

ANÁLISE VIA ELEMENTOS FINITOS DE LIGAÇÕES TIPO ENCAIXE EM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO INDUSTRIAL

Finite element analysis of steel storage rack connections

Flávio Teixeira Souza¹, Arlene Maria Cunha Sarmanho², Ana Paula Magalhães Machado³



PALAVRAS CHAVE:

Sistemas de armazenagem industrial;

Perfis formados a frio;

Ligações semirrígidas;

Sistemas estruturais;

Método dos elementos finitos.

KEYWORDS:

Steel storage systems;

Cold formed profiles;

Semi-rigid connections;

Structural systems;

Finite element method.

RESUMO: Os sistemas de armazenagem industrial são importantes na cadeia logística, por permitirem maior densidade de armazenagem, poupando áreas em estoques. No entanto, são estruturas esbeltas e com particularidades que dificultam seu dimensionamento pelas normas correntes, demandando ensaios experimentais para a avaliação de seu comportamento e resistência. Este trabalho apresenta a utilização do método dos elementos finitos para a avaliação da resistência das ligações entre as colunas e as longarinas em estruturas de sistemas de armazenagem. Estas ligações possuem comportamento semirrígido, e são fundamentais para a estabilidade do sistema. Observou-se boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais obtidos na literatura, considerando-se o momento resistente da ligação e seu comportamento na fase linear elástica. Os resultados se mostraram promissores e indicaram a necessidade de consideração das tensões residuais no modelo para aumentar a precisão da simulação.

ABSTRACT: Steel storage racks are important for increasing storage density, leading to high storage in less area. However, they are slender structures and have particularities that make their design difficult, demanding experimental tests to evaluate their behavior and resistance. In this paper are presented the use of finite element method to evaluate the resistance of joint connections between racks columns and beams in steel storage structures. These connections are semi-rigid and are very important in system stability. The analysis results have good agreement to experimental data found in literature, considering the connection moment resistance and its linear elastic behavior. These results indicated the suitability of finite element model, but it demands consideration of residual stresses to improve the finite element model method accuracy.

* Contato com os autores:

Publicado em 01 de dezembro de 2021.

¹ e-mail: flavio.souza@ifmg.edu.br (F. T. Souza)

Engenheiro Civil, D.Sc., Professor, Instituto Federal de Minas Gerais Campus Ouro Preto.

² e-mail: arlene@ufop.edu.com (A. M. C. Sarmanho)

Engenheira Civil, D.Sc., Professora, Universidade Federal de Ouro Preto.

³ e-mail: anapaulammachado@icloud.com (A. P. M. Machado)

Engenheira Civil, M.Sc., Professora, Faculdade Santa Rita.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da produção e o desenvolvimento da cadeia logística tornaram fundamental a eficiência na armazenagem industrial, uma vez que são requeridos espaços cada vez maiores para esta finalidade. Assim sistemas que aumentem o volume e a densidade de armazenagem são importantes para que o armazenamento ocorra de forma econômica. Neste contexto, a utilização de estruturas compostas por perfis formados a frio tem se consolidado como principal opção, uma vez que aliam o custo relativamente baixo e a eficiência estrutural.

No entanto, por se tratar de estruturas com elevada esbelteza, têm passado por constante evolução desde o início de sua utilização, na década de 1930. Os elementos que os compunham eram cantoneiras de aço constituídas por perfis formados a frio com furos ao longo de seu comprimento, configuração que permitia grande flexibilidade. Porém, o processo de montagem através de parafusos era trabalhoso, e a baixa resistência à torção das cantoneiras exigia uma grande quantidade de contraventamentos (Godley, 1991). Com o objetivo de aperfeiçoar e facilitar a conexão dos componentes na coluna criaram-se seções específicas em perfis formados a frio, como a seção do tipo rack ou garrafa, cujos flanges de ligação destinam-se à fixação dos contraventamentos. Além disto, na alma da coluna existem perfurações onde as longarinas são afixadas por meio de encaixes especialmente desenvolvidos para este fim, que também facilitam sobremaneira a montagem destas estruturas.

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de avaliar o comportamento das ligações no sistema de armazenagem industrial e sua influência no comportamento global do sistema, dos quais podem-se destacar Sarawit e Pekoz (2006), Freitas et al. (2010), Prabha et al. (2010), Gilbert et al. (2012), Shah et al. (2016), Bernuzzi e Simoncelli (2017), Shariati et al. (2018), Shariati et al. (2019), Gusella et al. (2018, 2019). Estes trabalhos indicam que a consideração da rigidez real das ligações é fundamental na previsão da resposta estrutural da estrutura em condições de serviço.

Outros pesquisadores detiveram-se na avaliação de componentes do sistema de armazenagem industrial. Neiva et al (2018a, 2018b) desenvolveram um estudo abrangente sobre o comportamento da coluna, que está sujeita aos modos de instabilidade próprios dos perfis formados a frio. Oliveira (2000) e Miranda (2011) avaliaram o comportamento das ligações, com ênfase na avaliação de sua rigidez e resistência.

As normas de dimensionamento de perfis formados a frio, em geral, não abrangem os sistemas de armazenagem industrial, pois não consideram em seu escopo o comportamento de elementos com perfurações. Desta forma, associações de fabricantes publicam recomendações de dimensionamento que devem ser utilizadas para complementar as prescrições normativas. Entre estas prescrições, destaca-se a da associação americana *Racks Manufacturers Institute* (RMI, 2012).

O dimensionamento estrutural destes sistemas é muitas vezes baseado em testes experimentais. As prescrições do RMI prescrevem para a avaliação das ligações dois tipos de testes, o ensaio do pórtico (Portal Test), que determina a constante de uma mola a ser utilizada para a análise da ligação semirrígida e o ensaio da viga em balanço (Cantilever Test), que determina a capacidade resistente da ligação. No entanto, a execução de ensaios experimentais é muitas vezes inviável para os escritórios de projeto, necessitando aporte financeiro para a aquisição dos protótipos e contratação de instituições que disponham de infraestrutura adequada e pessoal especializado para a execução destes ensaios. Pode-se perceber que o estudo do comportamento das ligações semirrígidas em perfis formados a frio é complexo, devido à geometria característica e à esbelteza de seus componentes. No caso dos sistemas de armazenagem industrial, esta complexidade se torna ainda maior, pela existência de perfurações que modificam o comportamento dos seus componentes. Neste contexto, a utilização de métodos numéricos, como o método dos elementos finitos, surge como importante alternativa para auxiliar na avaliação destas ligações.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver um modelo em elementos finitos, por meio do software comercial ANSYS (ANSYS, 2010) para a simulação do ensaio da viga em balanço (Cantilever Test), previsto nas prescrições do RMI (RMI, 2012) e, a partir da comparação com resultados experimentais (Sarmanho, 2007), avaliar a influência dos componentes da ligação em sua resistência e comportamento, possibilitando, em trabalhos futuros, a avaliação da influência de seus diversos componentes por meio de análises paramétricas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PERFIS FORMADOS A FRIO

Os perfis formados a frio são obtidos pelos processos de dobramento a frio de chapas de aço. Embora possuam dimensões das seções transversais padronizadas, podem ser produzidos pelos fabricantes de acordo com a forma e o tamanho solicitados, guardadas as limitações dimensionais das suas linhas e processos. São produzidos por dobradeiras ou por perfiladeiras (Dias, 2006). A Figura 1 (a) apresenta a seção das colunas utilizadas nos sistemas de armazenagem industrial e também a ligação entre elas e as longarinas na Figura 1 (b).

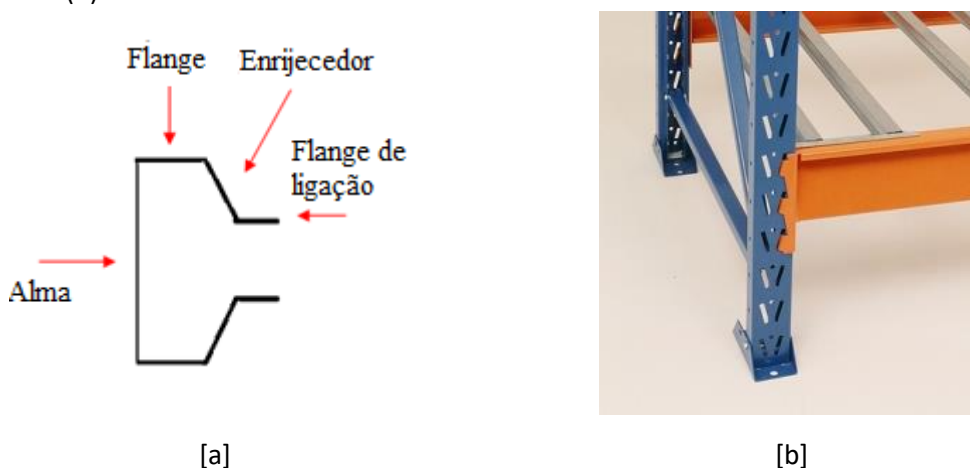


FIGURA 1: [a] Seção utilizada nas colunas dos racks; [b] conexão entre as mesmas e as longarinas.

FONTES: [a] Adaptada de Campos (2003); [b] Grupo Alpha Porta Pallets (2018).

A NBR 14762 (ABNT, 2010) “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio” recomenda o uso de aços com qualificação estrutural e que possuam propriedades mecânicas adequadas para receber o trabalho a frio.

Os perfis de aço formados a frio são cada vez mais utilizados na construção civil, em vista da rapidez, economia e versatilidade de opções de seções exigidas pelo mercado. Esse elemento estrutural pode ser eficientemente utilizado em galpões de pequeno e médio porte, coberturas, mezaninos, em casas populares e edifícios de pequeno porte (PIERIN et al., 2013).

Uma singularidade construtiva desses perfis dá-se pelas ligações. O comportamento das ligações entre perfis formados a frio pode apresentar diferenças significativas quando comparado ao comportamento de ligações entre perfis laminados ou soldados. Essa diferença de comportamento se deve ao fato de as espessuras dos elementos envolvidos variarem entre 0,4 mm e 6,3 mm para os perfis formados a frio, e entre 6,3 mm e 50 mm para os perfis laminados e soldados.

3.2 SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL

Uma aplicação usual de perfis formados a frio são os sistemas de armazenagem industrial. Como são estruturas de elevada esbeltez e sujeitas a carregamentos elevados, inúmeros pesquisadores têm desenvolvido trabalhos visando o aperfeiçoamento de seus projetos. A Figura 2 apresenta um sistema de armazenagem industrial em operação.



FIGURA 2: Sistema de armazenagem industrial em operação.

FONTE: Jungheinrich (2018).

Baldassino e Bernuzzi (2000) realizaram um estudo numérico sobre a estabilidade de pallet racks, estrutura comumente usada na Europa, para investigar aspectos que influenciam a estabilidade global do sistema. O foco foi apenas para o comportamento na direção longitudinal.

Souza (2005) realizou um abrangente estudo teórico-experimental do sistema drive-in, analisando-se o comportamento global da estrutura e a avaliação da interação entre seus diversos componentes.

Freitas et al. (2010) apresentaram um estudo sobre os componentes do sistema de armazenagem tipo drive-in. Avaliaram a influência de cada um dos elementos na estabilidade global do sistema. Os resultados experimentais e numéricos mostraram que as conexões e placas de base têm influência significativa no comportamento do sistema.

Bernuzzi e Simoncelli (2017) direcionaram a pesquisa para racks com colunas mono-simétricas, tipicamente influenciadas por efeitos de deformação relevantes, que tradicionalmente são negligenciados por suposições sobre racks e, conseqüentemente, por engenheiros de fabricação. Os resultados da pesquisa estão relacionados a uma análise paramétrica em vários racks de diferentes configurações, geometria de componentes e grau de rigidez rotacional das articulações. Os resultados associados a quatro normas da União Europeia e duas americanas são apresentados e comparados diretamente entre si para permitir uma avaliação concreta das diferenças mais relevantes entre as abordagens de projeto. Para destacar a importância dos efeitos de deformação, que usualmente são avaliadas por meio de software de análise de elementos finitos refinados, o projeto foi realizado usando também a formulação de elementos finitos para viga mais tradicional implementada nos pacotes de análise comercial utilizados na fabricação. Todo o estudo evidência a competitividade dos racks no mercado e a importância da avaliação de segurança da estrutura.

3.3 ENSAIO DA VIGA EM BALANÇO

A existência de perfurações nas colunas e a geometria complexa das ligações dos sistemas de armazenagem industrial induzem a necessidade de avaliações empíricas de seus componentes. As prescrições do RMI (2012) indicam o ensaio da viga em balanço (Cantilever Test) para a determinação da capacidade resistente da ligação.

A configuração do ensaio é apresentada na Figura 3 e consiste em um protótipo padrão com coluna de 760 mm de altura, engastada em suas extremidades, tendo conectada em sua meia altura uma longarina de 660 mm de comprimento. A carga é aplicada sobre a longarina, concentrada a 610 mm da face da coluna. Nesse ponto, deve ser instalado um transdutor de deslocamentos. A metodologia de ensaio consiste na aplicação de carregamentos graduais, e os deslocamentos são medidos a cada etapa do carregamento. Os resultados obtidos são representados por meio da curva carga x deslocamento.

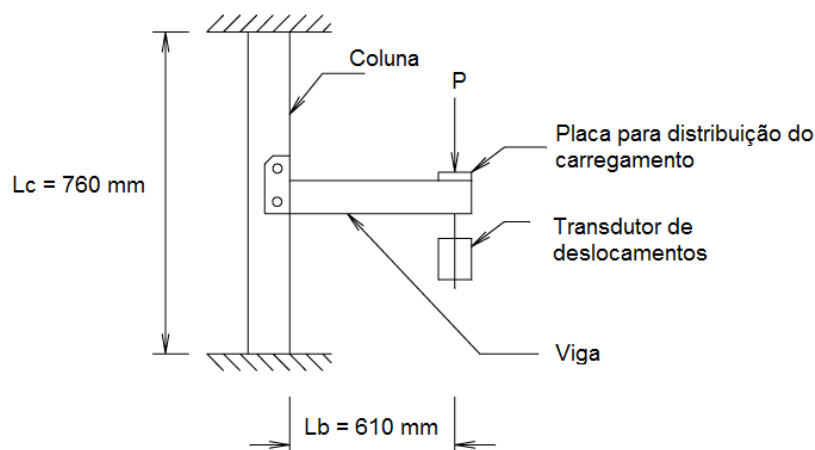


FIGURA 1: Configuração do ensaio Cantilever Test.

FONTE: Adaptada de RMI (2012).

4. METODOLOGIA

4.1. ANÁLISE VIA ELEMENTOS FINITOS

A ligação objeto deste trabalho, apresentada na Figura 4, é composta por três elementos. A coluna, com perfurações ao longo de sua altura, a viga longarina e o encaixe, soldado à longarina por meio de uma chapa de topo e que se conecta à coluna por meio de ganchos que se prendem às perfurações.



FIGURA 2: Encaixe da ligação com a coluna.

FONTE: Águia (2011).

O modelo numérico construído no software ANSYS representou as dimensões reais dos três componentes da ligação (coluna, longarina e encaixe). Toda a modelagem foi realizada no próprio ANSYS,

com a construção de uma rotina de programação em sua linguagem de programação paramétrica (APDL – ANSYS Parametric Design Language).

4.1.1 Coluna

A Figura 5 (a) apresenta a seção transversal e a Figura 5 (b) apresenta a geometria da coluna criada no ANSYS. Foi escolhida uma seção comercial utilizada por um fabricante nacional do setor. A coluna possui 760 mm de comprimento, com pares de furos distanciados entre si de 28 mm e das laterais de 15 mm, com inclinação de 11,3°.

A malha de elementos finitos utilizada na coluna foi constituída por elementos de casca, conforme apresentado na Figura 5 (c), utilizando o elemento SHELL 181, disponível na biblioteca do ANSYS, escolhido pelo bom desempenho apresentado em pesquisas anteriores, como Miranda (2011) e Neiva et al (2018). É um elemento de quatro nós, com seis graus de liberdade em cada nó (translações nas direções x, y, z e rotações em x, y, z). O refinamento da malha foi definido automaticamente pelo programa.

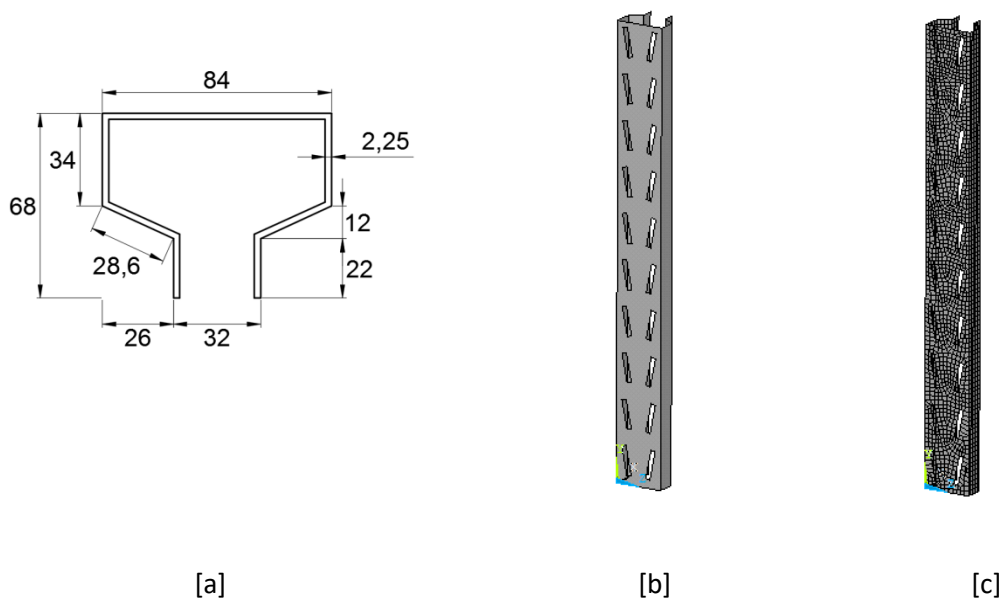


FIGURA 3: [a] Seção transversal da coluna (dimensões em mm); [b] Modelo no ANSYS; [c] Malha de elementos finitos.

FONTE: Autoria própria (2018).

4.1.2 Longarina

A viga longarina do modelo é constituída por um perfil retangular com as dimensões apresentadas na Figura 6 (a), com 660 mm de comprimento. Na definição de sua malha, foram utilizados dois tipos de elementos. No trecho inicial, próximo à chapa de topo em que a longarina é conectada ao encaixe, foram utilizados elementos SHELL 181, ao longo de 210 milímetros. Visando a melhoria da eficiência computacional do modelo, o restante da viga foi simulado utilizando-se elementos de viga BEAM188, conforme apresentado na Figura 6 (b). O elemento de viga expandido é apresentado na Figura 6 (c).

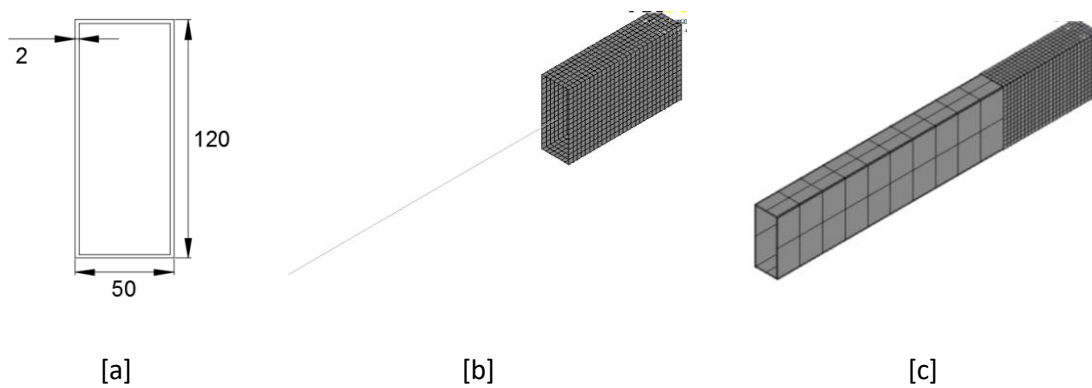


FIGURA 4: Longarina [a] Seção transversal, [b] Malha de elementos finitos; [c] Seção expandida.
FONTE: Autoria própria (2018).

Na interface entre os elementos de casca e de viga, estes ficam posicionados no centro de gravidade da seção e é criada uma região rígida, conforme mostra a Figura 7. Este procedimento acelera a convergência do modelo, sem afetar significativamente os resultados, comprovando a viabilidade de sua utilização.

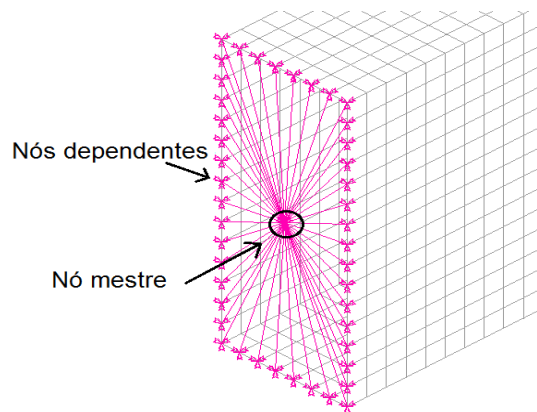


FIGURA 7: Interface entre o elemento de casca e o elemento de viga.
FONTE: Autoria própria (2018).

4.1.3 Encaixe

A Figura 8 (a) apresenta as dimensões do encaixe, e a Figura 8 (b) mostra a geometria criada no ANSYS. Na malha do encaixe foram utilizados elementos de casca SHELL181, com refinamento automático, obtendo-se a malha apresentada na Figura 8 (c).

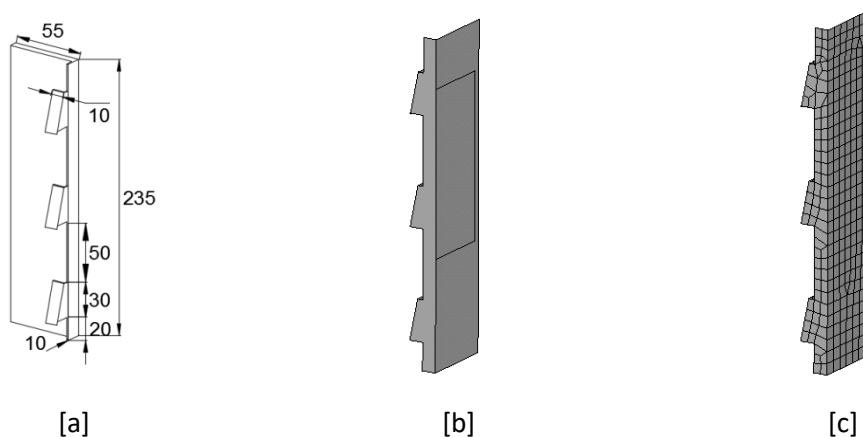


FIGURA 5: [a] Dimensões do encaixe; [b] Geometria criada no ANSYS; [c] Malha de elementos finitos.
FONTE: Autoria própria (2018).

4.1.4 Propriedades dos materiais

Os componentes da ligação são, em geral, fabricados com tipos diferentes de aço. A coluna e a viga utilizam os aços estruturais A570 e A36. No entanto, o encaixe, que é um elemento fundamental para a ligação, é constituído pelo aço SAE 1020, que, embora não seja um aço estrutural, tem seu uso admitido na NBR 14762 (ABNT, 2010).

Além disto, por serem submetidos à conformação a frio, apresentam elevada concentração de tensões residuais, principalmente o encaixe, que é submetido a um intenso processo de estampagem e dobra. A consideração das tensões residuais neste trabalho foi feita considerando as prescrições da NBR 8800 (ABNT, 2008), e, para avaliar sua influência no modelo, três situações foram consideradas:

- Situação 1 – Nenhum elemento afetado pelas tensões residuais;
- Situação 2 – Somente o encaixe afetado pelas tensões residuais;
- Situação 3 – Todos os elementos afetados pelas tensões residuais.

A Tabela 1 apresenta as propriedades do aço dos três componentes nas três situações consideradas. O modelo constitutivo para o aço, empregado na simulação, foi a introdução do diagrama tensão deformação com aproximação multilinear (Almeida, 2012).

Tabela 1: Propriedades dos materiais utilizadas nas simulações.

Situação	Elemento	Aço	f_y (MPa)	f_u (MPa)
1	Coluna	A570-Gr45	434,85	539,21
	Encaixe	SAE 1020	180	300
	Viga	ASTM A36	250	400
2	Coluna	A570-Gr45	434,85	539,21
	Encaixe	SAE 1020	126	216
	Viga	ASTM A36	250	400
3	Coluna	A570-Gr45	304	378
	Encaixe	SAE 1020	126	216
	Viga	ASTM A36	175	300

FONTE: Autoria própria (2018).

4.1.5 Condições de contorno

De acordo com o RMI (2012), no ensaio Cantilever Test, as extremidades da coluna devem estar conectadas a suportes rígidos para que não ocorram deslocamentos laterais durante o ensaio. Para simular os suportes, as extremidades da coluna foram engastadas, aplicando restrições aos seis graus de liberdade em todos os seus nós. Para evitar deslocamentos laterais na longarina, foi restringido o deslocamento nesta direção, no mesmo ponto onde se aplica o carregamento. A Figura 9 apresenta as condições de contorno aplicadas ao modelo.

Para simular a união entre a longarina e a coluna por meio do encaixe, foram acoplados os deslocamentos translacionais nas três direções nos nós coincidentes da borda dos furos com os ganchos do encaixe, conforme mostra a Figura 10.

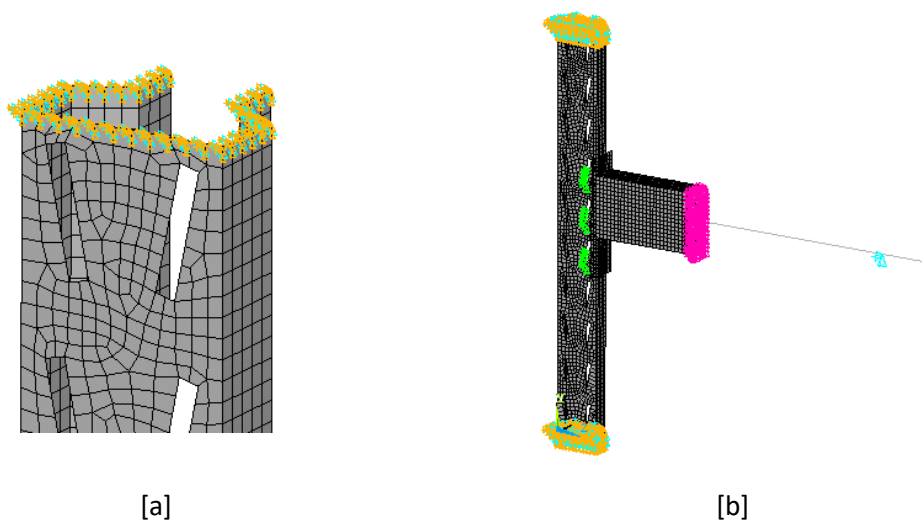


FIGURA 6: Condições de contorno [a] Engaste na extremidade da coluna [b] Restrição lateral na longarina.

FONTE: Autoria própria (2018).

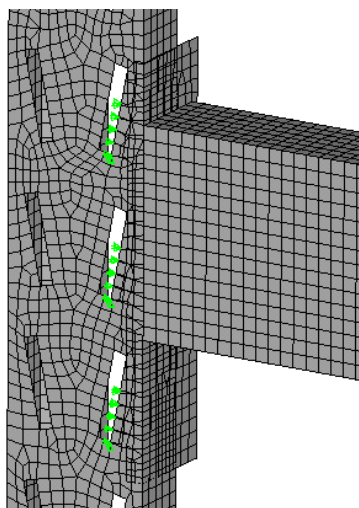


FIGURA 7: Acoplamento entre os nós das bordas das perfurações e dos ganchos do encaixe.

FONTE: Autoria própria (2018).

4.1.6 Elementos de contato

Foram utilizados elementos para a simulação da interação entre o flange de ligação da coluna e o encaixe da ligação. Para isto foram utilizados os elementos do par de contato TARGET179 e CONTA174, aplicados ao flange de ligação da coluna e à face do encaixe em contato com a mesma, conforme apresenta a Figura 11.

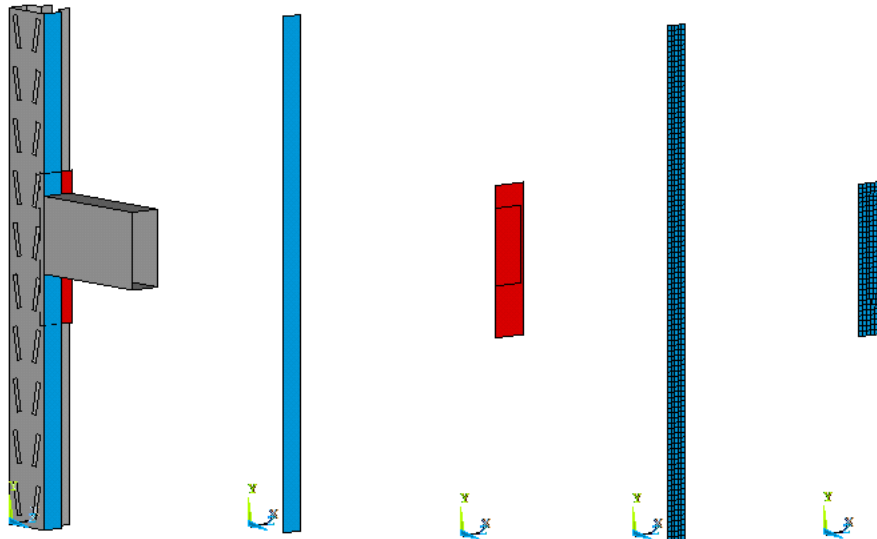


FIGURA 8: Áreas com os elementos de contato.

FONTE: Autoria própria (2018).

4.1.7 Aplicação de carga e estratégia de solução

O problema foi resolvido por meio de uma análise não linear física e geométrica. Por se tratar de um modelo com vários componentes e estar sujeito a grandes deslocamentos, esta análise pode apresentar problemas de convergência, devendo ser adotada uma estratégia de solução adequada.

Entre as opções disponíveis no ANSYS, optou-se pelo controle de deslocamentos, por apresentar nesta análise maior eficiência computacional. Por isto, o carregamento vertical aplicado a 610 mm da face da viga foi imposto por meio de um deslocamento vertical prescrito ao nó correspondente a esta posição, que é o mesmo apresentado na Figura 9. Com estas configurações, foi possível a obtenção da trajetória de equilíbrio para as situações simuladas, possibilitando a análise do comportamento das ligações.

5. RESULTADOS

Foram simuladas as três situações descritas no item 4.1.4, e obtido o comportamento da ligação em cada caso, com a avaliação de sua trajetória de equilíbrio e determinação de seu modo de colapso.

5.1 NENHUM ELEMENTO COM TENSÃO RESIDUAL

Nesta simulação, o material constituinte dos elementos foi considerado sem as tensões residuais, conforme indica a Tabela 1. Ressalta-se que para o aço da coluna são considerados valores obtidos experimentalmente (Sarmanho, 2007), e para a longarina e o encaixe são considerados valores nominais. A Figura 12 apresenta a comparação entre a curva carga x deslocamento numérica e resultados experimentais, e a Figura 13 apresenta o desenvolvimento das tensões de Von Mises ao longo do incremento de carga.

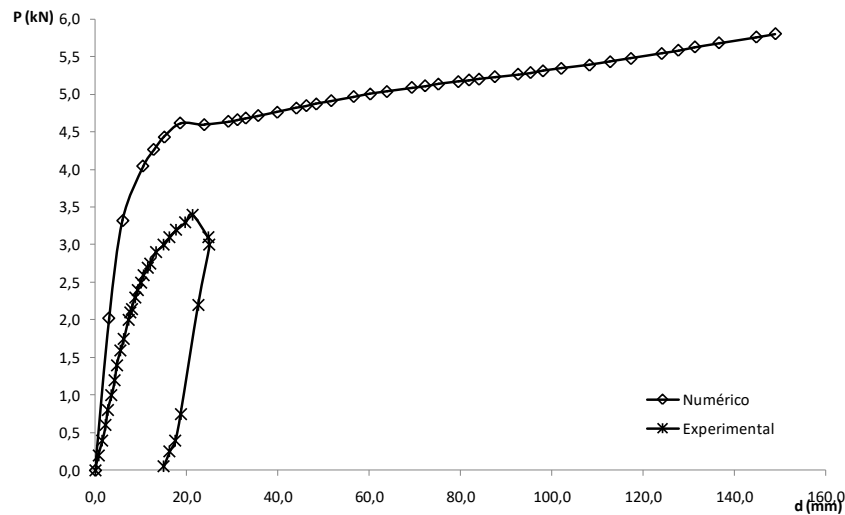


FIGURA 9: Curvas carga x deslocamento sem o efeito da tensão residual em todos os elementos.
FONTE: Autoria própria (2018).

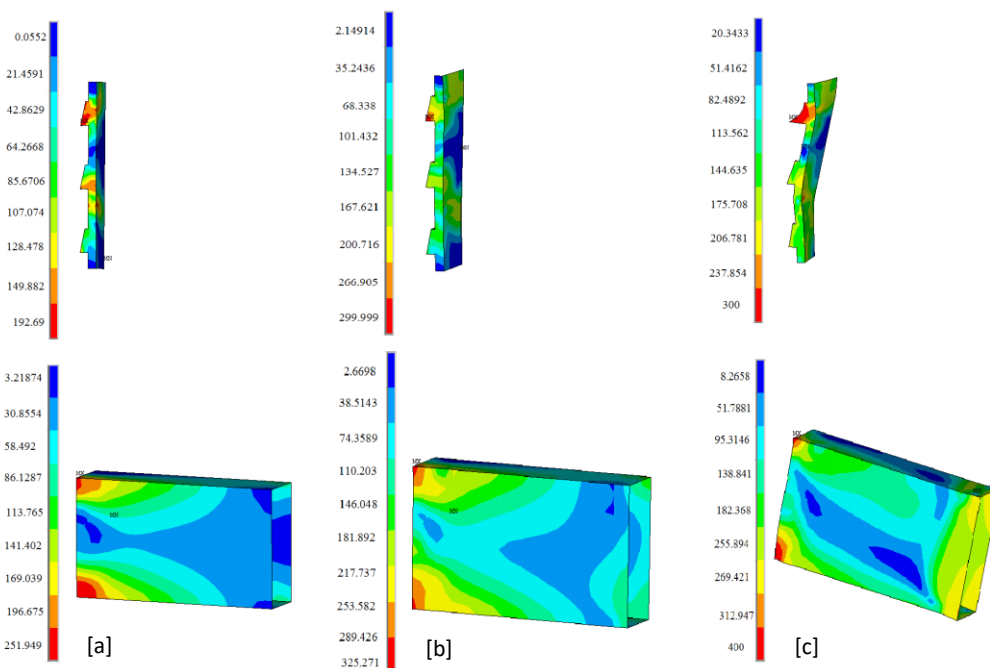


FIGURA 10: Tensões de von Mises no modelo [a] $P = 3,32$ kN; [b] $P = 4,62$ kN; [c] $P = 4,60$ kN.
FONTE: Autoria própria (2018).

A primeira mudança de trajetória corresponde ao carregamento 3,32 kN, que corresponde ao início da plastificação do encaixe e da longarina, como é possível ver na Figura 13 (a). O carregamento 4,62 kN, indica a plastificação do encaixe, representado na Figura 13 (b). Após este ponto ocorre a plastificação da longarina, com o carregamento de 4,60 kN (Figura 13 (c)).

De forma geral, observa-se pela comparação com resultados experimentais que a não consideração das tensões residuais no modelo conduz a resultados não conservadores.

5.2 SOMENTE O ENCAIXE COM TENSÕES RESIDUAIS

Nesta simulação, o efeito das tensões residuais foi considerado apenas no encaixe. A consideração das tensões residuais foi feita de acordo com as recomendações da NBR 8800 (ABNT, 2008), e a comparação entre os resultados numéricos e experimentais é apresentada na Figura 14.

A primeira mudança de trajetória ocorre quando o encaixe e a longarina atingem suas tensões de escoamento, para a carga 2,53 kN, indicado na Figura 15 (a). A carga para a qual o encaixe atinge a tensão última do material ocorre na carga máxima suportada pela ligação, no carregamento de 4,49 kN, mostrado na Figura 15 (b). E a Figura 15 (c) ilustra o ponto em que a longarina e o encaixe atingem as tensões últimas dos materiais, para a carga de 3,62 kN.

Observa-se que a consideração das tensões residuais no encaixe leva a uma aproximação entre os resultados numéricos e experimentais, indicando a validade do procedimento.

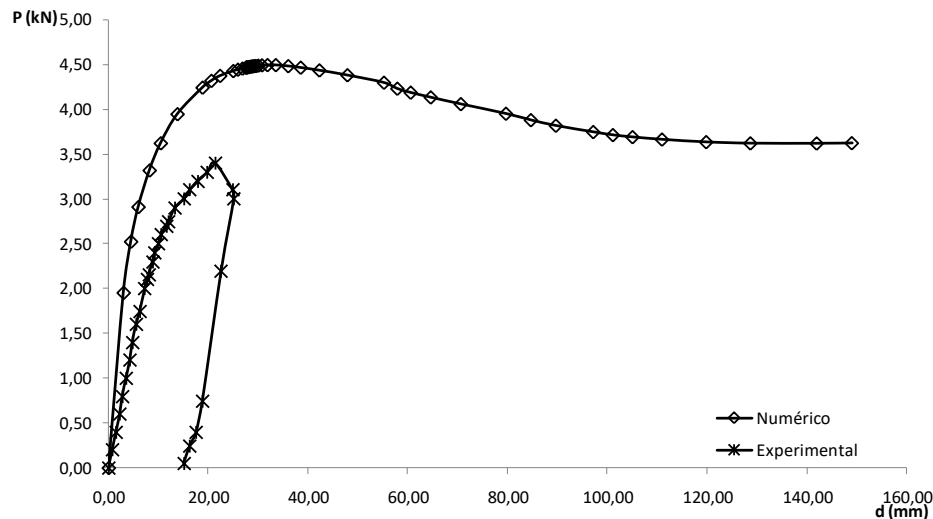


FIGURA 11: Curvas carga x deslocamento com o efeito da tensão residual apenas no encaixe.

FONTE: Autoria própria (2018).

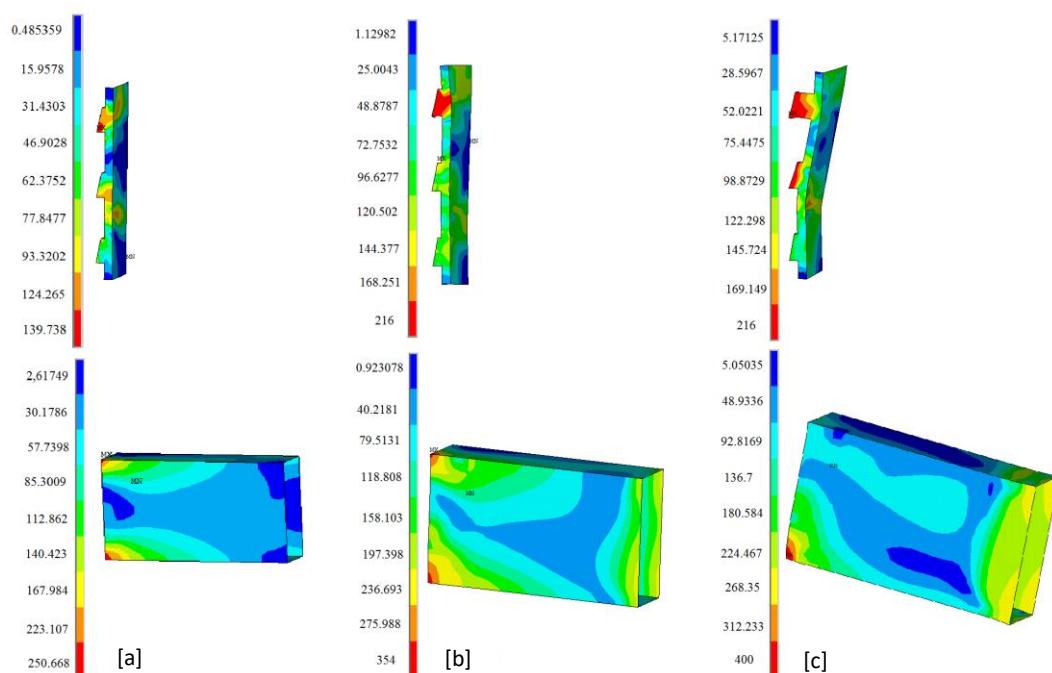


FIGURA 12: Tensões de von Mises no modelo [a] $P = 2,53$ kN; [b] $P = 4,49$ kN; [c] $P = 3,62$ kN.

FONTE: Autoria própria (2018).

5.3 TODOS OS ELEMENTOS COM TENSÃO RESIDUAL

Neste modelo foram consideradas as tensões residuais atuando em todos os componentes da ligação, de acordo com os valores indicados na Tabela 1. A Figura 16 apresenta a comparação entre os resultados numéricos e experimentais.

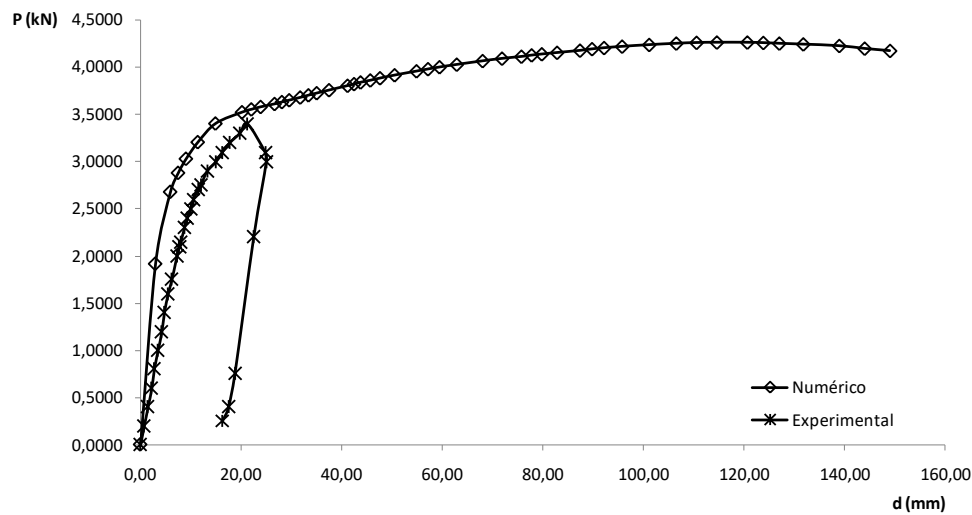


FIGURA 13: Curvas carga x deslocamento com o efeito da tensão residual apenas em todos os elementos.
FONTE: Autoria própria (2018).

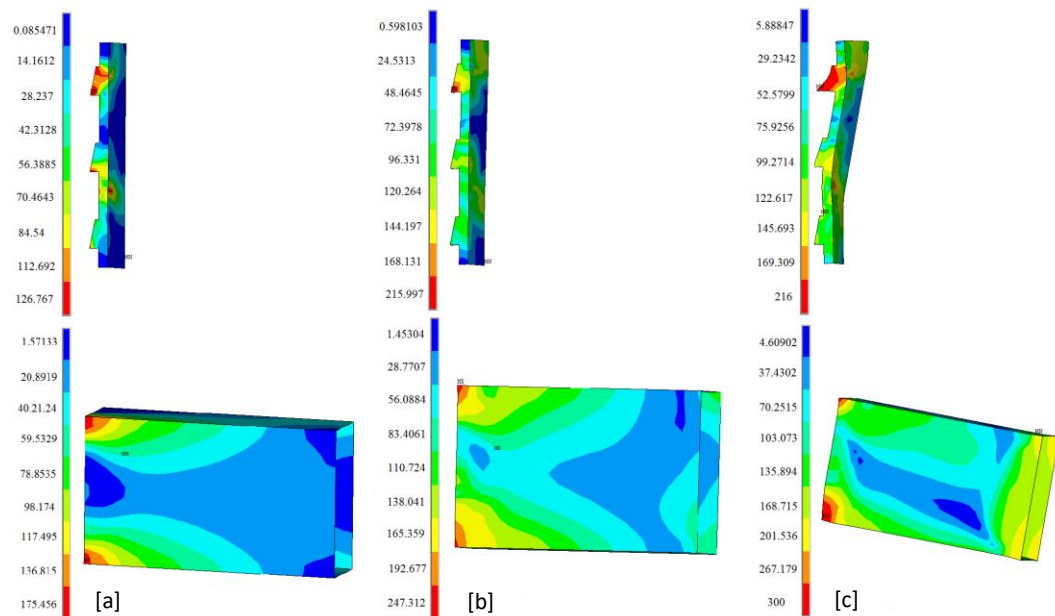


FIGURA 14: Tensões de von Mises no modelo [a] P = 1,92 kN; [b] P = 3,40 kN; [c] P = 4,26 kN.
FONTE: Autoria própria (2018).

Pela análise do desenvolvimento das tensões de Von Mises na ligação, observa-se que, para a carga de 1,92 kN (Figura 17 (a)), o encaixe e a viga atingem as tensões de escoamento do material, e a partir deste ponto a curva pede seu comportamento linear (Figura 16). Para a carga 3,40 kN, o encaixe atinge a tensão última, e a partir deste ponto observa-se, na Figura 17 (b), grande redução na rigidez da ligação. O carregamento em que o encaixe e a longarina atingem sua tensão última, 4,26kN, representa a carga última suportada pela ligação (Figura 17 (c)).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As ligações entre a longarina e a coluna são fundamentais na estabilidade dos sistemas de armazenagem industrial. No entanto, sua complexidade exige a realização de ensaios para a previsão de sua resistência. Este trabalho utilizou o método dos elementos finitos por meio do software ANSYS versão 11 para simular o ensaio experimental.

Os resultados obtidos indicam que a consideração das tensões residuais no modelo é fundamental para assegurar sua adequabilidade na previsão do comportamento da ligação. Com isto, a simulação numérica do ensaio da viga em balanço em substituição aos ensaios prescritos para a avaliação da capacidade resistente da ligação mostra-se promissora.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à Águia Sistemas de Armazenagem industrial pelo suporte à pesquisa.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁGUIA. Disponível em (<http://www.aguiasistemas.com.br/aguiasistemas/>). Acessado em data 2011.

ANSYS (2010). User's Manual for revision 11. Swanson Analysis Systems Inc. Inc., Houston, PA. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 14762**: Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mista de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro. 2008.

BERNUZZI, C. SIMONCELLI, M. EU and US Design Approaches for Steel Storage Pallet Racks With Mono-symmetric Cross-section Uprights. **Thin-Walled Structures**. V. 113. p. 181-204. 2017.

FREITAS, A. M. S., FREITAS, M. S. R., SOUZA, F. T. Analysis and behavior of steel storage drive-in racks. **Thin-Walled Structures**. 48, p. 110-117, 2010.

GILBERT, B., RASMUSSEN, K. J. R., BALDASSINO, N., CUDINI, T., & ROVERE, L. Determining the Transversal Shear Stiffness of Steel Storage Rack Upright Frames. **Journal of Constructional Steel Research**. 78. p. 107–116. 2012.

GODLEY, M.H. R. Storage Racking In: Design of Cold Formed Steel Members. **Elsevier Applied Science**, Amsterdam, Ed Rhodes, Chapter 11, p. 361-399, 1991.

Grupo Alpha Porta Pallets: site comercial. Disponível em: <[http:// http://porta-pallets. com/index.html](http://porta-pallets.com/index.html)>. Acesso em 01 de fevereiro de 2018.

GUSELLA, F., ORLANDO, M., VIGNOLI, A., THIELE, K. Flexural capacity of steel rack connections via the component method. **The Open Construction and Building Technology Journal**, 2018, 12, (Suppl-1, M3) 90-100.

GUSELLA, F., ARWADE, S. R., ORLANDO, M., PETERMAN, K.D. Influence of mechanical and geometric uncertainty on rack connection structural response. **Journal of constructional steel research**. 153, p. 343-355, 2019.

JUNGHEINRICH: site comercial. Disponível em: <<http://www.jungheinrich.pt/intralogistica/sistemas-armazenagem/estanteria-movel/>>. Acesso em 01 de fevereiro de 2018.

MIRANDA, S. A. **Análise de Ligações de Sistemas de Armazenagem Industrial Tipo Porta – Pallets**. 2011. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

NEIVA, L. H. A.; SALES, A. E. A. ; ELIAS, G. C. ; SARMANHO, A. M. ; SOUZA, F. T. **Análise do modo distorcional de elementos perfurados segundo Método da Resistência Direta**. Revista da Estrutura de Aço, v. 7, p. 17-36, 2018a.

NEIVA, L. H. A.; SARMANHO, A. M. C.; FARIA, V. O.; SOUZA, F. T.; STARLINO, J. A. B. Numerical and experimental analysis of perforated rack members under compression. **Thin-Walled Structures**. 130, p. 176-193, 2018b.

OLIVEIRA, A. M. **Análise Teórico-Experimental de Sistemas Estruturais de Armazenamento (Rack's)**. 2000. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.

PRABHA P., MARIMUTHU V., SARAVANAN M., JAYACHANDRAN S. A. Evaluation of connection flexibility in cold formed steel racks. **Journal of Constructional Steel Research**.66 (7), p.863–872, Julho, 2010.

RMI. Specification for the design, testing and utilization of industrial steel storage racks. Charlotte, U.S.A.: Rack Manufacturers Institute; 2012.

SARAWIT, T. A. PEKOZ, T. **Cold-formed Steel Frame and Beam-column Design**. American Iron and Steel Institute. Revised Edition. 2006.

SARMANHO, A. M. C. **Relatório interno de consultoria técnica**. Laboratório de Estruturas Altamiro Tibiriçá Dias, UFOP, 2007.

SHAH, N.H. RAMLI SULONG, R. KHAN, M.Z. JUMAAT, M. SHARIATI. Behavior of Industrial Steel Rack Connections. **Mechanical Systems and Signal Processing**. 70-71. p. 725-740. 2016.

SHARIATI, M., TAHIR, M.M., TEE C. W., SHAH, S.N.R., JALALI, A., ABDULLAHI, M.M., KHORAMI, M. Experimental investigations on monotonic and cyclic behavior of steel pallet rack connections. **Engineering Failure Analysis**. 85, p. 149-166, 2018.

SHARIATI, M. TRUNG, N., WAKIL, K., MEHRABI, P., SAFA, M., KHORAMI, M. Estimation of moment and rotation os steel rack connections using extreme learning machine. **Steel and Composite Structures**. 31(5), p 427-435, 2019.