Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas

Dissertação

Análise Numérica de Ligações do Sistema de Armazenagem Industrial

Ana Paula Magalhães Machado

Ouro Preto, MG

2018

Ana Paula Magalhães Machado

Análise Numérica de Ligações do Sistema de Armazenagem Industrial

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Construção Metálica do Programa de Pós-Graduação em Construção Metálica do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Construção Metálica.

Orientadores:

Prof. Flávio Teixeira de Souza, D.Sc.

Profª. Arlene Maria Cunha Sarmanho, D.Sc.

Ouro Preto

Março de 2018

M149a Machado, Ana Paula Magalhães.
Análise numérica de ligações do sistema de armazenagem industrial [manuscrito] / Ana Paula Magalhães Machado. - 2018.
65f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Teixeira de Souza.
Coorientador: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Mestrado Profissional em Construção Metálica.
Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Armazenagem Industrial. 2. Ligações. 3. Perfis Formados a Frio. I. Souza, Flávio Teixeira de. II. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Titulo.

CDU: 624.014

Catalogação: www.sisbin.ufop.br

ANÁLISE NUMÉRICA DE LIGAÇÕES DO SISTEMA DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL

AUTOR: ANA PAULA MAGALHÃES MACHADO

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em vinte e três de março de 2018, pela Comissão Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Flávio Teixeira de Souza, D. Sc. – IFMG (Presidente)

Profa. Arlene Maria Cunha Sarmanho, D. Sc. – UFOP

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

Prof. Mário Luís Cabello Russo, D. Sc. – IFMG

A minha família.

Ao Graciano.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por me guiar e me dar forças para seguir sempre em frente.

Aos meus amados pais, Otávio e Vânia, e meu irmão, Samuel, pelo incentivo e apoio incondicional.

Ao Graciano pelo amor, paciência e companheirismo.

Ao professor Flávio pela orientação excepcional e comprometimento na realização deste trabalho.

À professora Arlene pela disponibilidade em ajudar.

Aos professores Geraldo e Róvia pela atenção e apoio.

À Escola de Minas pela acolhida, em especial ao MECOM.

Aos professores do MECOM por toda dedicação e ensinamento.

A Tatiane e Sheila pela amizade e parceria nos dias de estudo.

A todos os colegas de mestrado pelos bons momentos.

Resumo

Os sistemas de armazenagem do tipo rack são constituídos por perfis formados a frio, as colunas apresentam perfurações ao longo da alma criando facilidade e rapidez na ligação com a coluna. Essa ligação é feita através de uma garra dentada soldada na extremidade da longarina. A presente pesquisa apresenta um estudo numérico dessa ligação garra - coluna caracterizada pela conexão da garra na coluna, sem a utilização de parafusos, com a garra encaixando-se nos furos da coluna. Os elementos da ligação foram estudados através do programa computacional ANSYS, considerando o método dos elementos finitos e utilizando análise não linear. A análise do comportamento do sistema e o cálculo da rigidez da ligação foram norteadas por meio das prescrições do RMI 2008. Visto que as peças do modelo são perfis formados a frio e, em geral, esses perfis são afetados pelas tensões residuais o modelo numérico foi examinado em três situações. Situação 1: Nenhum elemento afetado pelas tensões residuais; Situação 2: Todos os elementos afetados pelas tensões residuais; Situação 3: Apenas a garra afetada pelas tensões residuais. Os resultados numéricos foram comparados com os experimentais de Miranda (2011). Após a análise das três situações observa-se que a situação 3 apresenta um valor de carga última bem definido e boa aproximação entre os resultados obtidos numericamente e experimentalmente.

Palavras-chave: Sistema de armazenagem industrial, cálculo da rigidez, tensão residual.

Abstract

The systems storage rack consist of cold formed steel sections, the columns have perforations along the web creating ease and speed in connection with the column. This connection is made by end connector of the beam. The present research presents a numerical study of the connection of an industrial storage system. The study pattern is formed by a column with perforations along the length, a connector (claw-type) and a balance beam. The connection is characterized by the link of the claw in the column, without using bolts the claw fits in the holes the column. The bonding elements were studied by a computational tool, ANSYS, employing the Finite Elements Method (FEM) and resorting a non-linear analysis. The analysis of the behavior system and the calculation of the stiffness is based on the prescriptions of the RMI 2008. Since the model is composed by cold formed steel sections, generally, affected by the residual stresses the numerical model was examined in three situations. Situation 1: No element is affected by residual stress; Situation 2: All elements are affected by residual stress; Situation 3: Only the connector is affected by the residual stresses. The numerical results are compared with the experimental one, presented by Miranda (2011). After analyzing the three situations, it is observed that situation 3 presents a well defined final load value and a good approximation between the results obtained numerically and experimentally.

Keywords: Systens storage rack, stiffness calculation, residual stress.

Sumário

1 Introdução 9
1.1 Justificativa 12
1.2 Objetivos 12
1.3 Metodologia 12
1.4 Estrutura do trabalho 12
2 Revisão bibliográfica 14
2.1 Perfis formados a frio 14
2.2 Sistemas de armazenagem industrial 15
2.3 Ligações 16
2.3.1 Ligações garra - goluna dos sistemas de armazenagem industrial 18
2.4 Ensaio da viga em balanço – RMI 2008 19
2.5 Métodos para a determinação da rigidez 20
2.5.1 Método da inclinação inicial 21
2.5.2 Método das áreas iguais 21
2.5.3 Método da inclinação a 50% do momento último 22
2.5.4 Determinação da rigidez pelo RMI 22
3 Análise numérica 25
3.1 Construção da geometria 25
3.1.1 Coluna 25
3.1.2 Garra 27
3.1.3 Viga 28
3.2 Propriedades do material 29
3.3 Malha 30
3.3.1 Coluna 30
3.3.2 Garra 31
3.3.3 Viga 31

3.4 Condições de contorno 32
3.5 Elemento de contato 33
3.6 Acoplamento dos nós 34
3.7 Aplicação de carga 35
3.8 Estratégia de solução 36
4 Resultados 37
4.1 Viabilidade da utilização de elemento de viga 38
4.2 Influência da tensão residual 38
4.2.1 Nenhum elemento com tensão residual 39
4.2.2 Todos os elementos com tensão residual 42
4.2.3 Garra com tensão residual 45
4.3 Determinação da rigidez numérica pelo RMI 47
5 Considerações finais 48
Referências 51
Apêndice 54

1 Introdução

A armazenagem industrial está entre os processos mais importantes da cadeia logística. Um sistema de armazenagem bem projetado pode solucionar e evitar diversos problemas que influenciam diretamente o processo produtivo e de distribuição dos produtos, otimizando espaços e diminuindo sensivelmente o custo do produto para o consumidor final e, consequentemente, aumentando a competitividade da empresa no mercado. Atualmente as empresas estão niveladas em relação ao aspecto tecnológico, sendo a logística um dos principais diferenciais para sua sobrevivência e seu crescimento no mercado. Uma logística eficiente pode representar o diferencial de uma empresa. (Guerra, 2014).

A escolha do sistema de armazenagem depende do tipo de produto a ser armazenado e do espaço disponível. O que distingue os vários sistemas é o modo de armazenamento, o espaço disponível entre vigas, etc.

Os sistemas de armazenagem industrial, conhecidos como racks, surgiram na década de 30, e os elementos que os compunham eram cantoneiras de aço constituídas por perfis formados a frio com furos ao longo de seu comprimento. Esta configuração permitia grande flexibilidade, e as cantoneiras perfuradas tornaram-se usuais. 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, mostrada a seguir na Figura 1.1, cujos flanges facilitavam a fixação dos contraventamentos.

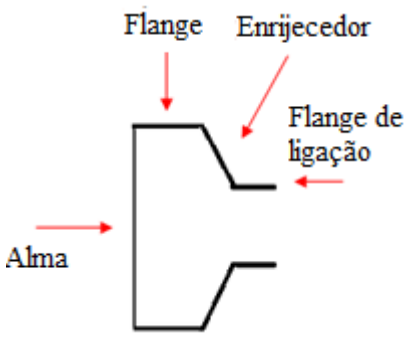

Figura 1.1: Tipo de seção utilizada nas colunas: Rack ou garrafa; (Adaptada de Campos, 2003).

As perfurações nas colunas de seção tipo rack estão localizadas ao longo da alma do perfil e distribuídas de maneira uniforme nessa face como ilustrado na Figura 1.2 a seguir.

Figura 1.2: Configuração de montagem do sistema tipo rack.

Ainda observando a Figura 1.2 acima percebe-se que as perfurações têm uma leva inclinação e a ligação da coluna com a longarina é através de uma garra dentada que encaixa-se na coluna sem utilizar parafusos. Emprega-se esse tipo de ligação com o objetivo de facilitar a montagem e gerar rapidez na execução. Como a coluna, a garra e a longarina são elementos conformados a frio.

Devido às perfurações e à alta esbeltez do elementos desse tipo de sistema de armazenagem, estudar o comportamento estrutural dos racks torna-se essencial em sua análise global, e, consequentemente a influência do comportamento da ligação. O presente trabalho analisará o comportamento e a resistência dessa ligação.

Entre os tipos de sistemas que utilizam seções tipo rack e garras dentadas, destacam-se, entre os vários sistemas de armazenagem, o sistema tipo Porta-Pallets e o sistema Drive-in, pela significativa contribuição da ligação na estabilidade global da estrutura.

O sistema “porta-pallets”, ilustrado na Figura 1.3 é um dos tipos de sistemas mais utilizados em depósitos. Como na maioria desses sistemas, o pé direito está associado com o alcance de empilhadeiras que atingem uma altura média de 6 metros (Godley, 1991). São utilizados corredores que fornecem acesso direto a cada produto armazenado com o mínimo de

operações da empilhadeira, mas estes corredores diminuem a densidade de armazenagem do depósito (Miranda, 2011).

Figura 1.3: Sistema de armazenagem industrial “porta-pallets” (Jungheinrich, 2018).

São denominados “drive-in”, os sistemas que apresentam o acesso em apenas uma face de operação, a Figura 1.4 ilustra esse sistema. No sistema drive-in a principal característica é a ausência de vigas transversais, para permitir o deslocamento da empilhadeira em seu interior. Assim, toda a estabilidade do sistema é obtida através de contraventamentos colocados na região superior e posterior do sistema e da rigidez das ligações utilizadas (Souza, 2005).

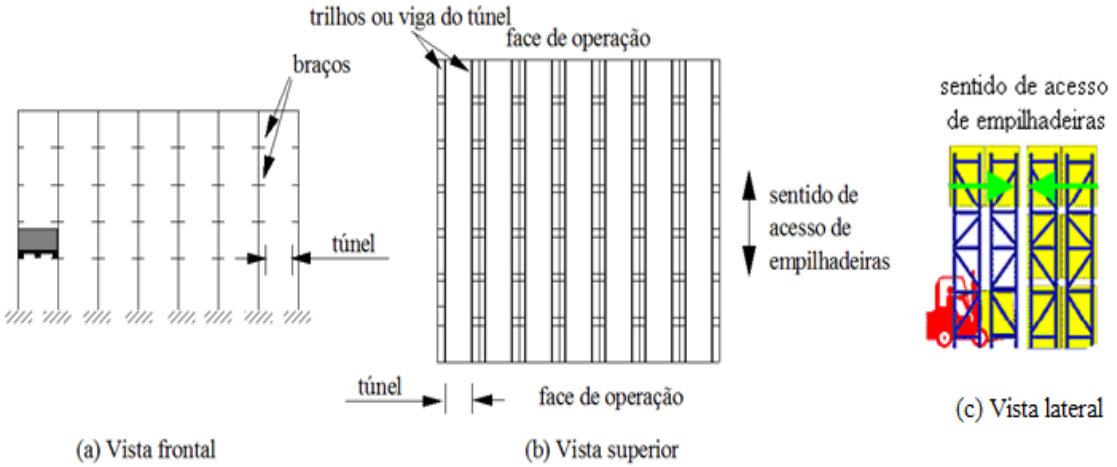

Figura 1.4: Configuração dos sistema “drive-in”. (a) Vista frontal; (b) Vista superior; (c) Vista lateral com o esquema de armazenamento através de empilhadeira, e indicação de sentido de acesso para estocagem (Souza, 2005).

1.1 Justificativa

A estabilidade do sistema de armazenagem industrial depende do comportamento das ligações e do uso de contraventamentos. Desta forma, o estudo do comportamento da ligação é fundamental para assegurar a estabilidade do sistema de armazenagem industrial. As imperfeições geométricas, as folgas nas ligações e os impactos de empilhadeiras nas operações também afetam a estabilidade desses sistemas.

Como o estudo experimental muitas vezes é oneroso, tornando a pesquisa inviável, a criação de um modelo numérico para simular a ligação torna-se justificável.

A partir da compreensão do comportamento das ligações é possível o desenvolvimento de modelos que levem a estruturas mais seguras e econômicas.

1.2 Objetivos

Neste trabalho estudou-se numericamente a ligação da garra dentada com a coluna, considerando normas nacionais e internacionais, com o objetivo de avaliar numericamente essa ligação com ênfase em sua rigidez e sua resistência.

Buscou-se a calibração do modelo numérico a partir de resultados experimentais, o que viabiliza estudos paramétricos.

1.3 Metodologia

Simulou-se numericamente no programa Ansys, em linguagem APDL, uma ligação garra-coluna do sistema de armazenagem de um fabricante nacional e compararam-se os resultados numéricos com os experimentais descritos em Miranda (2011).

A partir do modelo, foi avaliada a capacidade resistente da ligação e observado o comportamento de seus diversos componentes durante sua trajetória de equilíbrio.

1.4 Estrutura do trabalho

No capítulo 2 é revisado os tipos de sistema de armazenagem industrial, as classificações das ligações que podem ser empregadas, e os métodos para a determinação da rigidez, dentre eles, as prescrições do RMI para esse cálculo.

No capítulo 3 apresenta-se o modelo numérico usado nesse estudo, descrevendo os elementos constituintes e a rotina de programação desenvolvida no software ANSYS. A estratégia de solução utilizada é o controle de deslocamentos.

No capítulo 4 mostram-se os resultados obtidos na análise numérica, expondo a influência das tensões residuais no comportamento da ligação, e são feitas comparações com resultados experimentais (Miranda, 2011).

Finalmente, no capítulo 5 têm-se as conclusões desse estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 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 NBR 14762:2010 “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.

Segundo Pierin et al. (2013), para o correto dimensionamento desse elemento é necessário conhecer com detalhes o seu comportamento estrutural, pois possui algumas particularidades em relação às demais estruturas, tais como as de concreto ou mesmo as compostas por perfis soldados ou laminados de aço. Por serem constituídas de perfis com seções abertas e de pequena espessura, os elementos, que possuem baixa rigidez à torção, podem ter problemas de instabilidade, deformações excessivas ou atingir os limites da resistência do aço devido a esforços de torção. É necessário entender também outro tipo de fenômeno que ocorre nessas estruturas: o empenamento. A restrição ao empenamento causa esforços internos e o entendimento desses esforços é muito importante e nem sempre é trivial. Outro fenômeno comum nos perfis de seção aberta é a distorção da seção transversal, que consiste em um modo

de instabilidade estrutural onde a seção transversal perde sua forma inicial quando submetida a tensões de compressão, causando perda significativa na sua capacidade de resistir aos esforços.

Pesquisas indicam que os perfis formados a frio são muito sensíveis às tensões residuais devido ao seu processo de fabricação. Abdel-Rahman et al. (1997) analisaram essas tensões residuais e constataram que é importante considerá-las, pois obtém resultados mais convincentes com a consideração das tensões residuais.

Segundo Schafer e Pekoz (1998), a inclusão da tensão residual tem um efeito significativo na solução. A principal influência das tensões residuais é o comportamento da estrutura durante a aplicação da carga, e não no carregamento máximo. Dados sobre as tensões residuais fornecem informações sobre a seleção apropriada de sua distribuição e magnitude, e são apresentados exemplos usando análise de elementos finitos não-lineares que demonstram como a magnitude da imperfeição, sua distribuição e as tensões residuais influenciam todos os resultados da solução.

2.2 Sistemas de armazenagem industrial

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.

Oliveira (2000) apresentou um estudo teórico-experimental das colunas e ligações do modelo de sistema de armazenagem drive-in baseado nas prescrições do RMI (1997), com a realização do ensaio da coluna curta, para determinação da resistência da coluna e do ensaio da viga em balanço, para a determinação da rigidez das ligações.

Campos (2003) realizou uma extensa análise do sistema drive-in por elementos finitos e observou-se a influência dos efeitos de segunda ordem no comportamento da estrutura e a diminuição da influência do contraventamento do plano de fundo no comportamento da coluna à medida em que se aumenta a profundidade do rack.

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, consequentemente, 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 só podem ser 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.

2.3 Ligações

Krawinkler et al. (1979), através de estudos experimentais utilizando o método da viga em balanço (Cantilever Test), testou alguns protótipos. Em todas as ligações, entre a viga e o conector de extremidade, utilizou-se solda. Os resultados mostraram que a eficiência da ligação para conectores parafusados estava ligada à força de aperto dos pinos à coluna e, para conectores dentados, a eficiência estava ligada à fratura do cordão de solda e ao ângulo gerado pelo momento.

Markazi et al. (1997) realizaram ensaios de flexão em diversos tipos de conector de extremidade e determinaram parâmetros que regem um projeto eficiente de conectores viga-coluna. Esses parâmetros são: aumento do número de guias, aumento da resistência do material do conector, aumento da bitola de conector de extremidade da viga-coluna, aumento da espessura da coluna, e aumento do número de planos de contato entre o conector de extremidade da viga e a coluna. A maioria das articulações falhou devido à área de contato estreito entre as abas e a coluna. No entanto, o estudo determinou que, se as medições da rotação fossem feitas usando transdutores de deslocamento anexados à viga, a flexibilidade da viga precisava ser levada em consideração para obter a verdadeira relação M-θ.

Prabha et al. (2010) testou as conexões viga-coluna dos racks e constatou que os modos de falha eram governados pela deformação da coluna e das chapas dos conectores. O estudo demonstrou que a curva M-θ é significativamente dependente da espessura da coluna, do comprimento da viga e da geometria do conector de extremidade da viga. Em apoio a esta opinião, EN 15512 (2009) também afirma que os parâmetros que afetam o desempenho do conector de extremidade da viga são a espessura da coluna, o perfil da viga, a posição da viga no conector, a ligação viga com conector de extremidade, o tipo de suporte e as propriedades do material do conector.

Gilbert et al. (2012) estudaram métodos de determinação da rigidez transversal em sistemas de armazenagem industrial., comparando as normas europeia EN 15512 (2009) e da revisada Australian Standard AS 4084 (2012). As especificações internacionais adotam abordagens diferentes para a obtenção da rigidez ao cisalhamento de racks e os dois métodos de teste não são equivalentes e produzem resultados diferentes para a rigidez transversal. Conclui-se que pesquisas adicionais são necessárias para entender melhor a resposta e a influência das conexões semi-rígidas entre os membros. Esta conexão é pensada para ser a chave principal para entender o comportamento de cisalhamento dos sistemas de armazenagem industrial.

Shah et al. (2016) apresentam uma pesquisa sobre o comportamento das ligações rack. Em primeiro lugar expõe uma descrição abrangente das investigações experimentais que foram realizadas e utilizadas como bases de calibração para o estudo numérico. Um modelo de elementos finitos não linear de três dimensões foi desenvolvido e calibrado em relação aos resultados experimentais, de acordo com os ensaios da viga em balanço e do pórtico. O modelo de elementos finitos levou em consideração as não linearidades dos materiais, propriedades geométricas e grandes deslocamentos. As comparações entre dados numéricos e experimentais para modos de falha observados e a relação M-θ mostraram concordância. O modelo de elementos finitos validado foi ampliado para realizar análises paramétricas para identificar os efeitos de vários parâmetros que podem afetar o desempenho geral da conexão.

2.3.1 Classificação das ligações

É fato que o comportamento mecânico das ligações influencia sensivelmente a distribuição dos esforços e deslocamentos das estruturas, tornando-se essencial o conhecimento da rigidez e da capacidade de rotação da ligação.

- Ligação rígida: tem rigidez suficiente para manter praticamente constante o ângulo entre as peças (rotação relativa quase nula) para qualquer nível de carga, até atingir o momento resistente de ligação.
- Ligação flexível: permite a rotação relativa entre as peças com um comportamento próximo ao de uma rótula, transmitindo um pequeno momento fletor.
- Ligação semirrígida: nesse caso o momento transmitido através da ligação não é nem zero (ou próximo de zero) como no caso de ligações flexíveis e nem o momento máximo (ou próximo dele) como no caso de conexões rígidas.

As ligações perfeitamente flexíveis ou rígidas são casos ideais, dificilmente encontrados na prática.

2.3.2 Ligações Garra - Coluna dos Sistemas de Armazenagem Industrial

A ligação garra-coluna caracteriza-se pelo encaixe entre as garras e os furos na alma da coluna sem a utilização de parafusos. Essa ligação é considerada semirrígida, devido a conclusões retiradas de estudos anteriores, como Miranda (2011). A Figura 2.1 apresenta esse tipo de ligação.

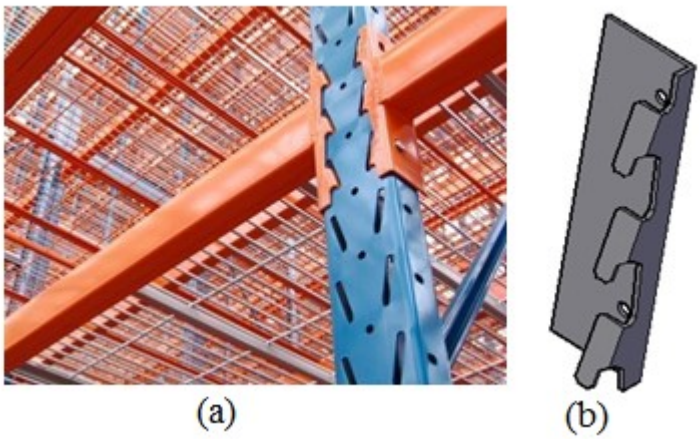

Figura 2.1: Ligação viga-coluna utilizando “garras dentadas”. (a) Visão Geral (Águia, 2011); (b) Detalhe da “garra dentada” (Miranda, 2011).

Sarawit e Pekoz (2006) apresentam um abrangente estudo sobre sistemas de armazenagem industrial. Um dos aspectos analisados é a natureza semirrígida das ligações utilizadas. Este comportamento da conexão deve-se principalmente à distorção das paredes das colunas, ao rasgamento da perfuração da coluna e à distorção da garra. Destaca-se ainda a

dificuldade em desenvolver um modelo analítico geral, pois há diversas possibilidades de formatos de garras, sendo assim, as simulações de ligação garra-coluna geralmente são feitas para determinar a relação do momento (M) na extremidade com a variação do ângulo entre a coluna e a viga (θ). Eles utilizam nesta análise o ensaio da viga em balanço e o ensaio do pórtico.

2.4 Ensaio da Viga em Balanço – RMI 2008

Por apresentar particularidades em suas peças (perfurações), as normas existentes de dimensionamento de perfis formados a frio não são aplicáveis para os racks e por isso, este trabalho utilizará as prescrições do "Rack Manufacturers Institute" (RMI, 2008), que aborda adequadamente este assunto.

O Cantilever Test é um ensaio no qual são obtidos o comportamento momento - rotação da ligação e sua rigidez. A sua única desvantagem é que ele não considera a parcela do esforço cortante (devido à reação vertical) na ligação. O momento fletor é o único esforço considerado. A configuração do ensaio é apresentada na Figura 2.2 e consiste em um protótipo padrão com coluna de 760 mm de altura, engastada em suas extremidades, tendo conectada em sua meia altura uma viga de 660 mm de comprimento. A carga é aplicada sobre a viga 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. Na Figura 2.2, tem-se a nomenclatura e as dimensões dos elementos do protótipo padrão, sendo:

P = carga aplicada na extremidade da viga;
L_b = comprimento do braço de alavanca da viga;
L_c = comprimento da coluna.

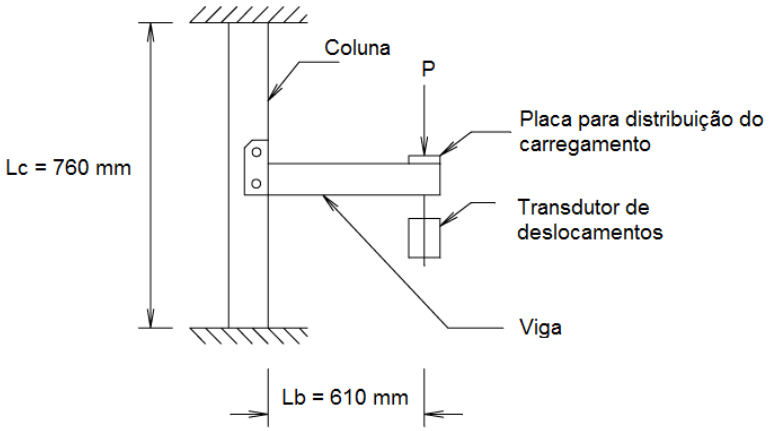

Figura 2.2: Configuração do ensaio Cantilever Test. (Adaptada de RMI 2008).

2.5 Métodos para a determinação da rigidez

Tem-se vários métodos para o cálculo da rigidez de uma ligação. Segundo Godley (1991), a eficiência desses métodos depende principalmente da linearidade da parte inicial da curva, onde faz-se uma aproximação linear, e podemos dizer que a rigidez da ligação é dada por:

$$k = \frac{M}{\theta} \qquad (2.1)$$

Onde:

k = rigidez da ligação (kNm/rad);

M = momento (kNm);

θ = rotação da ligação (radianos).

A inclinação da reta fornecerá o valor (k) calculado da rigidez.

Serão apresentados três métodos usuais para o cálculo da rigidez de ligações empregadas nos sistemas de armazenagem.

2.5.1 Método da Inclinação Inicial

Consiste em traçar uma reta passando pela origem, e interceptando a curva no seu trecho inicial. A inclinação da reta representa a rigidez da ligação, como representado na Figura 2.3.

Este método é muito impreciso e de difícil utilização para os casos em que o comportamento da ligação seja fortemente não-linear.

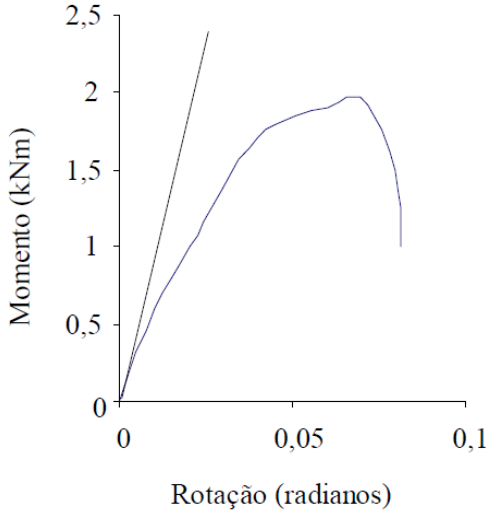

Figura 2.3: Método da Inclinação Inicial (Oliveira, 2000).

2.5.2 Método das Áreas Iguais

De acordo com Godley (1997), este método consiste no cálculo da rigidez estabelecendo-se a igualdade entre áreas hachuradas A_1 e A_2, conforme ilustrado na Figura 2.4.

Este método é pouco utilizado devido a dificuldade de sua operalização.

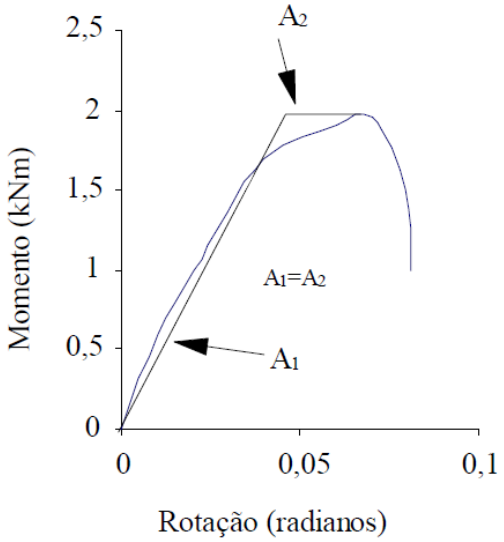

Figura 2.4: Método das Áreas Iguais (Oliveira, 2000).

2.5.3 Método da Inclinação a 50% do Momento Último

Consiste em medir a inclinação de uma reta passando pela origem e pela coordenada correspondente a 50% do momento último (M_u), como ilustrado na Figura 2.5.

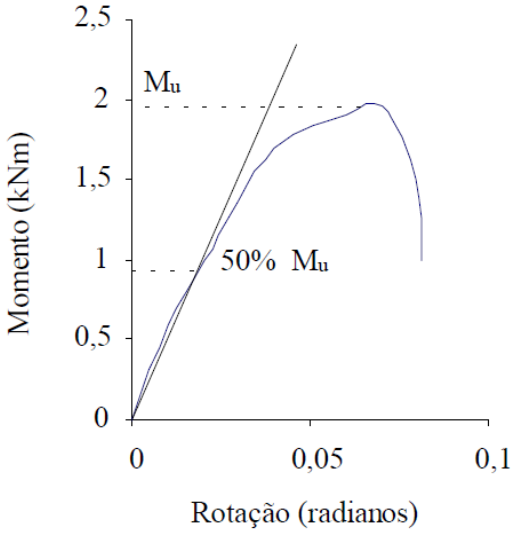

Figura 2.5: Método da Inclinação a 50% do Momento Último (Oliveira, 2000).

2.5.4 Determinação da rigidez pelo RMI

A rigidez da ligação viga-coluna dos racks pode ser obtida considerando a relação momento (M) versus a rotação linear (θ), sendo expressa por:

$$F = \frac{M}{\theta} \tag{2.1}$$

Utilizando a conhecida carga vertical aplicada P, e o deslocamento resultante dessa carga aplicada na extremidade livre da viga é dado pela seguinte equação:

$$\delta = PL_b^2\left(\frac{L_c}{16EI_c} + \frac{L_b}{3EI_b} + \frac{1}{F}\right) \tag{2.2}$$

Resolvendo a equação em termos de F, obtém-se, portanto, a rigidez da ligação prescrita pelo RMI (2008), considerando a análise linear:

$$F = \frac{(RF)}{\frac{\delta_{0,85}}{P_{0,85}L_b^2} - \frac{L_c}{16EI_c} - \frac{L_b}{3EI_b}} \tag{2.3}$$

Onde:

$P_{0.85}$ = carga referente a 85% da carga última;

$\delta_{0,85}$ = deslocamento correspondente ao valor da carga $P_{0,85}$;

F = rigidez da ligação (kNm/rad);

M = momento da ligação (kNm);

θ = rotação (radianos).

L_b = comprimento do braço de alavanca da viga (610 mm);

L_c = comprimento da coluna (760 mm);

E = módulo de elasticidade (E= 200 GPa);

I_c = momento de inércia da seção transversal da coluna em torno do eixo perpendicular ao plano da figura;

I_b = momento de inércia da seção transversal da viga em torno do eixo perpendicular ao plano da figura;

R.F. = 2/3 (fator de redução para garantir segurança quanto à dispersão dos resultados dos testes. É utilizado no dimensionamento de vigas);

R.F. = 1 (fator de redução para garantir segurança quanto à dispersão dos resultados dos testes. É utilizado no dimensionamento de colunas).

No denominador da equação 2.3, observam-se três parcelas que contribuem para a avaliação da rigidez da ligação. A primeira considera os valores obtidos experimentalmente, portanto, o valor real total do deslocamento ou a rotação da ligação; a segunda leva em conta a relação rotação momento à meia altura da coluna; e a terceira parcela, a relação rotação momento relativa a uma viga em balanço submetida a uma carga concentrada na extremidade. Assim, da rotação real total determinada experimentalmente é retirada a parcela relativa à rotação da coluna e da viga, de modo a obter o valor da rigidez da ligação.

O par de valores $P_{0,85}$ e $\delta_{0,85}$ deve ser obtido por meio da curva carga x deslocamento gerada com base nos resultados do ensaio Cantilever Test.

3 Análise Numérica

Este capítulo contém a descrição do modelo numérico, detalhando as seções dos elementos constituintes e a criação da geometria no software ANSYS 14.0.

A modelagem numérica em elementos finitos via ANSYS iniciou-se pela linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language). A estrutura foi analisada através de um modelo tridimensional, constituído por variáveis, objetivando economia de esforços e tempo em sua análise.

As peças em três dimensões foram construídas separadamente e cada uma delas teve suas variáveis declaradas no início da rotina de programação.

As etapas para a construção da geometria na linguagem APDL estão listadas abaixo.

1- Lançaram-se pontos chave (keypoints), através de suas coordenadas no arquivo de entrada para criar cada elemento constituinte do modelo.

2- Através dos keypoints foram formadas as áreas, o que conferiu forma aos perfis utilizados.

3- Introduziram-se as propriedades dos materiais das seções.

4- Criaram-se as malhas de elementos finitos.

5- Inseriram-se as condições de contorno.

6- Aplicou-se um deslocamento vertical na viga do modelo seguindo a orientação do RMI.

7- Obtenção da curva carga aplicada x deslocamento vertical da viga e, por consequência, da curva momento x rotação.

8- Análise dos resultados.

3.1 Construção da Geometria

3.1.1 Coluna

Escolheu-se a seção transversal da coluna com base em pesquisas anteriores (Miranda, 2011). Trata-se de uma seção comercial também utilizada para a obtenção dos resultados experimentais. As principais dimensões são apresentadas na Tabela 1 e na Figura 3.1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**a seguir.

Tabela 1: Dimensões da seção Rack em milímetros.

Coluna	Dimensões (mm)
Espessura	2,25
Comprimento	760
Alma	84
Flange	34
Enrijecedor	28,6
Flange de ligação	22

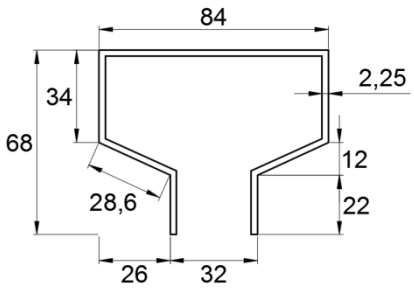

Figura 3.1: Dimensões da Seção Rack em milímetros.

Criou-se a geometria introduzindo-se as coordenadas que levaram ao modelo 3D, apresentado na Figura 3.2. A alma da coluna contém perfurações inclinadas, para acoplar a garra, totalizando dez pares de furos equidistantes entre si.

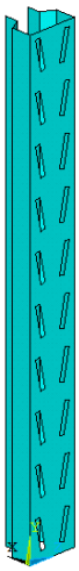

Figura 3.2: Coluna em 3D.

A coluna considerada possui 760 mm de comprimento, com pares de furos distanciados 28 mm entre si e 15 mm das laterais, com inclinação de 11,3°, totalizando 10 pares de furos.

3.1.2 Garra

A garra também foi criada por pontos coordenados, linhas e áreas, e suas dimensões estão representadas na Tabela 2 e na Figura 3.3. São três dentes inclinados e equidistantes entre si, de forma que se encaixam perfeitamente nas perfurações da coluna.

Tabela 2: Dimensões da garra em milímetros.

Garra	Dimensões (mm)
Espessura	3,3
Comprimento	235
Alma	55

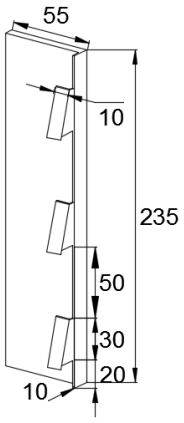

Figura 3.3: Dimensões da garra em milímetros.

O equilíbrio do modelo dá-se pela ligação garra-viga, tornando este elemento fundamental no comportamento da ligação em estudo. A placa da garra é a área onde a viga será soldada. Os dentes são do mesmo tamanho e formato, e outros detalhes podem ser vistos na Figura 3.4 abaixo.

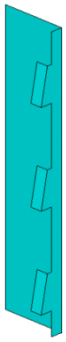

Figura 3.4: Garra em 3D.

3.1.3 Viga

A viga é constituída por um perfil de seção fechada, com as dimensões apresentadas na Tabela 3 e na Figura 3.5, e comprimento de 660 mm. Também criou-se a geometria por pontos coordenados, como os demais elementos.

Tabela 3: Dimensões da viga em milímetros.

Viga	Dimensões (mm)
Espessura	2,0
Comprimento	660
Largura	50
Altura	120

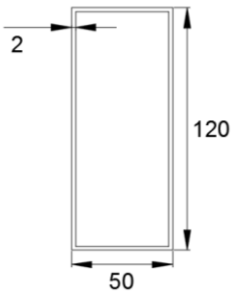

Figura 3.5: Seção transversal da viga, dimensões em milímetros.

A ligação por solda entre a viga e a garra não será detalhada nesse estudo, pois sua resistência não é objeto da pesquisa.

3.2 Propriedades do material

Na ligação analisada, existem três tipos diferentes de aço. A coluna e a viga utilizam os aços estruturais A570 e A36, no entanto, a garra, que é um elemento fundamental para a ligação, é constituída pelo aço SAE 1020, que embora tenha seu uso admitido na NBR 14762, não é um aço estrutural, tendo limitações em sua utilização. As propriedades dos elementos e observações são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades do material, modificada de Miranda (2011).

Propriedades do Material				
Elemento	**Aço**	**f_y (MPa)**	**f_u (MPa)**	**Observação**
Coluna	A570-Gr45	434,85	539,21	Valor obtido por ensaio de caracterização do aço
Garra	SAE 1020	180	300	Valores Nominais
Viga	ASTM A36	250	400	Valores Nominais
Módulo de Elasticidade do Aço (E)				200 GPa
Coeficiente de Poisson (v)				0,3

A NBR 8800 prescreve a consideração das tensões residuais para os aços. Existem diversos métodos para esta consideração, e a norma prevê que seja feito com a redução de 30% na resistência ao escoamento do material: $(f_y - \sigma_r) = (f_y - 0{,}3f_y)$.

Todos os elementos da ligação são constituídos por perfis formados a frio, que em geral são afetados pelas tensões residuais. Desta forma, consideraram-se três situações:

1 – nenhum elemento afetado pelas tensões residuais;
2 – todos os elementos afetados pelas tensões residuais;
3 – apenas a garra afetada pelas tensões residuais;

A situação 3 foi considerada devido à importância da garra no comportamento da ligação e por ela, devido à sua fabricação, ser o elemento mais afetado pelo trabalho a frio. A Tabela 5 apresenta as propriedades das situações 2 e 3 consideradas.

Tabela 5: Propriedades dos Elementos da Ligação

Propriedades dos Elementos da Ligação				
Tensão Residual	**Elementos**	**Aço**	**f_y (MPa)**	**f_u (MPa)**
Situação 2	Coluna	A570-Gr45	304	378
	Garra	SAE 1020	126	216
	Viga	ASTM A36	175	300
Situação 3	Coluna	A570-Gr45	434,85	539,21
	Garra	SAE 1020	126	216
	Viga	ASTM A36	250	400

3.3 Malha

3.3.1 Coluna

A malha de elementos finitos utilizada na coluna foi constituída por elementos de casca, conforme apresentado na Figura 3.6. O software dispõe de vários elementos de casca em sua biblioteca, e o elemento “SHELL 181” foi escolhido pelo bom desempenho apresentado em pesquisas anteriores, como Miranda (2011) e Souza (2005), e por se adaptar aos contornos dos elementos do modelo. 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). A geometria dos elementos foi definida automaticamente pelo programa.

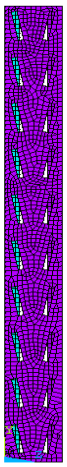

Figura 3.6: Detalhe da malha na coluna.

3.3.2 Garra

A malha automática de elementos finitos também utilizou elementos de casca, SHEL181, pelos mesmos motivos apresentados para a coluna. A Figura 3.7 mostra a malha da garra. Aqui também foi adotado o refinamento automático.

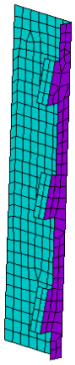

Figura 3.7: Detalhe da malha na garra.

3.3.3 Viga

A construção da viga no software possui uma distinção. A parte inicial da viga foi modelada com elementos de casca, SHEL181, pois como nesta região há a ligação com a garra, é necessário maior detalhamento da mesma. O restante da viga, onde este detalhamento não é fundamental, foi simulado com elementos de barra (BEAM188), que é apropriado para análises de estruturas esbeltas a moderadamente espessas. A Figura 3.8 apresenta o modelo adotado para a viga. Aqui também foi adotado o refinamento automático.

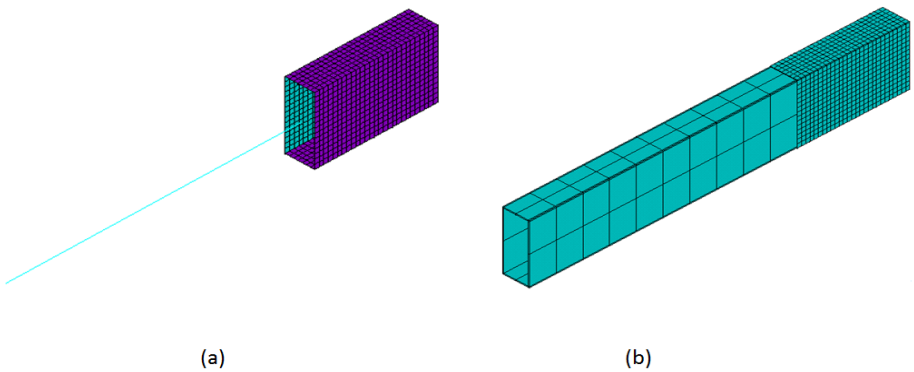

Figura 3.8: (a) Viga com linha do elemento de viga; (b) Viga com a seção expandida.

Na parte que contém o elemento de casca a seção do perfil caixa fica evidente, e, o elemento de viga é caracterizado por uma linha, localizada no centroide da seção, a qual recebe características como a seção transversal e as propriedades do material. Essa configuração reduz significativamente o tempo de processamento no ANSYS. Na interface entre os elementos de casca (SHELL 181) e de viga (BEAM188) foi utilizado o comando "CERIG".

O comando "CERIG" cria uma região rígida. Nesse estudo, a região rígida estará na extremidade da viga com o elemento de casca. Para aplicar o CERIG, foi necessário criar um nó mestre no centroide da seção caixão, na face mais extrema, que trabalhará em conjunto com os nós do perímetro da seção, estes nós do perímetro serão os nós dependentes. O nó chave controlará todo o comportamento da região rígida, e os nós que circundam a seção do perfil se deformarão todos com o mesmo deslocamento. O CERIG promove uma deformação por igual na seção, por atribuir uma configuração totalmente rígida. A representação desse comando no software está ilustrada pela Figura 3.9, onde fica claro o nó mestre, ao centro, e os nós dependentes.

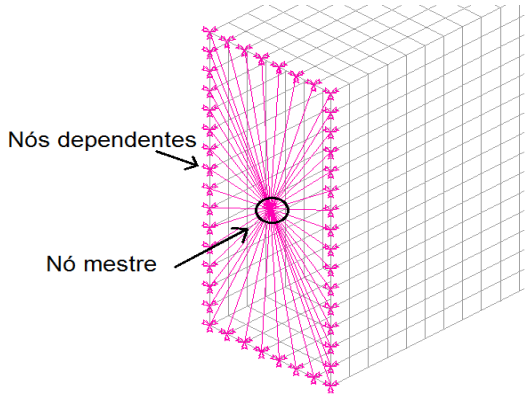

Figura 3.9: Cerig na extremidade da viga.

O modelo completo, sem considerar o comando CERIG possui 7267 elementos, e o modelo que considera o CERIG possui 5860 elementos.

3.4 Condições de contorno

De acordo com o RMI (2008) no ensaio do 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 nós das extremidades, restringindo assim todo o movimento, como é mostrado na Figura 3.10.

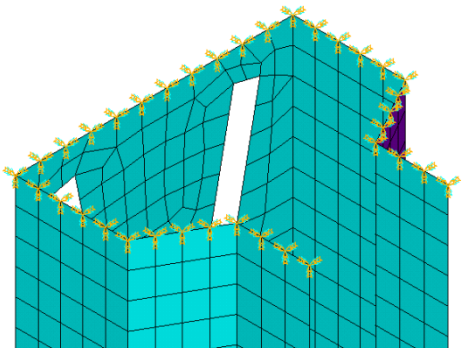

Figura 3.10: Condições de contorno da coluna.

Para evitar deslocamentos laterais, no ponto onde é aplicado o deslocamento, inseriu-se um apoio fora do plano, lateralmente à viga, que pode ser visto na Figura 3.11.

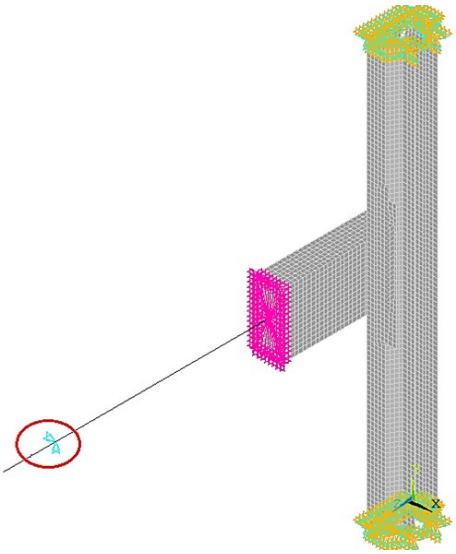

Figura 3.11: Detalhe do apoio fora do plano na viga.

3.5 Elemento de Contato

Utilizaram-se elementos de contato para simular a interação da coluna com a garra. Esse recurso foi aplicado à garra e ao flange da coluna em contato com a garra, como destacado na Figura 3.12. Para tanto, escolheu-se uma superfície para ser tomada como a superfície de contato e outra para ser tomada como a superfície alvo, gerando um par de contatos.

O ANSYS contém o assistente chamado “Contact Pair” onde é possível criar esse par de contatos para exprimir essa interação entre as superfícies em contato da ligação garra-coluna. O coeficiente de atrito utilizado foi 0,3 e os elementos foram o TARGET170 e o CONTA174. Utilizou-se o “TARGET170” por ser aplicável em superfícies 3D e por ter a capacidade de se moldar em superfícies rígidas e complexas, e o “CONTA174” apresenta as mesmas características do elemento de casca, ao qual está ligado, e se aplica a estruturas 3D.

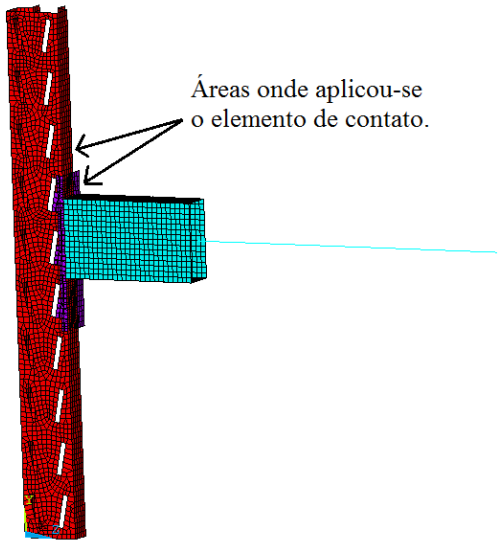

Figura 3.12: Áreas onde se aplicou o elemento de contato.

3.6 Acoplamento dos nós

Para simular o efeito da união da viga à coluna por meio da garra, utilizou-se a ferramenta de acoplamento de nós, onde os nós coincidentes dos dentes da garra com as perfurações da coluna tiveram seus graus de liberdade acoplados. Escolheu-se este recurso de acordo com a pesquisa de Miranda (2011), na qual os melhores resultados surgiram para o caso onde foi garantido que a garra e a viga trabalhassem juntas.

No presente modelo acoplaram-se os nós das arestas dos furos em contato com a garra. Para acoplá-los fez-se a seleção dos nós na região da aresta do furo, tanto dos nós da coluna como os da garra e os mesmos foram acoplados. Procedeu-se dessa forma para os três furos que estão em contato com os três dentes da garra, como apresentado na Figura 3.13.

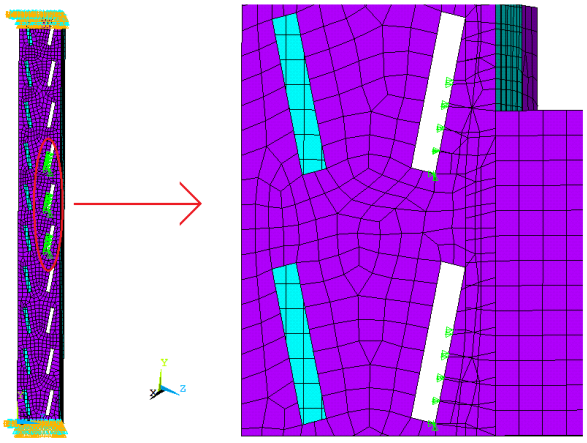

Figura 3.13: Acoplamento dos nós dos furos da coluna com a garra.

Os nós da extremidade inferior do furo e do dente da garra foram acoplados nas três direções e os demais na direção do plano Z, direção onde ocorre o contato ocasionado pelo deslocamento aplicado à viga, como é possível observar no detalhe da Figura 3.13.

3.7 Aplicação de Carga

O RMI (2008) prescreve o carregamento, uma carga pontual, vertical e para baixo, deve ser aplicada a 610 mm da face da coluna.

Neste trabalho, ao invés de aplicarmos uma carga pontual na viga, aplicou-se um deslocamento. Quando um deslocamento é prescrito em um nó, geram-se tensões na estrutura que resultam em uma força de reação naquele nó que é oposta, mas igual em módulo, à força externa que causaria o mesmo deslocamento. O controle de deslocamento foi utilizado, em proveito ao controle de carga, pois acelera a convergência do modelo numérico e permite contornar os pontos limite na trajetória de equilíbrio. A Figura 3.14 mostra o modelo com destaque para o ponto de aplicação do deslocamento vertical.

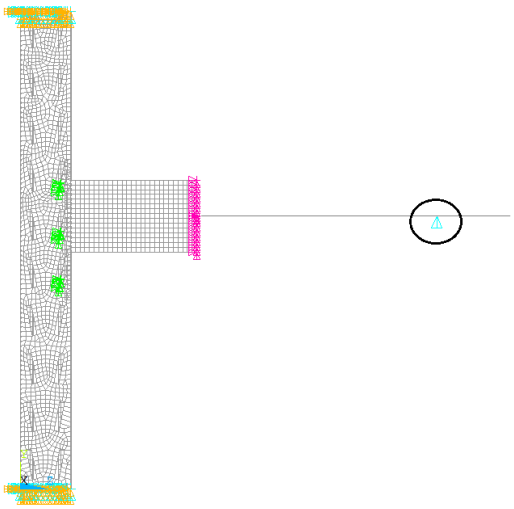

Figura 3.14: Modelo geométrico completo, destacando o deslocamento a 610 mm da face da coluna.

3.8 Estratégia de Solução

Por se tratar de um modelo não linear, que apresenta problemas na convergência, o software ANSYS contém alternativas para acelerar a convergência, como a estratégia de solução por controle de deslocamentos.

Para essa simulação foi usado o controle dos deslocamentos para a aplicação do carregamento levando em consideração a não linearidade física (devida ao comportamento do material) e geométrica (devida aos efeitos de segunda ordem), com o objetivo de obter a curva momento x rotação da ligação.

4 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados da análise. Primeiramente, será apresentada a análise da influência das tensões residuais no comportamento da ligação, a partir da comparação com resultados experimentais descritos em Miranda, 2011. Estes resultados experimentais serão utilizados para validar o modelo de elementos finitos.

Posteriormente, será avaliado o comportamento da ligação simulada via elementos finitos através da curva carga x deslocamento e análise da distribuição de tensões nos elementos constituintes da ligação.

Por fim, os resultados obtidos serão utilizados na determinação da rigidez da ligação pelo método do RMI, 2008. Ressalta-se que a presente pesquisa utilizou os dados experimentais de apenas uma configuração de ligação descrita no estudo de Miranda, 2011.

A figura 4.2 mostra os resultados obtidos para o modelo experimental.

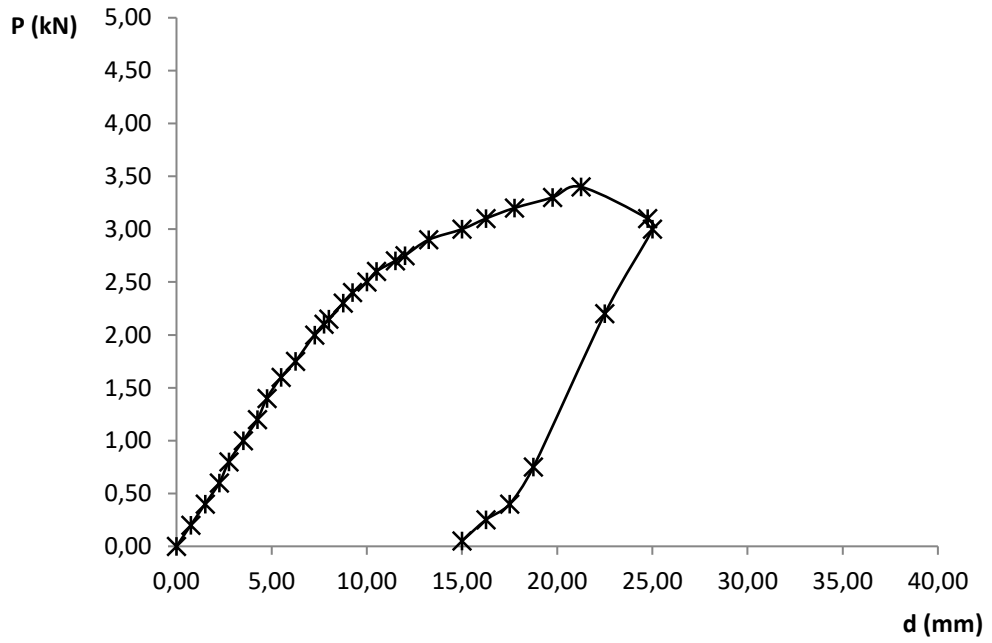

Figura 4.1: Curva carga x deslocamento do modelo experimental (Miranda, 2011).

Observa-se pelo trecho inicial da trajetória que o modelo apresentou comportamento linear até a carga de 2,6 kN, chegando posteriormente a um valor máximo de 3,3 kN. A partir deste ponto, observa-se a descarga com declividade acentuada da resistência da ligação.

4.1 Viabilidade da utilização de elemento de viga

O software ANSYS possui ferramentas que possibilitam a caracterização dos elementos nele criados, como os elementos de casca e o elemento de viga, representados na Figura 3.8.

Comparando-se a utilização desses tipos de elementos, nota-se pelo gráfico da Figura 4.2 que a inserção do elemento de viga no modelo melhora o desempenho computacional, sem comprometer os resultados do modelo, justificando assim a viabilidade de sua utilização.

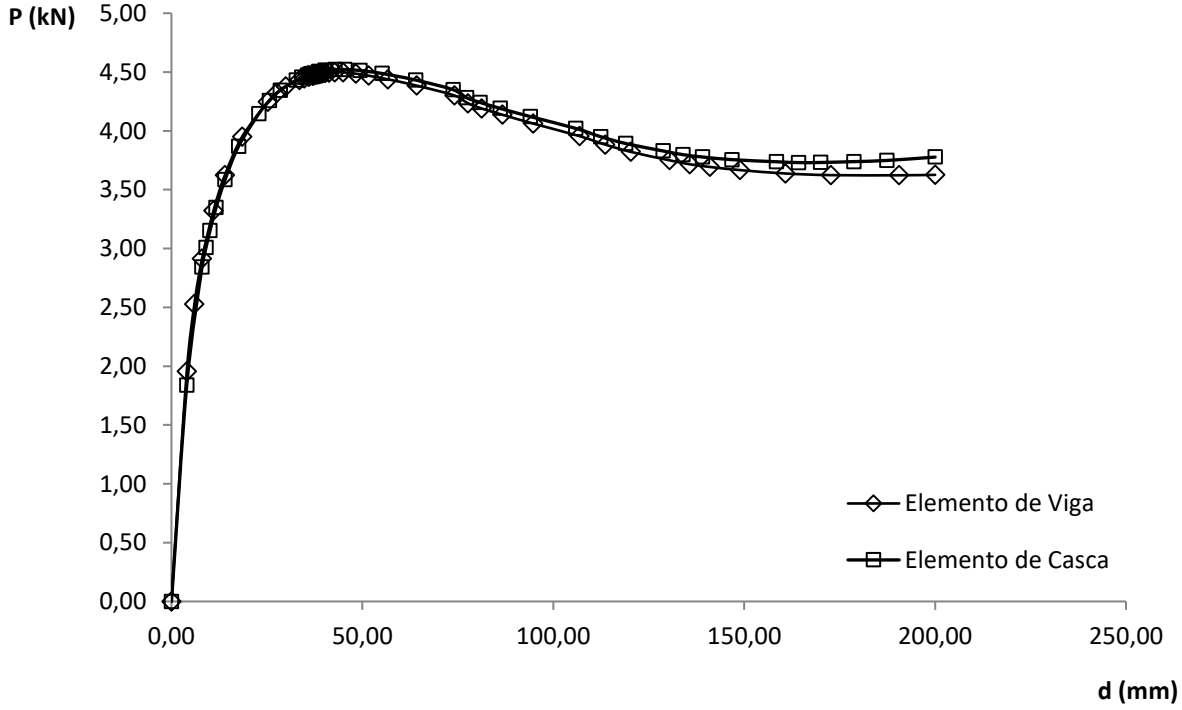

Figura 4.2: Comparativo do uso do elemento de viga e de casca na viga do modelo.

4.2 Influência da tensão residual

A tensão residual é aquela que se mantém na peça mesmo quando não há ação de forças externas, como resultado do processo de fabricação. Sua importância se dá pelo fenômeno da superposição, pois eventualmente, as tensões residuais se sobrepõem à tensão aplicada, aumentando-se ou diminuindo-se a tensão efetiva aplicada, conforme sua natureza (tração ou compressão). Em ligações essa propriedade torna-se determinante para a segurança e equilíbrio do sistema.

A Tabela 5 apresentada anteriormente expõe as propriedades dos materiais considerando-se as tensões residuais conforme procedimento previsto na NBR 8800:2008. Para

avaliar a influência das tensões residuais no comportamento da ligação, foram simuladas três situações. Na primeira, não foram considerados seus efeitos em nenhum dos componentes da ligação. Posteriormente, consideraram-se tensões residuais em todos os elementos da ligação e ainda somente na garra da mesma.

4.2.1 Nenhum elemento com tensão residual

Nesta análise consideraram-se todos os elementos, como apresentado na Tabela 4, sem tensão residual, e compararam-se os resultados com a análise experimental. A Figura 4.3 mostra essa comparação.

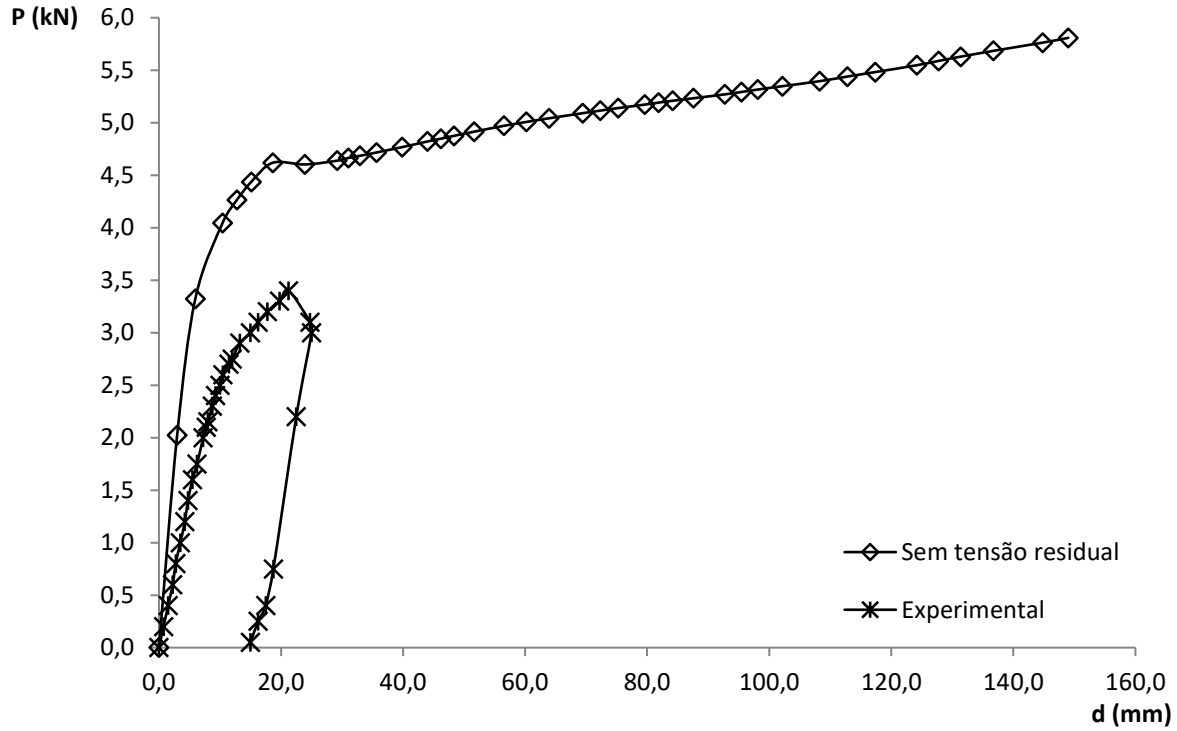

Figura 4.3: Curvas carga x deslocamento sem o efeito da tensão residual em todos os elementos.

Observa-se que a curva com os resultados do modelo numérico ficou acima do experimental, o que representa um modelo mais rígido. Como o intervalo entre os valores de carregamento para as duas curvas é muito significativa, esse modelo torna-se inviável, pois leva a resultados contrários à segurança.

Analisando-se o comportamento da curva no âmbito das tensões de von Mises, a primeira mudança de trajetória corresponde ao carregamento 3,32 kN, apontando para o início

da plastificação da garra e da viga, como é possível ver na Figura 4.4 (a). O pico do gráfico, no ponto de carregamento 4,62 kN, indica a plastificação da garra, representados na Figura 4.4 (b). Mesmo com a plastificação da garra, a viga ainda é capaz de suportar algum carregamento, e isso explica a ascensão da curva do gráfico. A Figura 4.4 (c) ilustra as tensões da garra e da viga para a carga de 4,60 kN.

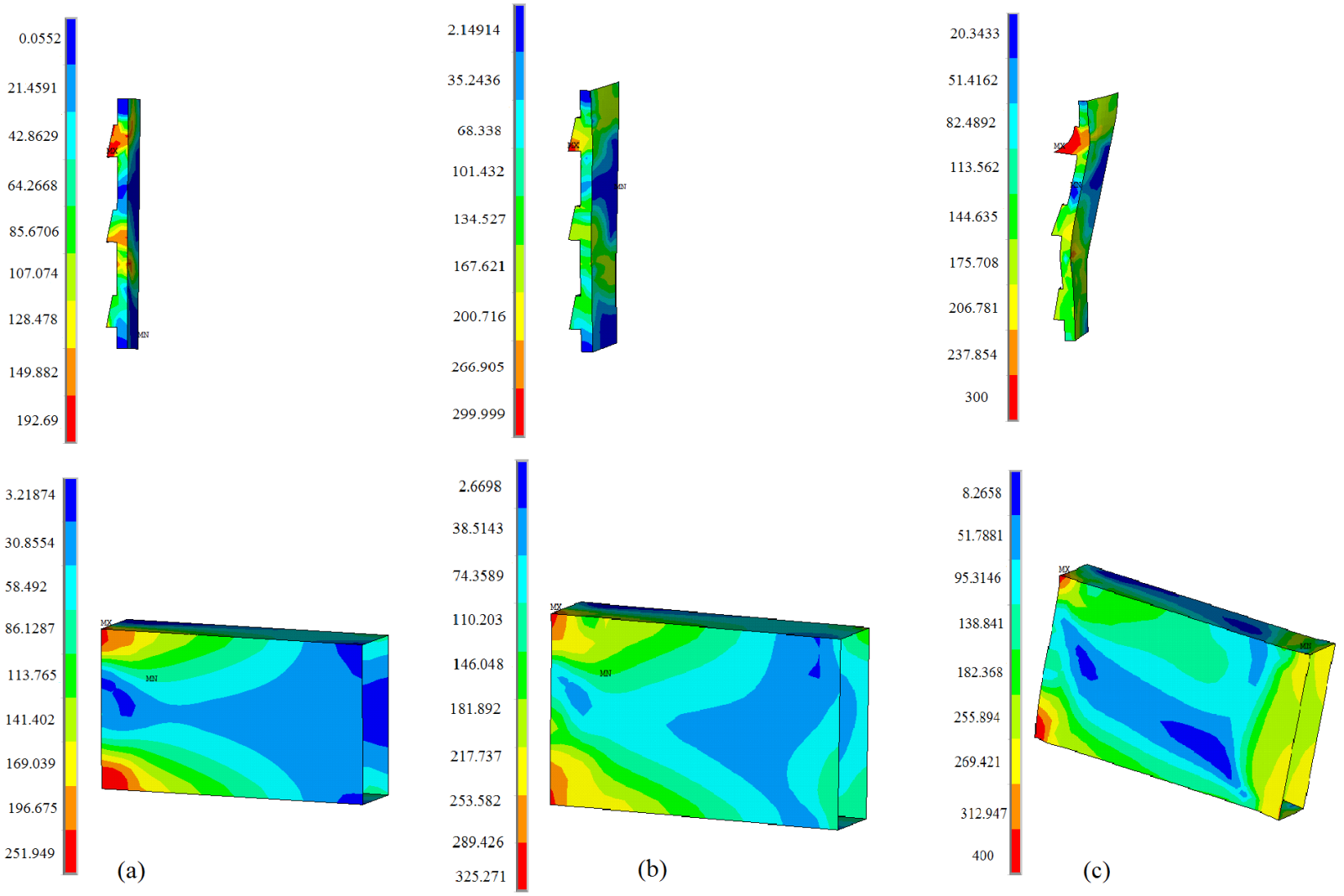

Figura 4.4: (a) Distribuição das tensões para o carregamento de 3,32kN. (b) Distruibuição das tensões para o carregamento de 4,62kN. (c) Distribuição das tensões para o carregamento de 4,60kN.

4.2.2 Todos os elementos com tensão residual

Para a análise da situação 2 consideraram-se as propriedades dos elementos apresentadas na Tabela 5, em que todos os elementos são considerados com tensão residual. Compararam-se o resultado com a análise experimental obtendo-se a Figura 4.5.

Observa-se que a curva com os resultados do modelo numérico se aproxima do experimental no trecho inicial. Há mudança de trajetória significativa no resultado do modelo numérico para carregamentos acima de 3,0 kN, mantendo um comportamento similar para os próximos carregamentos, com ganho de rigidez, o que também torna esse modelo inadequado para análise. Esse comportamento similar não é observado na trajetória do modelo experimental, pois há uma declividade brusca para carregamentos acima de 3,5 kN.

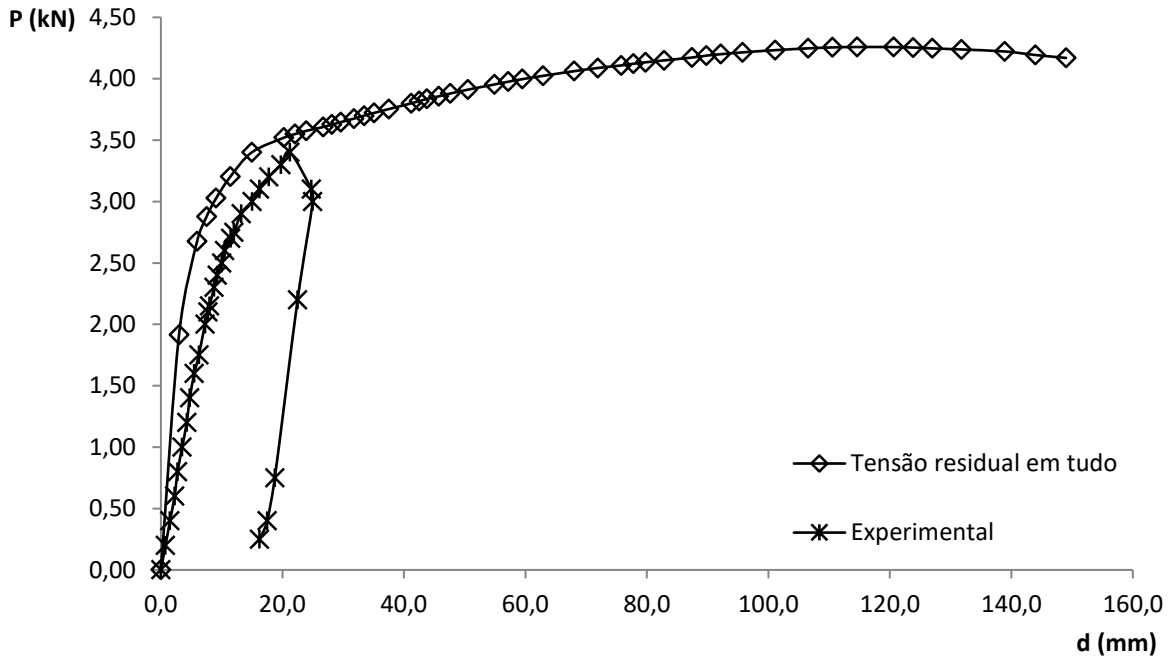

Figura 4.5: Curvas carga x deslocamento com tensão residual em todos os elementos.

Aprofundando a análise dos resultados no software ANSYS, extraindo-se a distribuição de tensões, constata-se para o modelo numérico, que a primeira mudança na linha da trajetória ocorre quando a garra e a viga atingem suas tensões de escoamento para o carregamento de 1,92 kN mostrado na Figura 4.6 (a), e segue com alguma similaridade até o ponto de carregamento 3,40 kN, onde a garra atinge a tensão última de acordo com a Figura 4.6 (b). Observando o gráfico da Figura 4.5 notamos que o valor máximo está entre os deslocamentos de 100,0 mm e 120,0 mm, no ponto de carregamento 4,26 kN. Esse pico caracteriza o momento

em que a garra e a viga atingem suas respectivas tensões últimas, e a ligação perde resistência exemplificado na Figura 4.6 (c).

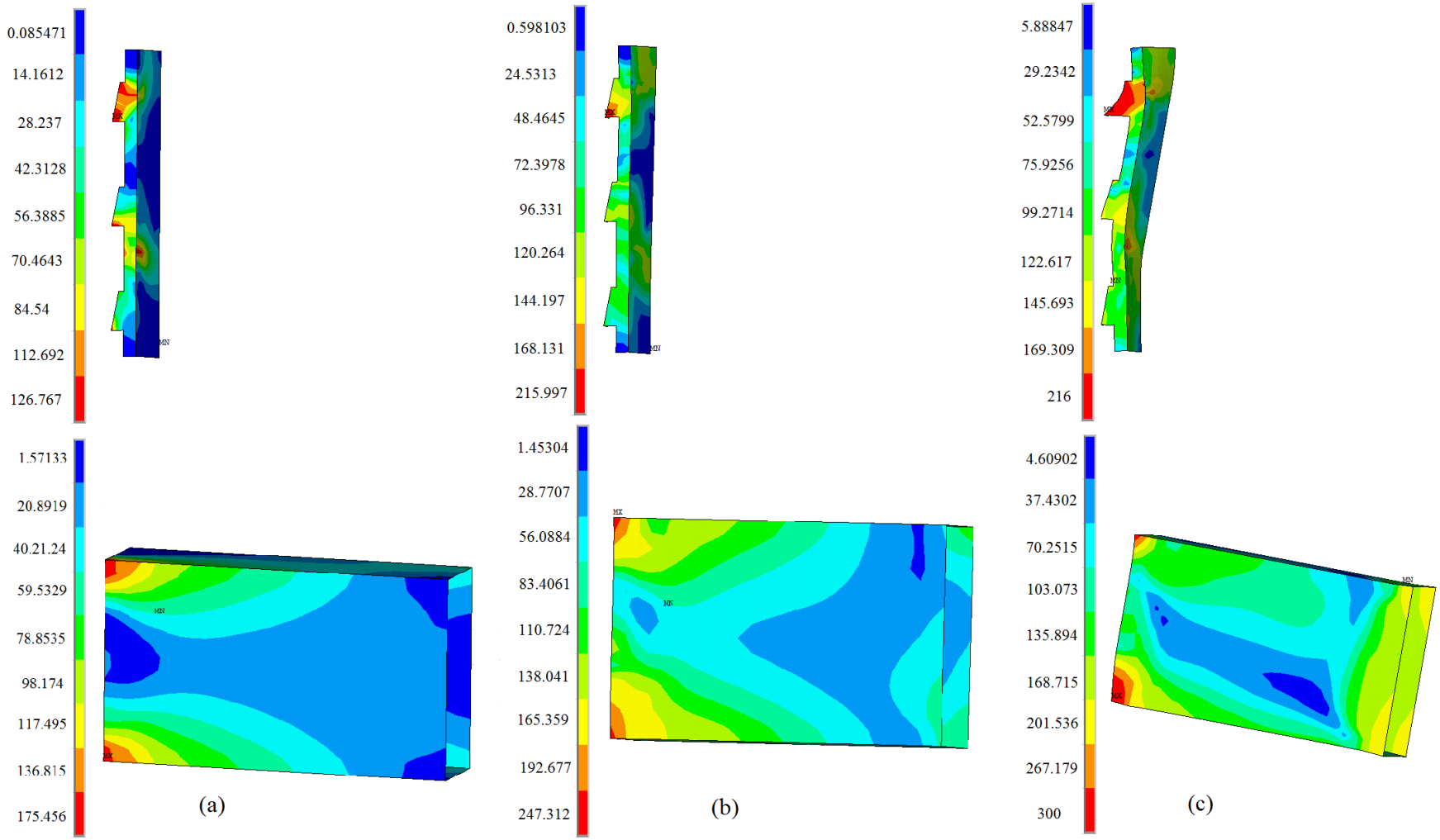

Figura 4.6: (a) Distribuição de tensões para o carregamento de 1,92 kN. (b) Distribuição de tensões para o carregamenteo de 3,40 kN. (c) Distribuição de tensões para o carregamento de 4,26 kN.

4.2.3 Garra com tensão residual

Na análise da situação 3 consideraram-se as propriedades dos elementos apresentadas na Tabela 5 em que só a garra é considerada com tensão residual. Compararam-se os resultados com a análise experimental obtendo-se a Figura 4.7.

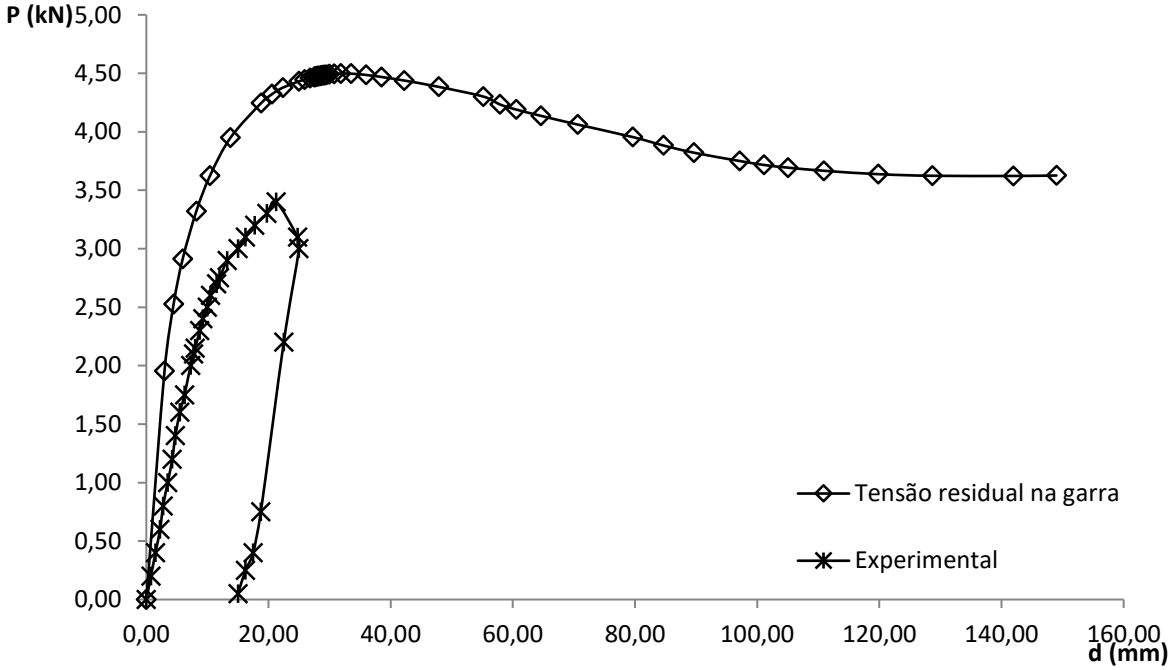

Figura 4.7: Curvas carga x deslocamento só para a garra com tensão residual

Como na análise da Figura 4.5, a primeira mudança de trajetória do modelo numérico está associada ao instante em que a garra atinge sua tensão de escoamento, o valor máximo do gráfico caracteriza o momento em que a garra e a viga atingem suas tensões últimas, e a declividade demonstra perda de resistência da ligação. Observa-se, nesta hipótese, que a curva obtida numericamente apresenta, de forma muito definida, o valor da carga última da ligação, 4,498 kN. Este valor é importante para a utilização do método proposto pelo RMI para a determinação da rigidez da ligação.

Como nos outros dois casos, analisou-se a distribuição de tensões. A primeira mudança de trajetória ocorre quando a garra e a viga atingem suas tensões de escoamento no ponto de carga 2,53 kN ilustrado na Figura 4.8 (a). O momento em que a garra atinge sua tensão última caracteriza a segunda mudança na trajetória, para o carregamento de 4,49 kN mostrado na Figura 4.8 (b). E, a Figura 4.8 (c) ilustra o ponto em que a viga e a garra atingem a tensão última no ponto de carregamento 3,62 kN.

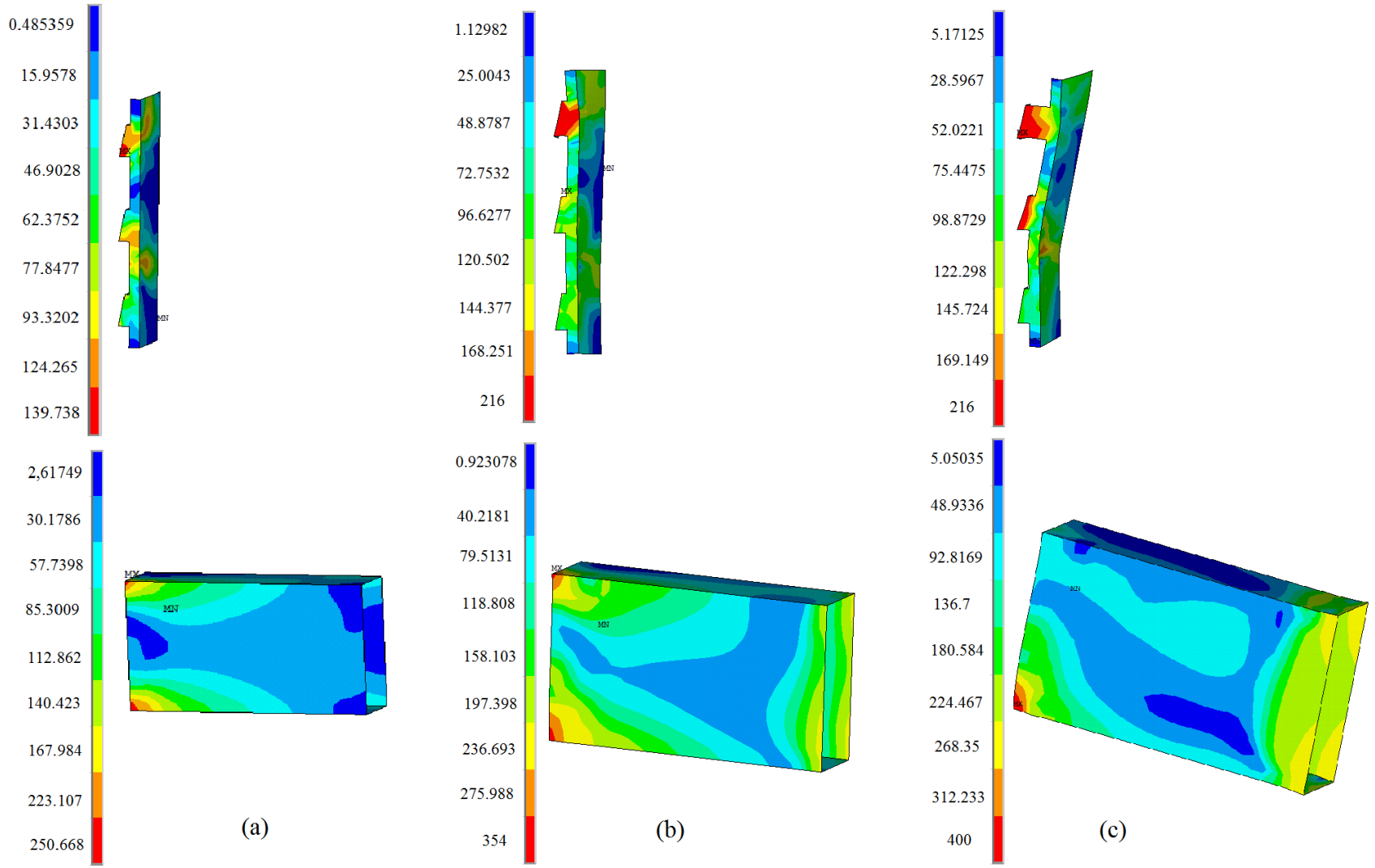

Figura 4.8: (a) Distribuição de tensões para o carregamento de 2,53 kN. (b) Distribuição de tensões para o carregamento de 4,49 kN. (c) Distribuição de tensões para o carregamento de 3,62 kN.

4.3 Determinação da Rigidez Numérica pelo RMI

Foram utilizados os valores obtidos nas análises numéricas para a determinação da rigidez de acordo com as expressões do RMI que foram apresentadas no item 2.5.4. A rigidez calculada no modelo experimental é F = 89,21 kN (Miranda, 2011).

A Tabela 6 apresenta esses valores para os três casos de utilização da tensão residual no modelo numérico e a rigidez correspondente.

Tabela 6: Uso da tensão residual.

Uso da tensão residual								
Valores	**Situação 1**		**Situação 2**		**Situação 3**		**Experimental**	
P_u (kN)	4,61	4,61	4,26	4,26	4,5	4,5	3,48	3,48
δ_u (mm)	18,64	18,64	114,6	114,6	31,83	31,83	22,02	22,02
$P_{0,85}$ (kN)	4,04	4,04	3,63	3,63	3,95	3,95	2,91	2,91
$\delta_{0,85}$ (mm)	10,43	10,43	28,16	28,16	13,78	13,78	13,82	13,82
R.F	2/3	1	2/3	1	2/3	1	2/3	1
F (kNm/rad)	125,3	187,9	32,0	52,00	85,9	128,9	59,49	89,21

Comparando-se os valores da rigidez para o modelo numérico e experimental, nota-se que a tensão residual exerce influência notável no comportamento dos elementos do modelo, principalmente na garra, pois é o elemento que sofre mais trabalho a frio.

Observa-se ainda uma aproximação entre valores de rigidez do modelo numérico com o experimental para a situação onde utilizou a tensão residual só na garra. Essa similaridade comprova que a ruptura da ligação inicia pela garra, validando os resultados obtidos.

5 Considerações Finais

Os sistemas de armazenagem industriais de seções tipo racks são estruturas compostas por perfis formados a frio. Os primeiros racks foram construídos com cantoneiras de aço formado a frio, com perfurações na alma desse perfil. Apesar da flexibilidade permitida, a montagem parafusada era trabalhosa. Seções específicas de ligação foram criadas para os racks, e esses conectores podem apresentar vários formatos.

O destaque do presente trabalho está no estudo da ligação garra - coluna. Ligação caracterizada pelo encaixe dos dentes da garra nas perfurações da alma da coluna. Esse tipo de ligação é caracterizada como semirrígida. As ligações dessa natureza são as intermediárias, o momento transmitido através da ligação não é nem zero como no caso das ligações flexíveis e nem o momento máximo, como nas ligações rígidas. A rigidez dessa conexão foi calculada embasada no ensaio da viga em balanço, prescrito pelo RMI (2008).

Obtém-se com esse ensaio o comportamento momento-rotação da ligação e sua rigidez. Cargas graduais são aplicadas no modelo e os deslocamentos são medidos a cada etapa do carregamento, os resultados são plotados em uma curva carga x deslocamento.

Como ensaios em laboratórios são caros, uma alternativa para o estudo foi a análise numérica do modelo. A estrutura foi analisada através de um modelo tridimensional, constituído por variáveis, utilizando-se o software ANSYS com a linguagem APDL. O objetivo foi avaliar numericamente a ligação e determinar sua rigidez e resistência.

O modelo foi criado, por pontos coordenados e áreas, cada elemento recebeu as propriedades geométricas do seu material, e levou-se em consideração a tensão residual na garra. A malha automática de elementos finitos foi gerada com elementos de casca (SHEL 181), sendo que a viga possui uma particularidade, parte desse elemento é constituído por elemento de casca e a outra parte por elemento de viga (BEAM 188). Na junção desses dois elementos utilizou-se um comando para a criação de uma região rígida, que promove uma transferência de deslocamentos na interface entre os dois tipos de elementos. Essa estratégia foi adotada para melhor detalhar o comportamento da viga na região próxima à garra.

A configuração de engaste nas extremidades da coluna caracteriza as condições de contorno aplicadas, respeitando o ensaio da viga em balanço. No ponto de aplicação da carga na viga, a uma distância de 610 mm da face da coluna, inseriu-se um apoio fora do plano para evitar deslocamentos laterais e conseguir resultados mais precisos.

Para simular a interação da coluna com a garra criou-se um par de contatos entre as superfícies da ligação garra-coluna. Para o contato dos dentes da garra nas perfurações da coluna, utilizou-se a ferramenta de acoplamentos de nós, onde os nós coincidentes tiveram seus graus de liberdade acoplados.

O RMI (2008) prescreve que o carregamento, uma carga pontual, vertical para baixo deve ser aplicada a 610 mm da face da coluna. Neste estudo, ao invés de aplicar uma carga, aplicou-se um deslocamento. O controle de deslocamentos supera algumas limitações do controle de carga, e sempre que possível, deve ser utilizado, pois também ajuda na convergência. Essa estratégia de solução objetivou a obtenção da curva momento x rotação da ligação, considerando a não linearidade física (devida ao comportamento do material) e geométrica (devida aos efeitos de segunda ordem).

Os resultados da análise levaram em conta a influência da tensão residual, onde ficou evidente que o uso dessa tensão somente na garra traria resultados mais satisfatórios, pois os dados analisados para essa situação foram os mais consistentes. O comportamento da ligação foi analisado pela curva carga x deslocamento, considerando três situações.

A situação 1 considerou todos os elementos sem tensão residual, como apresentado na Figura 4.3. No primeiro segmento nota-se que há uma relação aproximadamente linear entre a carga e o deslocamento. Essa relação segue até a garra atingir sua tensão última, onde há o pico do gráfico. A partir da plastificação da garra a ligação continua a sofrer ganhos de resistência, mantendo a relação direta entre a carga aplicada e o deslocamento associado até que as extremidades da viga atinjam sua tensão última. Quando isso ocorre há um aumento significativo de deslocamento e a carga atinge seu valor máximo.

A situação 2 considerou todos os elementos com tensão residual. O gráfico comporta-se de forma similar ao da situação 1, a primeira mudança de trajetória corresponde ao momento em que a garra e a viga atingem a tensão de escoamento, a segunda mudança de trajetória é o ponto em que a garra atinge a tensão última. A carga resistente máxima está entre os deslocamentos de 100,0 mm e 120,0 mm. Esse pico caracteriza o momento em que a garra e a viga atingem suas respectivas tensões últimas, e a ligação perde resistência.

A situação 3 considerou só a garra com tensão residual e, como nos outros dois casos, a primeira mudança de trajetória do modelo numérico está associada ao instante em que a garra atinge sua tensão de escoamento, o valor máximo do gráfico caracteriza o momento em que a garra e a viga atingem suas tensões últimas, e a declividade demonstra perda de resistência da ligação. Observou-se, nessa situação, que a curva obtida numericamente apresenta, de forma

muito definida, o valor da carga última da ligação, e esse valor é essencial para o cálculo da rigidez pelo método do RMI.

Após a análise das três situações e comparando os resultados numéricos com os experimentais apresentados por Miranda (2011), observa-se que o comportamento global do modelo numérico da ligação, considerando somente a garra com tensão residual, assemelha-se com os resultados dos ensaios, contendo um valor máximo de carga bem definido. No modelo experimental a rigidez calculada é F = 89,21 kNm/rad e no modelo numérico F = 85,5 kNm/rad, constatando uma boa equivalência entre os trechos.

Essa análise de dados aproximados valida o estudo numérico realizado.

Sugestão para trabalhos futuros:

- aprofundar o estudo da influencia das tensões residuais;
- analise paramétrica da ligação, com alteração de sua geometria;
- simulação de um ensaio do pórtico;
- avaliar a influência do refinamento da malha nos resultados do modelo;
- avaliar o uso do elemento de contato para representar o contato entre a garra e a coluna.

Referências

Abel-Rahman, N. Sivakumaran, K. S.Evaluation and Modelling of the Material Properts for Analysis of Cold-formed Steel sections. **International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures**.3. p. 623-640. Oct., 1997.

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

Águia (2011). Projeto de Sistemas de Armazenagem Industrial tipo Drive-in.

AS 4084. Steel storage racking. Sydney, Australia: Standards Australia; 2012.

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.

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

Baldassino, N. Bernuzzi, C. Analyses and Behaviour of Steel Storage Pallet Racks. **Thin-Walled Struct**. 37. p. 277-304. March, 2000.

Bernuzzi, C. Simoncelli, M. EU and US Design Approaches for Steel Storage Pallet Racks With Mono-symmetric Cross-section Uprights. **Thin- Walled Struct**. 113. p. 181-204. Jan., 2017.

Campos, S. R. **Estudo Teórico-Experimental de Sistemas Estruturais de Armazenagem Industrial Tipo Drive-in**. 2003. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

Dias, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de Aço: Conceitos, Técnicas e Linguagem**. 5ª edição. São Paulo. Zigurate, 2006.

EN 15512. Steel static storage systems – adjustable pallet racking systems –principles for structural design. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN); 2009.

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.P. et al. Determining the Transversal Shear Stiffness of Steel Storage Rack Upright Frames. **Journal of Constructional Steel Research**.78. p. 107–116. July, 2012.

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

Godley, M. H. R. Plastic Design of Pallete Rack Beams. **Thin-Walled Structures**. 29 (1-4), p. 175-188, 1997.

Grupo Alpha Porta Pallets: site comercial. Disponível em: <http:// http://porta-pallets.com/index.html> . Acesso em 01/02/2018.

Guerra, C. S. Manual de Sistemas de Armazenagem. 2014.

Jungheinrich: site commercial. Disponível em: <http://www.jungheinrich.pt/intralogistica/sistemas-armazenagem/estanteria-movel/>. Acesso em 01/02/2018.

Krawinkler H., CofieN.G.,Astiz M. A., Kircher C. A., **Experimental Study on the Seismic Behavior of Industrial Storage Racks**, Report No.41, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 139 p. 1979.

Markazi, F.D. Beale, R.G. Godley, M.H. R. Experimental analysis of semi-rigid boltless connectors. **Thin- Walled Struct**. 28 (1), p. 57–87, maio, 1997.

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.

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.

Pierin; I., Silva; V. P. Rovere. H. L. **Forças Normais e Momentos Fletores Críticos de Perfis Formados a Frio**. Revista da Estrutura de Aço. v. 2. n.1. Rio de Janeiro, 2013.

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; 2008.

RMI. Specification for design, testing, and utilization of industrial steel storage racks. Charlotte, N C: Rack Manufacturers Institute; 1997.

Sarawit, T. A. Pekoz, T. Cold-formed Steel Frame and Beam-column Design. **American Iron and Steel Institute**. Revised Edition. 2006. 349 f.

Schafer, B. W. Pekoz T. Computational Modeling of Cold-formed Steel: Characterizing Geometric Imperfections and Residual Stress. **Journal of Constructional Steel Research**. 47. p. 193–210. Jan., 1998.

Shah, S. N. R. at al. Behavior of Industrial Steel Rack Connections. **Mechanical Systems and Signal Processing**. 70-71. p. 725-740. 2016.

Souza, F. T. **Análise Teórico-Experimental de Sistemas Aporticados com Elementos Perfurados em Perfis Formados a Frio – Racks**. 2005. 119 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

Apêndice

Rotina de programação do modelo no ANSYS.

```
finish
/clear

/PREP7

! Parâmetros da coluna (mm)


EC=2.25          !ESPESSURA DA COLUNA
CC=796           !COMPRIMENTO DA COLUNA
AL=84            !ALMA
EN=46            !FLANGE + ENRIJECEDOR
FC=34            !FLANGE
FL=68            !FLANGE + ENRIJECEDOR + F. DE LIGAÇÃO
RE=21            !RECUO DO ENRIJECEDOR
AF=32            !ABERTURA DO FLANGE DE LIGAÇÃO
CF=50            !COMPRIMENTO DO FURO
BF=8             !ABERTURA DO FURO
AI=15            !AFASTAMENTO INFERIOR
AL1=20           !AFASTAMENTO LATERAL INFERIOR
AL2=10           !AFASTAMENTO LATERAL SUPERIOR
IF=2             !INCLINAÇÃO DO FURO
DF=AL-2*AL1-2*BF!DISTÂNCIA ENTRE FUROS


! Parâmetros da garra e viga (mm)


EG=3.3           !ESPESSURA DA GARRA
EV=2             !ESPESSURA DA VIGA
LD=10            !LARGURA DO DENTE DA GARRA
CV=210           !COMPRIMENTO DA VIGA
AG=55            !ALMA DA GARRA
BV=50            !LARGURA DA VIGA
AH=120           !ALTURA DA VIGA
CG=235           !COMPRIMENTO DA GARRA
AV=5             !AFASTAMENTO DA VIGA
FG=10            !FLANGE DA GARRA
FD=20            !FLANGE DO DENTE DA GARRA
FD2=14           !FLANGE DO DENTE DA GARRA SUPERIOR
AD=50            !AFASTAMENTO ENTRE DENTES
CD=30            !COMPRIMENTO DO DENTE
AIG=20           !AFASTAMENTO INFERIOR DA GARRA
AS=25            !AFASTAMENTO SUPERIOR DA GARRA
AV1=80           !AFASTAMENTO INFERIOR DA VIGA
AV2=35           !AFASTAMENTO SUPERIOR DA VIGA
HGV=315          !ALTURA DA GARRA NA VIGA
OF=80            !OFF SET DOS FUROS
QT=10            !QUANTIDADE DE CÓPIA DOS FUROS
PC=610           !PONTO DE CARGA
VE=710           !VIGA + ELEMENTO DE VIGA
```

```
! Variáveis do material

E=200000

! Viga

fy1=250
fr1=250
fu1=400
ey1=fy1/E

! Garra

fy2=126
fr2=126
fu2=216
ey2=fy2/E

! Coluna

fy3=434.85
fr3=434.85
fu3=539.21
ey3=fy3/E


! Criação dos keypoints da coluna

K,1,,,,
K,2,FC,,,
K,3,EN,,RE,
K,4,FL,,RE,
K,5,FL,,AL-RE,
K,6,EN,,AL-RE,
K,7,FC,,AL,
K,8,,,AL,

K,17,,AI,AL1,
K,18,,AI+IF,AL1+BF,
K,19,,AI+CF+IF,AL2+BF,
K,20,,AI+CF,AL2,

K,21,,AI,AL1+BF+DF+BF,
K,22,,AI+IF,AL1+BF+DF,
K,23,,AI+CF+IF,AL-AL2-BF,
K,24,,AI+CF,AL-AL2,

FLST,3,8,3,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,-8

! Criação dos keypoints da garra

K,25,,HGV,AL
K,26,,HGV,AL-FG
K,27,,HGV+AIG,AL-FG
K,28,,HGV+AIG,AL-FD
K,29,,HGV+AIG+CD,AL-FD2
```

```
K,30,,HGV+AIG+CD,AL-FG
K,31,,HGV+AIG+CD+AD,AL-FG
K,32,,HGV+AIG+CD+AD,AL-FD
K,33,,HGV+AIG+CD+AD+CD,AL-FD2
K,34,,HGV+AIG+CD+AD+CD,AL-FG
K,35,,HGV+CG-AS-CD,AL-FG
K,36,,HGV+CG-AS-CD,AL-FD
K,37,,HGV+CG-AS,AL-FD2
K,38,,HGV+CG-AS,AL-FG
K,39,,HGV+CG,AL-FG
K,40,,HGV+CG,AL
K,41,AG,HGV+CG,AL
K,42,AG,HGV,AL
K,43,LD,HGV+AIG,AL-FD
K,44,LD,HGV+AIG+CD,AL-FD2
K,45,LD,HGV+AIG+CD+AD,AL-FD
K,46,LD,HGV+AIG+CD+AD+CD,AL-FD2
K,47,LD,HGV+CG-AS-CD,AL-FD
K,48,LD,HGV+CG-AS,AL-FD2


! Criação dos keypoints da viga

K,49,,HGV+AV1,AL
K,50,,HGV+CG-AV2,AL
K,51,BV,HGV+CG-AV2,AL
K,52,BV,HGV+AV1,AL
K,53,,HGV+AV1,CV+AL
K,54,,HGV+CG-AV2,CV+AL
K,55,BV,HGV+CG-AV2,CV+AL
K,56,BV,HGV+AV1,CV+AL
K,57,BV/2,HGV+AV1+AH/2,CV+AL


! Copiando os keypoints da coluna em Y.

KGEN,2,P51X, , , ,CC, , ,0


! Criando as áreas da coluna

A,15,16,8,7
A,14,15,7,6
A,13,14,6,5
A,9,16,8,1
A,10,9,1,2
A,11,10,2,3
A,12,11,3,4

A,19,20,17,18
A,21,22,23,24


! Copiando e subtraindo os furos

FLST,3,2,5,ORDE,2
FITEM,3,8
FITEM,3,-9
```

```
AGEN,QT,P51X, , , ,OF, , ,0
FLST,3,20,5,ORDE,2
FITEM,3,8
FITEM,3,-27
ASBA,       4,P51X
!*
!*


! Criando as áreas da garra

A,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40
A,25,40,41,42
A,28,29,44,43
A,32,33,46,45
A,36,37,48,47


! Criando as áreas da viga

A,49,50,54,53
A,50,51,55,54
A,51,52,56,55
A,49,52,56,53


! Keypoints para criar a linha

K, ,BV/2,HGV+AV1+AH/2,VE+AL,
NPLOT

LSTR,     57,     130

ALLSEL,ALL
GPLOT


! Tipo de elemento

!*
ET,1,BEAM188
!*
ET,2,SHELL181
!*
ET,3,SHELL181
!*
ET,4,SHELL181
!*
!*


! Material da viga

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,200000
MPDATA,PRXY,1,,0.3
```

```
!*
/PREP7
TB,MISO,1,1,5,0
TBTEMP,0
TBPT,,ey1,fy1
!TBPT,,3*ey1,fy1
TBPT,,10*ey1,1.01*fy1
TBPT,,100*ey1,fu1

! material da garra
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,200000
MPDATA,PRXY,2,,0.3

!*
/PREP7
TB,MISO,2,1,5,0
TBTEMP,0
TBPT,,ey2,fy2
!TBPT,,3*ey2,fy2
TBPT,,10*ey2,1.01*fy2
TBPT,,100*ey2,fu2


! Material da coluna

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,,200000
MPDATA,PRXY,3,,0.3

!*
/PREP7
TB,MISO,3,1,5,0
TBTEMP,0
TBPT,,ey3,fy3
!TBPT,,3*ey3,fy3
TBPT,,10*ey3,1.01*fy3
TBPT,,100*ey3,fu3


! Seção do elemento de viga

SECTYPE,   1, BEAM, HREC, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,120,50,2,2,2,2,0,0,0,0,0,0


! Seção da viga

sect,2,shell,,
secdata, 2,1,0.0,3
secoffset,MID
seccontrol,,,, , , ,


! Seção da garra
```

```
sect,3,shell,,
secdata, 3.3,2,0,3
secoffset,MID
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1


! Seção da coluna

sect,4,shell,,
secdata, 2.5,3,0,3
secoffset,MID
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1


! Colando as áreas da garra e viga

AGLUE,4,8,9,10,11,12,13,14,15


! Propriedades da viga

FLST,5,4,5,ORDE,2
FITEM,5,12
FITEM,5,-15
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT,       1, ,   2,       0,   2
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*


! Propriedades da garra

FLST,5,6,5,ORDE,4
FITEM,5,9
FITEM,5,-11
FITEM,5,16
FITEM,5,-18
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT,       2, ,   3,       0,   3
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
```

```
! Propriedades da coluna

FLST,5,7,5,ORDE,5
FITEM,5,1
FITEM,5,-3
FITEM,5,5
FITEM,5,-7
FITEM,5,28
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT,       3, ,   4,       0,   4
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*


! Malha

AESIZE,ALL,8,
MSHKEY,0
FLST,5,17,5,ORDE,7
FITEM,5,1
FITEM,5,-3
FITEM,5,5
FITEM,5,-7
FITEM,5,9
FITEM,5,-18
FITEM,5,28
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*


! Malha do elemento de viga

FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,143
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,10, , , , ,1
!*
```

```
LMESH,     143


! Selecionando os nós da extremidade

NSEL,S,LOC,Z,293,295
NPLOT


! Cerig

FLST,5,45,1,ORDE,12
FITEM,5,2688
FITEM,5,2715
FITEM,5,-2729
FITEM,5,3127
FITEM,5,3154
FITEM,5,-3159
FITEM,5,3331
FITEM,5,3358
FITEM,5,-3371
FITEM,5,3742
FITEM,5,-3747
FITEM,5,5454
/NOPR
CM,_NODECM,NODE
*SET,_z1,    5454
NSEL,S, , ,P51X
NSEL,A, , ,_Z1
CM,_CERGCM,NODE
CMSEL,S,_NODECM
/GO
!*
/NOPR
CMSEL,S,_CERGCM
/GO
CERIG,5454,ALL,ALL, , , ,
/NOPR
CMSEL,S,_NODECM
/GO
!*

ALLSEL,ALL


! Inserindo os apoios

NSEL,S,LOC,Y,-1,1
D,ALL, , , , , ,ALL, , , , ,
NSEL,S,LOC,Y,CC-1,CC+1
D,ALL, , , , , ,ALL, , , , ,
ALLSEL,ALL
EPLOT


! Selecionando as linhas dos furos

!LPLOT
```

```
!FLST,5,6,4,ORDE,6
!FITEM,5,62
!FITEM,5,70
!FITEM,5,78
!FITEM,5,106
!FITEM,5,110
!FITEM,5,114
!LSEL,S, , ,P51X
!LPLOT


! Selecionando os nós das linhas

!NSLL,S,1
!NPLOT


! Acoplando os nós

CP,1,UX,2657,4457
CP,2,UY,2657,4457
CP,3,UZ,2657,4457

CP,4,UZ,2659,4465

CP,5,UZ,2660,4464

CP,6,UZ,2661,4463

CP,7,UZ,2658,4462

CP,8,UX,2642,4421
CP,9,UY,2642,4421
CP,10,UZ,2642,4421

CP,11,UZ,2644,4429

CP,12,UZ,2645,4428

CP,13,UZ,2646,4427

CP,14,UZ,2643,4426

CP,15,UX,2627,4385
CP,16,UY,2627,4385
CP,17,UZ,2627,4385

CP,18,UZ,2629,4393

CP,19,UZ,2630,4392

CP,20,UZ,2631,4391

CP,21,UZ,2628,4390


! Acoplando os nós coincidentes
```

```
!CPINTF,ALL,1,
!ALLSEL,ALL

! Inserindo o deslocamento na extremidade da viga

FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5463
!*
/GO
D,P51X, ,-149, , , ,UY, , , , ,


! Restrição em x no nó do deslocamento

FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5463
!*
/GO
D,P51X, , , , , ,UX, , , , ,


! Criando componentes para o elemento de contato


! Selecionando os nós das áreas

FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,16
FITEM,5,-17
ASEL,S, , ,P51X
NSLA,S,1
NPLOT
CM,contact,NODE
ALLSEL,ALL
EPLOT

ASEL,S, , ,       1
APLOT
NSLA,S,1
NPLOT
CM,target,NODE
CMPL
ALLSEL,ALL
EPLOT


! Criando o elemento de contato

/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,3,0.3
MAT,3
```

```
R,3
REAL,3
ET,5,170
ET,6,174
KEYOPT,6,9,0
KEYOPT,6,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the target surface
NSEL,S,,,TARGET
CM,_TARGET,NODE
TYPE,5
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
NSEL,S,,,CONTACT
CM,_CONTACT,NODE
TYPE,6
ESLN,S,0
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,5
ESEL,A,TYPE,,6
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END

ALLSEL,ALL
EPLOT
```

```
! Analyses Type

FINISH
/SOL
!*
CNVTOL,U, ,0.01,2, ,
!*
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,50,0,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
TIME,1

ALLSEL,ALL
SAVE
```