vigas e dos conectores, o desenvolvimento de modelos teóricos generalizados se torna inviável. Na busca de maior entendimento sobre essa ligação, neste trabalho foram analisadas as conexões em sistema de armazenagem tipo *porta-pallets* através do seu comportamento e rigidez. Para realizar o estudo da ligação, foi desenvolvido um modelo numérico. Para atestar que o modelo era compatível, com o comportamento real, os resultados numéricos foram comparados com resultados experimentais de ensaios realizados anteriormente no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” seguindo os procedimentos do RMI (2012) e EN15512 (2009). O estudo numérico foi realizado via software que utiliza elementos finitos (ANSYS). Os modelos apresentaram boa correlação com os dados dos experimentos. Foi possível observar que o modelo perde sua linearidade quando toda a seção da dobra do segundo dente do conector se encontra totalmente plastificada e que todos os mecanismos de falha e de colapso ocorrem exclusivamente no conector de extremidade. No modelo numérico calibrado, foi realizado uma análise paramétrica. Realizando uma análise do comportamento do modelo foi possível identificar a contribuição de cada dente na rigidez da ligação, e que impedindo que estes sejam solicitados de forma independente, ocorre um aumento significativo na rigidez da ligação.

Palavras-chave: Estruturas metálicas, Sistemas de armazenagem, Perfis formados a frio, Ligações semirrígidas, Análise numérica , Elementos Finitos.

## ABSTRACT

Steel pallet racks (SPRs) are used in the industrial buildings, warehouses and superstores for storing a multitude of different kinds of goods. Semi-rigid boltless beam-to-column connections (BCCs) are used in these structures. These systems are generally composed by cold formed steel sections. Their columns are made by sections specially developed to this application and have perforations through their length to fit connections. Different types of beam end connectors with different geometry of the connected members are available, making it impossible to develop a generalized analytical model. This research examines the experimental and numerical behavior of SPR BCCs. The experimental testing of SPR BCCs was performed using cantilever test setup based in prescriptions developed by RMI (2012) and EN15512 (2009) to evaluate Pallet systems, considering mainly connections behavior and stiffness. A finite element model that simulates the experimental behaviour closely is developed using ANSYS finite element software, and its accuracy was validated against experimental results, which is also used for further parametric studies. The failure of the connection was initiated with the failure of the second tab and all failure and collapse mechanisms occur exclusively at the beam end connector.

Keywords: Steel structures, Cold-formed steel sections, Industrial storage systems, Racks, Beam–column end connector, Moment–rotation, Semi-rigid, Boltless connection

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1	Objetivos .....	14
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Metodologia.....	14
1.4	Revisão bibliográfica .....	15
1.4.1	Estudos experimentais .....	16
1.4.2	Estudos numéricos .....	18
1.4.3	Pesquisas método das componentes .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA .....</b>	<b>22</b>
2.1	Ligação Viga-Coluna.....	22
2.2	Prescrições de norma .....	24
2.2.1	Recomendações da EN15512.....	24
2.2.2	Recomendações do RMI .....	25
2.3	Métodos de determinação da rigidez .....	26
2.3.1	Procedimento RMI.....	27
2.3.2	Procedimento EN15512.....	27
2.3.3	Comparação dos procedimentos do RMI e EN15512.....	29
2.3.4	Método da rigidez inicial .....	30
2.3.5	Método da inclinação da metade do momento último.....	31
2.3.6	Método das áreas iguais.....	32
<b>3</b>	<b>ANÁLISE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>33</b>
3.1	Geometria dos protótipos .....	33
3.2	Caracterização dos materiais.....	37
3.3	Esquema de ensaio.....	37
3.4	Resultados experimentais .....	39
3.4.1	Relação Momento <i>versus</i> Rotação.....	39
3.4.2	Rigidez.....	41
<b>4</b>	<b>MODELO NUMÉRICO .....</b>	<b>44</b>
4.1	Geometria do modelo.....	44



4.2	Não linearidade do modelo numérico.....	46
4.3	Elementos utilizados .....	49
4.4	Malha .....	54
4.5	Condições de contorno .....	57
<b>5</b>	<b>ANÁLISE NUMÉRICA.....</b>	<b>60</b>
5.1	Comparação dos resultados .....	60
5.1.1	Relação Momento <i>versus</i> Rotação.....	60
5.1.2	Rigidez.....	66
5.2	Modos de falha.....	69
5.3	Análise paramétrica.....	82
5.3.1	Propriedade mecânica dos materiais e geometria.....	82
5.3.2	Influência dos parâmetros geométricos na rigidez da ligação .....	82
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>87</b>