

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

**ANÁLISE DE LIGAÇÕES DE SISTEMAS DE ARMAZENAGEM
INDUSTRIAL TIPO PORTA-PALLETS**

AUTOR: SÉRGIO ALVES DE MIRANDA

ORIENTADORA: Prof.(a) Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas

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

Ouro Preto, Dezembro de 2011.

M672a Miranda, Sérgio Alves de.
Análise de ligações de sistemas de armazenagem industrial tipo porta-pallets [manuscrito] / Sérgio Alves de Miranda - 2011.
xiv, 79f.: il. color.; graf.; tab.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Arlene Maria Samanho Freitas.

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

1. Estruturas metálicas - Perfis formados a frio - Teses. 2. Ligações metálicas - Ligação semi-rígida - Teses. 3. Ligação viga-coluna - Teses. 4. Análise numérica - Teses. I. Freitas, Arlene Maria Samanho. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.014.2:624.07

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

ANÁLISE DE LIGAÇÕES DE SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL TIPO PORTA PALLETS

AUTOR: SÉRGIO ALVES DE MIRANDA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 06 de dezembro de 2011, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas (Orientadora / UFOP)



Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas (UFOP)



Prof. Dr. Alexandre Abrahão Cury (UFOP)



Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues (UFMG)

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus pela vida;
- Aos meus pais, Geraldo e Aparecida, pelo amor imensurável e pelo apoio constante. Sem eles não teria chegado aqui;
- Ao meu irmão Vagner, pelos momentos descontraídos que sempre passamos juntos;
- À minha noiva Elizabeth, pelo carinho e apoio;
- Aos meus amigos Guilherme e Sineval, pelo companheirismo e ajuda;
- A todos os colegas de classe e do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UFOP;
- À secretária do PROPEC, Róvia, pela paciência e disposição no atendimento aos alunos;
- À professora Arlene Maria Sarmanho Freitas, pela confiança, orientação e ensinamentos;
- A todos os professores do PROPEC, em especial ao professor Marcílio Freitas, pela atenção aos alunos;
- À empresa Novus Engenharia Ltda, pelos dias liberados do trabalho para dedicação ao desenvolvimento desta dissertação;
- À Universidade Federal de Ouro Preto.

RESUMO

A utilização dos sistemas de armazenagem industrial, conhecidos como racks, em fábricas, centros de distribuição, lojas e outros espaços semelhantes é crescente, devido à sua facilidade de montagem e à adaptabilidade aos espaços e aos produtos armazenados. Estes sistemas são geralmente compostos por perfis de aço formados a frio, sendo suas colunas formadas por seções com geometria especialmente desenvolvida para este fim e com perfurações ao longo de seu comprimento para possibilitar o encaixe das ligações. O tipo de ligação mais utilizado é feito por encaixe entre as vigas e colunas sem parafusos ou solda, através de um sistema projetado para conectar as vigas às perfurações. Devido às perfurações, as normas de dimensionamento de perfis formados a frio não podem ser aplicadas na avaliação destas estruturas, o que levou ao desenvolvimento de prescrições por fabricantes das mesmas. Este trabalho baseia-se nas prescrições do "Rack Manufacturers Institute" (RMI, 2008) para a avaliação de sistemas do tipo Porta Pallets, concentrando-se no comportamento e na rigidez das ligações utilizadas nestas estruturas. O estudo foi desenvolvido por meio do método dos elementos finitos, utilizando o software ANSYS para a simulação do ensaio previsto para o estudo da ligação. Os resultados numéricos foram comparados a resultados experimentais obtidos anteriormente, indicando a viabilidade do modelo numérico na representação do comportamento das ligações. Os modos de colapso do modelo via elementos finitos foram os mesmos observados experimentalmente e a diferença entre a rigidez da ligação obtida numericamente e o resultado experimental ficou abaixo de 10%. A validação do modelo numérico indica sua importância no projeto dos sistemas de armazenagem industrial, pois ele permite a avaliação da geometria e das dimensões das ligações em seu comportamento e rigidez.

ABSTRACT

Industrial storage systems, usually called racks, is often used in factories, warehouses, and other places where storage density is needed due to their easy assemblage and adaptability to available space and to products to be stored in. These systems are generally composed by cold formed steel sections. Their columns are made by sections specially developed to this application and have perforations through their length to fit connections. The connection type more used in these structures is composed by a specially developed system that permit fitting beams to perforations in columns without using bolts or welding. Due to perforations, cold formed design codes may not be applied to analyze and design steel storage structures, so the manufacturers have developed specific rules to guide design procedures. This work is based in prescriptions developed by "Rack Manufacturers Institute" (RMI, 2008) to evaluate Pallet systems, considering mainly connections behavior and stiffness. This work comprehends a Finite Element simulation of an experimental test of connections prescribed by RMI using commercial software ANSYS. Numerical results were compared to experimental results obtained previously, indicating the finite element model suitability for considered connection analysis. The failure modes obtained in numerical model were similar to those observed experimentally, and the difference between connection stiffness obtained numerically and the experimental test results were up to 10%. The Finite Element Model suitability indicates its importance for rack design developments, because it can be important to evaluate the influence of connections geometry and dimensions in their stiffness and behavior.

SUMÁRIO

Capítulo 1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Prescrições existentes.....	2
1.2. Estudos realizados.....	3
1.3. Objetivo e descrição do trabalho.....	7
Capítulo 2. SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL.....	9
2.1. Histórico.....	9
2.2. Tipos de Sistemas.....	10
2.1.1. Sistemas estáticos.....	12
2.1.2. Sistemas dinâmicos.....	12
2.3. Sistema do Tipo <i>porta-pallets</i>	12
2.3.1. Elementos componentes do sistema <i>porta-pallets</i>	14
2.3.1.1. Vigas.....	14
2.3.1.2. Colunas.....	15
2.3.1.3. Contraventamentos.....	16
2.3.1.4. Distanciadores.....	18
2.3.1.5. Placas de base.....	18
2.3.1.6. Ligações viga-coluna.....	19
2.4. Estabilidade do sistema.....	19
2.5. Critérios de operacionalização e segurança.....	20
Capítulo 3. LIGAÇÕES.....	21
3.1. Ligações semi-rígidas.....	21
3.2. Prescrições do RMI para cálculo da rigidez.....	22
3.2.1. Ensaio da viga em balanço (Cantilever Test).....	22
3.2.2. Rigidez da ligação do “Cantilever Test”.....	24
3.3. Apresentação dos resultados experimentais.....	26
3.3.1. Dimensões e propriedades geométricas dos perfis utilizados.....	27

3.3.2. Resultados experimentais.....	29
Capítulo 4. ANÁLISE NUMÉRICA DAS LIGAÇÕES	32
4.1. Descrição dos modelos numéricos	32
4.1.1. Modelagem geométrica.....	33
4.1.2. Propriedades dos materiais utilizados	34
4.1.3. Elementos finitos utilizados	35
4.1.4. Condições de contorno.....	38
4.2. Aplicação do Carregamento.....	39
4.3. Apresentação e análise dos resultados	40
4.3.1. Modelos NC1-42x88, NC1-50x105 e NC1-50x120	40
4.3.2. Modelos: NC2-42x88, NC2-50x105 e NC2-50x120	48
4.3.3. Modelos: NC3-42x88, NC3-50x105 e NC3-50x120	55
Capítulo 5. APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS	63
5.1. Comparação dos resultados experimentais e numéricos.....	63
5.1.1. C1-42x88 (2) x NC1-42x88; C1-50x105 (3) x NC1-50x105; C1-50x120 (2) x NC1-50x120.....	63
5.1.2. C2-42x88 (1) x NC2-42x88; C2-50x105 (1) x NC2-50x105; C2-50x120 (2) x NC2-50x120.....	66
5.1.3. Modelos: C3-42x88 (1) x NC3-42x88; C3-50x105 (1) x NC3-50x105; C3-50x120 (2) x NC3-50x120.....	69
Capítulo 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
Referências bibliográficas	77

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

- Figura 1.1. Sistema de armazenagem do tipo *porta-pallets* (MECALUX, 2011) 1
- Figura 1.2. Ligação viga-coluna utilizando “garras dentadas”: (a) Visão geral (ÁGUIA, 2011); (b) Detalhe da “garra dentada” 2
- Figura 1.3. Componentes do sistema do tipo *drive-in* (ÁGUIA, 2011)..... 4

Capítulo 2

- Figura 2.1. Tipos de seções utilizadas nas colunas dos *racks*: (a) Rack ou garrafa; (b) U enrijecido (CAMPOS, 2003) 10
- Figura 2.2. Tipos de sistema de armazenagem industrial: (a) *Porta-pallets* (MECALUX, 2011); (b) *Flow rack* (BERTOLINI, 2011); (c) *Cantilever* (BERTONILI, 2011)..... 11
- Figura 2.3. Estocagem manual de produtos (ESMENA, 2011)..... 11
- Figura 2.4. Estocagem através de empilhadeira (MECALUX, 2011) 11
- Figura 2.5. Tipos de pallets: (a) de madeira; (b) metálico (RIBEIRO, 2006) 12
- Figura 2.6. Esquema de sistema *porta-pallets* em funcionamento (MECALUX, 2011).13
- Figura 2.7. Vista superior do sistema *porta-pallets* (CAMPOS, 2003)..... 13
- Figura 2.8. Componentes do sistema *porta-pallets*. Vista tridimensional (MECALUX, 2011)..... 14
- Figura 2.9. Seções transversais usuais das vigas do *porta-pallets*. Da esquerda para direita: Seções U, I, Sigma, fechada e semi-aberta (RIBEIRO, 2006) 14
- Figura 2.10. Tipo de configuração de carregamento utilizado no sistema *porta-pallets*. No centro da imagem três pallets por viga e no canto direito dois pallets por viga (ÁGUIA, 2011)..... 15
- Figura 2.11. Tipos de seções utilizadas nas colunas dos *racks* (CAMPOS, 2003) 16
- Figura 2.12. Ligação dos contraventamentos nas colunas: (a) com flanges de ligação da seção tipo rack; (b) com cantoneiras adicionais na seção tipo U enrijecido (RIBEIRO, 2006)..... 16

Figura 2.13. Contraventamentos laterais do sistema <i>porta-pallets</i> (ÁGUIA, 2011)	17
Figura 2.14. Contraventamentos adicionais para o sistema <i>porta-pallets</i> : (a) Contraventamento vertical (ALTAMIRA, 2011); (b) Contraventamento vertical (MECALUX, 2011); (c) Contraventamento horizontal (ALTAMIRA, 2011)	18
Figura 2.15. Distanciadores do sistema <i>porta-pallets</i> (ESMENA, 2011)	18
Figura 2.16. Placa de base mais usada nos sistemas <i>porta-pallets</i> (RIBEIRO, 2006) ...	19

Capítulo 3

Figura 3.1. Configuração do Cantilever Test (RMI, 2008)	23
Figura 3.2. Obtenção par de valores $P_{0,85}$ e $\delta_{0,85}$ através da curva carga x deslocamento com indicação da carga última (P_u) (OLIVEIRA, 2000)	26
Figura 3.3. Nomenclatura adotada para identificação das dimensões da seção tipo <i>rack</i> das colunas	27
Figura 3.4. Sistema de eixos para cálculo das propriedades geométricas: (a) colunas; (b) vigas	29

Capítulo 4

Figura 4.1. Modelo inicial gerado no software AutoCad 2008	33
Figura 4.2. Modelo geométrico finalizado.....	34
Figura 4.3. Elemento de casca <i>Shell 181</i> (Ansys 11.0).....	35
Figura 4.4. Elemento de contato <i>Target 170</i> (Ansys 11.0).....	36
Figura 4.5. Elemento de contato <i>Conta 174</i> (Ansys 11.0).....	36
Figura 4.6. Detalhe do elemento <i>Shell 181</i> aplicado ao modelo numérico	37
Figura 4.7. Elementos <i>Target 170</i> (verde) e <i>Conta 174</i> (marrom), aplicados no contato garra-coluna	37
Figura 4.8. Restrições aplicados aos nós das seções extremas da coluna, simulando os suportes rígidos	38
Figura 4.9. Acoplamento dos nós dos furos da coluna e garra (direita); e na região garra-coluna (esquerda)	39
Figura 4.10. Translação liberada em “z” para obtenção do deslocamento desejado	40
Figura 4.11. Distribuição de tensões (von Mises) para os modelos: (a) NC1-42x88; (b) NC1-50x105; (c) NC1-50x120	42

Figura 4.12. Distribuição de tensões (von Mises) das vigas dos modelos: (a) NC1-42x88; (b) NC1-50x105; (c) NC1-50x120	44
Figura 4.13. Distribuição de tensões nas garras dos modelos: (a) NC1-42x88; (b) NC1-50x105; (c) NC1-50x120	45
Figura 4.14. Distribuição de tensões (von Mises) nas colunas dos modelos: (a) NC1-42x88; (b) NC1-50x105; (c) NC1-50x120	46
Figura 4.15. Curva carga x deslocamento de ligação dos modelos NC1-42x88, NC1-50x105 e NC1-50x120.....	47
Figura 4.16. Distribuição das tensões (von Mises) dos modelos NC2-42x88, NC2-50x105 e NC2-50x120.....	49
Figura 4.17. Distribuição das tensões (von Mises) das vigas dos modelos: NC2-42x88, NC2-50x105 e NC2-50x120.....	51
Figura 4.18. Distribuição de tensões (von Mises) das garras dos modelos: (a) NC2-42x88; (b) NC2-50x105; (c) NC2-50x120	52
Figura 4.19. Distribuição de tensões (von Mises) nas colunas dos modelos: (a) NC2-42x88; (b) NC2-50x105; (c) NC2-50x120	53
Figura 4.20. Curva carga x deslocamento da ligação dos modelos NC2-42x88, NC2-50x105 e NC2-50x120.....	54
Figura 4.21. Distribuição das tensões (von Mises) dos modelos: (a) NC3-42x88; (b) NC3-50x105; (c) NC3-50x120	56
Figura 4.22. Distribuição das tensões (von Mises) para as vigas dos modelos: (a) NC3-42x88; (b) NC3-50x105; (c) NC3-50x120	58
Figura 4.23. Distribuição de tensões (von Mises) para as garras dos modelos: (a) NC3-42x88; (b) NC3-50x105; (c) NC3-50x120	59
Figura 4.24. Distribuição de tensões (von Mises) para as colunas dos modelos: (a) NC3-42x88; (b) NC3-50x105; (c) NC3-50x120	60
Figura 4.25. Curva carga x deslocamento da ligação dos modelos NC3-42x88, NC3-50x105 e NC3-50x120.....	61

Capítulo 5

Figura 5.1. Deslocamento final dos modelos: (a) experimental (C1-42x88) (2); (b) numérico (NC1-42x88), após análises concluídas.....	64
--	----

Figura 5.2. Detalhe da abertura (“S”) da parte superior da garra da ligação viga-coluna dos modelos: (a) experimental (abertura típica dos três modelos); (b) NC1-42x88; (c) NC1-50x105; (d) NC1-50x120.....	64
Figura 5.3. Curva carga-deslocamento dos modelos numéricos x experimentais relativos à coluna “C1”	65
Figura 5.4. Deslocamentos finais dos modelos: (a) experimental (comportamento típico dos três modelos); (b) numérico (comportamento típico dos três modelos), após simulações realizadas.....	66
Figura 5.5. Detalhe da abertura (“S”) da parte superior da garra da ligação viga-coluna dos modelos: (a) experimental (abertura típica dos três modelos); (b) NC2-42x88; (c) NC2-50x105; (d) NC2-50x120.....	67
Figura 5.6. Curva carga-deslocamento dos modelos numéricos x experimentais relativos à coluna “C2”	68
Figura 5.7. Deslocamentos finais dos modelos: (a) experimental (comportamento típico dos dois modelos); (b) numérico (comportamento típico dos dois modelos), após simulações realizadas.....	69
Figura 5.8. Detalhe da abertura (“S”) da parte superior da garra da ligação viga-coluna dos modelos: (a) experimental (abertura típica dos três modelos); (b) NC3-42x88; (c) NC3-50x105; (d) NC3-50x120.....	70
Figura 5.9. Curva carga-deslocamento dos modelos numéricos x experimentais relativos à coluna “C3”	71
Figura 5.10. Gráfico “ $F/R_F \times L_b$ ”. Comprimento máximo permitido para a viga da ligação dos modelos da coluna “C1”	73
Figura 5.11. Gráfico “ $F/R_F \times L_b$ ”. Comprimento máximo permitido para a viga da ligação dos modelos da coluna “C2”	73
Figura 5.12. Gráfico “ $F/R_F \times L_b$ ”. Comprimento máximo permitido para a viga da ligação dos modelos da coluna “C3”	74

LISTA DE TABELAS

Capítulo 3

Tabela 3.1. Dimensões nominais das seções das colunas tipo C1, C2 e C3.....	28
Tabela 3.2. Nomenclatura adotada para as configurações dos modelos experimentais.	28
Tabela 3.3. Valores das inércias calculadas para determinação da rigidez da ligação ...	29
Tabela 3.4. Resultados experimentais do “Cantilever Test” (Freitas e Silva, 2007).....	30
Tabela 3.5. Modelos selecionados para serem utilizados na análise numérica descrita no capítulo 4.....	31

Capítulo 4

Tabela 4.1. Nomenclatura dos modelos numéricos	32
Tabela 4.2. Principais dimensões das colunas, vigas e garras constituintes dos modelos numéricos.....	33
Tabela 4.3. Propriedades gerais do material utilizado nos modelos e o tipo de aço das colunas, vigas e garra.....	34
Tabela 4.4. Deslocamentos máximos controlados e cargas últimas encontradas.....	41
Tabela 4.5. Rigidezes encontradas para três modelos da coluna “C1” através da equação (3.3).....	47
Tabela 4.6. Deslocamentos máximos liberados e cargas últimas encontradas.....	48
Tabela 4.7. Rigidezes encontradas para três modelos da coluna “C2” através da equação (3.3).....	54
Tabela 4.8. Deslocamentos máximos liberados e cargas últimas encontradas.....	55
Tabela 4.9. Rigidezes encontradas para três modelos da coluna “C3” através da equação (3.3).....	61
Tabela 4.10. Resultados modelos das ligações viga-coluna analisadas numericamente neste capítulo	62

Capítulo 5

Tabela 5.1. Comparação dos principais valores encontrados através das prescrições do RMI para os modelos experimentais e numéricos referentes à coluna “C1”	65
Tabela 5.2. Comparação dos principais valores encontrados através das prescrições do RMI para os modelos experimentais e numéricos referentes à coluna “C2”	68
Tabela 5.3. Comparação dos principais valores encontrados através das prescrições do RMI para os modelos experimentais e numéricos referentes à coluna “C3”	71
Tabela 5.4. Comparação das rigidezes encontradas para os modelos experimentais e numéricos segundo RMI.....	72

LISTA DE SÍMBOLOS

Capítulo 2

P = Força axial;

Δ = deslocamento lateral;

P = carga aplicada na extremidade da viga;

L_b = comprimento do braço de alavanca da viga;

L_c = comprimento da coluna;

θ = rotação;

M = momento da ligação;

F = rigidez da ligação;

$P_{0,85}$ = carga referente a 85% da carga última;

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

Capítulo 4

E = módulo da elasticidade;

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. = fator de redução para garantir segurança quanto à dispersão dos resultados dos testes;

k = rigidez da ligação;

P_u = carga última;

ν = coeficiente de Poisson;

F_y = tensão de escoamento;

F_u = tensão de ruptura à tração.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Os sistemas de armazenagem industrial são utilizados para estocagem e distribuição de materiais. Denominados também por *racks*, esses sistemas são frequentemente empregados em grandes centros comerciais de distribuição de produtos, além de fábricas, supermercados, almoxarifados, entre outros. Os *racks* vêm adquirindo espaço no mercado brasileiro devido à sua praticidade na montagem e desmontagem, além de oferecer diversas opções de acordo com as características de cada cliente. A Figura 1.1 apresenta um exemplo desse tipo de sistema.



FIGURA 1.1 - Sistema de armazenagem do tipo *porta-pallets* (MECALUX, 2011).

Os *racks* são constituídos por perfis formados a frio e sua principal característica são as perfurações ao longo de sua coluna, o que dispensa a necessidade de ligações parafusadas por apresentar “garras dentadas” nas extremidades de suas vigas (FIGURA 1.2) que se encaixam nas colunas. As ligações dos *racks* são consideradas semi-rígidas, com base em estudos anteriores. As ligações semi-rígidas são aquelas intermediárias

entre as flexíveis e as rígidas. As ligações flexíveis permitem a rotação de seus componentes, e as rígidas não possibilitam qualquer tipo de movimento, ou seja, a rotação é nula. As seções transversais mais utilizadas nos *racks* são: U enrijecido, caixa e a seção tipo rack (ou garrafa). Esta última desenvolvida especialmente para esse tipo de sistema, facilitando a conexão dos contraventamentos e aumentando a resistência da coluna à torção.

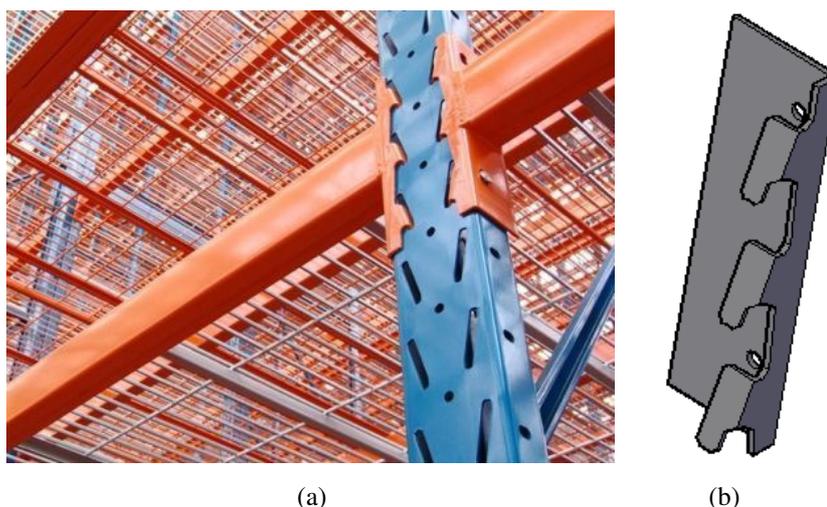


FIGURA 1.2 - Ligação viga-coluna utilizando "garras dentadas". (a) Visão Geral (ÁGUIA, 2011); (b) Detalhe da "garra dentada".

Devido a tais perfurações e à alta esbelteza de seus elementos, o comportamento estrutural dos *racks* se torna um fator de grande importância em sua análise global, sendo a resistência teórica da coluna de difícil mensuração. Por isso, estudos experimentais são prescritos pelas normas para a avaliação da sua capacidade de carga e também das ligações semi-rígidas. Para se analisar a estabilidade dos *racks*, deve-se avaliar a influência da semi-rigidez das ligações (viga-coluna e coluna-placa de base) e o uso de contraventamentos. As imperfeições geométricas, as folgas nas ligações e os impactos de empilhadeiras nas operações também afetam a estabilidade desses sistemas.

1.1. Prescrições existentes

Por não se enquadrarem nas normas existentes devido às suas particularidades, como furos, carregamentos, etc., os fabricantes dos *racks* desenvolveram estudos

visando à elaboração de prescrições específicas para esses sistemas de armazenagem. As prescrições mais importantes são listadas a seguir.

Na Austrália, os *racks* são avaliados pela *Australian Steel Storage Racking Standard AS 4084* (1993), baseada principalmente no *Rack Manufacturers Institute, RMI* (2008), exceto para a combinação de cargas, tolerâncias e folgas que são descritas a partir da *Federation Européenne de La Manutention (FEM, 2000)*.

Na Europa, a prescrição aplicada é a FEM (2000), juntamente à EUROCODE 3 (2005).

Na Inglaterra, é utilizada a norma *Storage Equipment Manufacturers Association (SEMA, 1980)*, em conjunto com a norma britânica BS-499 (1969 e 1975).

Nos Estados Unidos, é empregada a RMI, junto às prescrições do *American Iron and Steel Institute (AISI, 2007)*.

Em 1997, no Brasil, fabricantes e fornecedoras de equipamentos e serviços para a área de logística fundaram a Associação Brasileira de Movimentação e Logística (ABML). Publicaram um Manual de Especificação para projeto, testes e utilização de Sistemas de armazenagem (2002), baseado no RMI (1997) e no AISI (1996), embora cada fabricante tenha sua maneira particular para fabricar os elementos constituintes desses sistemas. Em 2007, da parceria da ABML e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), foi criada a NBR 15524: Sistema de armazenagem - Diretrizes para o uso de estruturas tipo *porta-pallets* seletivos, que orienta o projeto, o cálculo, a montagem e a utilização dessas estruturas.

1.2. Estudos realizados

Baseados nas prescrições existentes, pesquisadores vêm desenvolvendo estudos a fim de melhorar os procedimentos de dimensionamento dos sistemas de armazenagem industrial (*racks*). A seguir, tem-se um breve descritivo dos principais artigos no assunto.

Godley (1991) apresentou os principais tipos de *racks* e seu histórico de evolução, dando destaque às alterações sofridas pelas seções das colunas e pelos encaixes das ligações. Criou também um roteiro para o dimensionamento das colunas,

vigas e a avaliação da estabilidade global baseado nas especificações da SEMA e do FEM.

Oliveira (2000) estudou os sistemas de armazenagem industrial, ressaltando o sistema do tipo *drive-in*. Tal sistema é indicado para o armazenamento de produtos não perecíveis e com baixa variedade de itens. Possui poucos corredores em função de utilizar vários paletes ao longo da profundidade do sistema. Possui apenas uma face de operação. Os paletes são armazenados em trilhos, também denominados de vigas de túnel, que são ligados a vigas curtas em balanço, chamadas de braços. Os braços possibilitam um túnel para o acesso de empilhadeiras no interior do sistema (FIGURA 1.3). Realizou ensaios experimentais para avaliar os valores de rigidez das ligações longarina-coluna e braço-coluna, além da influência dos furos na capacidade de carga das colunas. Os valores encontrados por meio de cálculos prescritos pelo RMI (1997) apresentaram boa correlação com os valores experimentais para a carga última das colunas. Quanto aos valores de rigidez das ligações, os resultados encontrados pelos diversos métodos mostraram-se semelhantes.

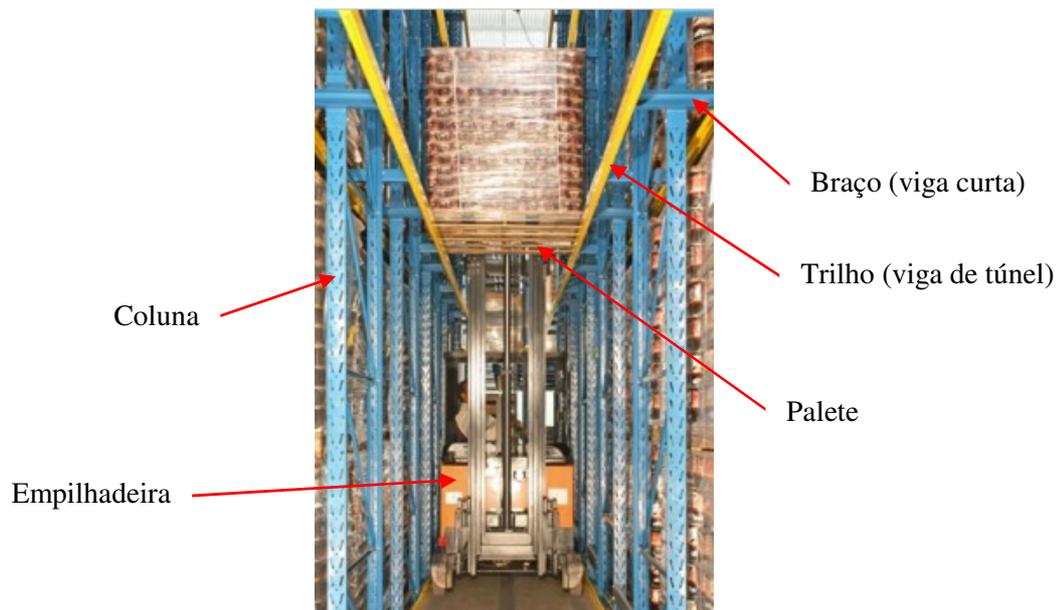


FIGURA 1.3 - Componentes do sistema do tipo *drive-in* (ÁGUIA, 2011).

Harris e Hancock (2002) estudaram a estabilidade de *racks* do tipo *porta-pallets* por meio de um programa experimental para verificar a influência da rigidez das ligações considerando que o ensaio da viga em balanço, prescrito para avaliar as

ligações, apresenta resultados controversos. Segundo os autores, as ligações perdem rigidez durante o carregamento da estrutura, alterando o seu comportamento.

Sarawit e Pekoz (2003) analisaram o comportamento dos sistemas de armazenagem industrial do tipo *porta-pallets* por meio de verificações numéricas dos componentes dos *racks* e visando a uma melhoria das prescrições de dimensionamento. Primeiramente, analisaram as placas de base e concluíram que o modelo atual é muito conservador, propondo uma nova equação para o dimensionamento. Avaliaram também os ensaios propostos pelo RMI das ligações entre vigas e colunas e concluíram que, para esforço cortante (cisalhamento), os ensaios não são apropriados para verificar esse efeito. Em seguida, simularam um pórtico prescrito pelo RMI para avaliar seu comportamento global. Para isso, foram empregados elementos de casca e de viga, comparando a influência dos modos local e distorcional da coluna na resistência do rack como um todo. Concluíram que o valor de rigidez da ligação e a modelagem da base influenciam diretamente no comportamento dos racks.

Campos (2003) realizou uma análise numérico-experimental do sistema do tipo *drive-in*. Por meio do método dos elementos finitos, o sistema foi simulado, e a influência dos efeitos de segunda ordem no comportamento da estrutura foi observada. Foi feita também a análise experimental da placa de base, com a determinação do valor de sua rigidez e, com a introdução desse dado no modelo numérico, foi realizada a avaliação de sua influência no comportamento global do sistema. A autora concluiu que a análise não linear para os sistemas *drive-in* é mais adequada em função da não linearidade do comportamento da estrutura; a análise tridimensional é recomendada devido à interação entre os elementos da estrutura; e o momento fletor obtido com os resultados experimentais é mais elevado do que em resultados numéricos.

Teh *et al* (2004) compararam as simulações 2D e 3D dos sistemas de armazenagem do tipo *porta-pallets*. A simulação 2D que é comum nas análises e dimensionamentos, segundo os autores, não é eficaz para avaliar o comportamento estrutural do sistema. A simulação 3D, por sua vez, consegue captar as interações entre os diversos modos existentes. Concluíram também que os *softwares* comerciais que não conseguem captar o empenamento devido à torção nas vigas dos racks são inadequados.

Souza (2005) fez um estudo teórico-experimental do sistema *drive-in*, com uma análise de seu comportamento global e com a avaliação da interação entre seus diversos

componentes. Os resultados experimentais foram comparados com os numéricos, que consideraram parâmetros como a influência da fixação da base e rigidez das ligações entre a longarina e a coluna e entre o braço e a coluna. Após as análises, o pesquisador concluiu principalmente que as perfurações, as imperfeições geométricas e o encruamento dos materiais afetam consideravelmente o comportamento das colunas.

Aguirre (2005) realizou uma análise experimental das ligações com garras dentadas submetidas a cargas cíclicas. Percebeu que somente após os ganchos externos das garras escoarem, o modo de colapso se inicia, e essa plastificação progride em direção à linha neutra da viga. Em seguida, concluiu que nos projetos deve-se usar obrigatoriamente ligações semi-rígidas, sendo a ligação considerada rígida não conservadora.

Sarawit e Pekoz (2006) compararam o método do comprimento efetivo (utilizado pelo RMI) com o Método da Carga Nominal (utilizado no AISC), simulando, por meio de elementos finitos, diversos perfis formados a frio dos sistemas de armazenagem industrial. Eles chegaram à conclusão que o método do comprimento efetivo é mais conservador que o da carga nominal, embora concorde melhor com os resultados dos elementos finitos.

Ribeiro (2006) realizou uma análise experimental em colunas curtas com seção tipo *rack* de diferentes espessuras, com e sem furos, de modo a avaliar a influência das perfurações na capacidade de carga e nas deformações sofridas durante os ensaios. A autora concluiu, principalmente, que a capacidade de carga das colunas com e sem furos sofre significativa redução devido às perfurações e que nas regiões próximas às perfurações os níveis de deformações são maiores.

Sajja *et al* (2008) fizeram estudos experimentais e numéricos para avaliar a rigidez ao cisalhamento nos sistemas de armazenagem do tipo *porta-pallets*, uma vez que o RMI utiliza uma fórmula baseada na Teoria de Timoshenko, e a FEM sugere avaliação por meio de ensaios. Estudou-se os efeitos de vários parâmetros como excentricidade nas conexões, flexão nos parafusos e rotações no seu eixo axial. Os autores concluíram que, para obter o valor de rigidez submetido ao cisalhamento puro, é necessário deduzir as deformações devidas às cargas verticais axiais. Observaram por último que o valor de rigidez teórico obtido varia de 1,5 a 3 vezes superior ao valor de rigidez experimental.

Rasmussen e Gilbert (2009) testaram experimentalmente todos os componentes dos sistemas de armazenagem industrial, ou seja, teste da coluna curta, da viga em balanço (ligação viga-coluna), da ligação placa de base, de cisalhamento e de flexão das colunas. Eles esclareceram e explicaram o teste sugerido na European Standard EM 15512 (2009) para medir o valor de rigidez da placa de base. Indicaram também posições para a instalação de transdutores para melhor captação do comportamento das placas de base e propuseram um método alternativo para determinar com precisão o valor de rigidez da ligação, verificando a estabilidade do sistema por meio da EM 15512 (2009).

Freitas *et al* (2010) fizeram uma análise numérica e experimental do sistema de armazenagem industrial do tipo *drive-in*, verificando a influência de cada elemento no comportamento global da estrutura. Modelos de elementos finitos foram desenvolvidos para avaliar o comportamento. Eles concluíram que as ligações e placas de base são os elementos que mais influenciam no comportamento do sistema e que as ligações semi-rígidas são mais adequadas levando os resultados numéricos e experimentais a uma maior proximidade. Apresentaram também uma equação para cálculo da resistência da placa de base.

Rasmussen e Hua (2011) realizaram um programa experimental para determinar o coeficiente de atrito entre vários tipos de paletes de madeira e um palete ferroviário. Outra série de testes também foi realizada para medir o valor de rigidez ao cisalhamento dos paletes de madeira. Os autores obtiveram um coeficiente de atrito estático de 0,44 para os paletes de madeira e suas rigidezes de cisalhamento de 3,9 N/mm e 8,3 N/mm para paletes em condições ruins e boas, respectivamente.

1.3. Objetivo e descrição do trabalho

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento, o mecanismo de falha e a rigidez das ligações viga-coluna dos sistemas de armazenagem industrial do tipo *porta-pallets* por meio de modelos numéricos baseados em elementos finitos. Para tais análises, foi utilizado o *software* comercial *Ansys 11.0*. Os resultados obtidos numericamente são comparados com os modos de falha, com a carga última da ligação e com os valores de rigidez encontrados em testes de laboratório. As comparações dos

resultados numéricos são feitas com os resultados obtidos em um programa experimental realizado por Freitas e Silva (2007), no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Ouro Preto. Em seguida, foram realizadas uma avaliação da prescrição do RMI (2008) para o cálculo dos valores de rigidez das ligações viga-coluna e uma análise da metodologia de determinação dos valores segundo a prescrição citada. Este estudo visa a contribuir no conhecimento do comportamento dessa tipologia de ligação de modo a possibilitar avaliações numéricas mais precisas para a análise e dimensionamento de sistemas estruturais tipo *rack*.

A seguir, é realizada uma descrição do conteúdo de cada capítulo deste trabalho.

No Capítulo 2, são apresentados um histórico de sistema de armazenagem industrial e os tipos de sistema existentes. O sistema de armazenagem tipo *porta-pallets* é detalhado e seus principais componentes são apresentados. Em seguida, são exibidos alguns critérios de segurança e condições de estabilidade para esses sistemas.

As ligações viga-coluna do sistema *porta-pallets* são expostas no capítulo 3 juntamente às prescrições do RMI para cálculo de sua rigidez. Os valores de rigidez das ligações obtidos experimentalmente por Freitas e Silva (2007) também são mostrados.

No capítulo 4, é descrita a análise numérica realizada, os modelos numéricos, o método do controle de deslocamentos utilizado na simulação e, por último, os resultados numéricos encontrados são apresentados e analisados.

No capítulo 5, os resultados experimentais e numéricos são comparados e analisados. Algumas sugestões e restrições quanto à equação prescrita pelo RMI (2008) também são apresentadas.

Finalmente, no capítulo 6, são descritas as conclusões deste trabalho e algumas sugestões para estudos futuros.

Capítulo 2

SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL

Uma breve descrição do histórico dos sistemas de armazenagem industrial é realizada neste capítulo, além de apresentar seus principais tipos (estáticos e dinâmicos), detalhar o funcionamento e descrever os componentes do sistema *porta-pallets*, avaliar sua estabilidade e indicar os parâmetros que garantem a segurança durante sua operação.

2.1. Histórico

Os sistemas de armazenagem industrial surgiram em 1930, segundo Godley (1991). Eram compostos por cantoneiras de aço de perfis formados a frio (nas colunas) e apresentavam perfurações ao longo de seu comprimento. Os projetistas da época utilizavam ligações parafusadas nesses sistemas por ter um número variado de configurações possíveis.

As cantoneiras usadas no sistema possuíam baixa resistência à torção e, para garantir a estabilidade do conjunto, eram necessários muitos contraventamentos. Por esse motivo e pelo elevado custo dos parafusos associado à dificuldade na execução das ligações, foram desenvolvidas “garras dentadas” nas extremidades das vigas e os furos nas colunas foram restringidos. Com isso, a montagem se tornou mais fácil e rápida. Para resolver o problema da resistência à torção as cantoneiras foram substituídas por perfis do tipo “U enrijecido”. Com o passar do tempo, verificou-se que essas seções dificultavam a instalação de contraventamentos; por isso, foram criadas seções específicas, como a seção do tipo rack ou garrafa (FIGURA 2.1), cujos flanges facilitavam a fixação dos contraventamentos.

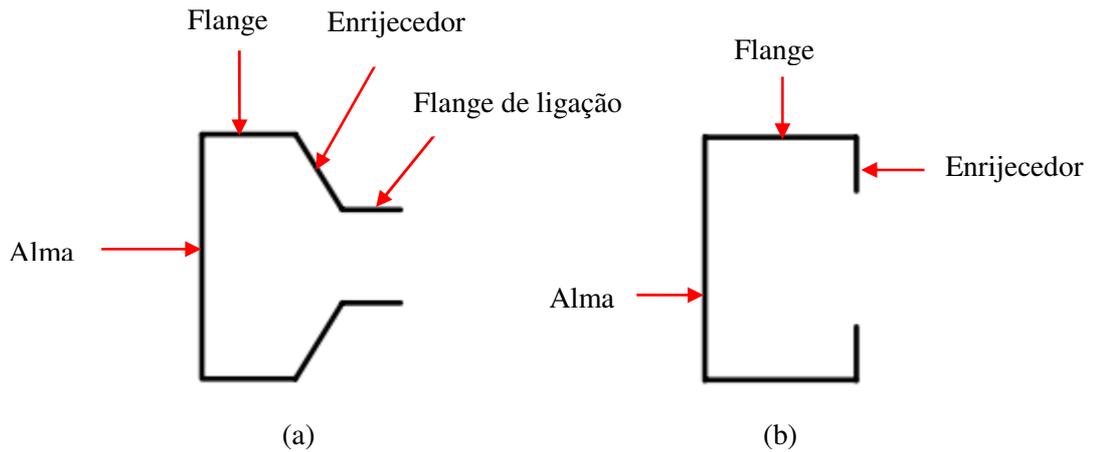


FIGURA 2.1 - Tipos de seções utilizadas nas colunas dos *racks*: (a) rack ou garrafa; (b) U enrijecido (CAMPOS, 2003).

Atualmente, existem diversas empresas no Brasil que fabricam esse tipo de sistema, podendo-se citar: Águia Sistemas de Armazenagem Ltda; Altamira Indústria Metalúrgica Ltda; Bertolini S/A - Sistemas de Armazenagem; Esmena do Brasil S.A; Fiel S/A Móveis e Equipamentos Industriais; Isma S/A Indústria Silveira de Móveis de Aço e Mecalux S.A. Todas essas empresas são associadas à Associação Brasileira de Movimentação e Logística (ABML), fundada em abril de 1997, com o objetivo de aumentar a representatividade do setor no mercado brasileiro.

2.2. Tipos de Sistemas

De acordo com o espaço disponível e o tipo dos produtos a serem armazenados, diversos *racks* podem ser utilizados (FIGURA 2.2). Para definir qual empregar, deve-se estudar a densidade de armazenagem dos produtos, garantindo-lhes sempre uma boa acessibilidade. O que diferencia os sistemas é a altura entre as vigas, sua profundidade, o modo de armazenamento, etc.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 2.2 – Tipos de sistema de armazenagem industrial: (a) *Porta-pallets* (MECALUX, 2011); (b) *Flow rack* (BERTOLINI, 2011); (c) *Cantilever* (BERTOLINI, 2011).

Os produtos podem ser “estocados” manualmente ou por meio de empilhadeiras (FIGURAS 2.3 e 2.4) e dispostos sobre chapas metálicas ou sobre um gradil. Este último, metálico ou de madeira, é chamado de palete (FIGURA 2.5).



FIGURA 2.3 - Estocagem manual de produtos, (ESMENA, 2011).



FIGURA 2.4 - Estocagem através de Empilhadeira (MECALUX, 2011).



FIGURA 2.5 – Tipos de Paletes: (a) de madeira; (b) metálico (RIBEIRO, 2006).

2.1.1. *Sistemas estáticos*

Nos sistemas estáticos, as empilhadeiras são responsáveis pela movimentação individual dos paletes na estrutura, ou seja, no carregamento e no descarregamento. Os produtos estocados não se locomovem de forma automatizada e são indicados para *racks* em que a rotatividade dos produtos é pequena. Entre os sistemas estáticos podemos citar: *porta-pallets*, *drive-in*, *drive-through* e *cantilever* (RIBEIRO, 2006).

2.1.2. *Sistemas dinâmicos*

Os sistemas dinâmicos são indicados para locais onde é necessária a alta rotatividade dos produtos estocados. Esse tipo de sistema de armazenagem apresenta grande acessibilidade aos produtos porque existem “rolos” que fazem a movimentação dos paletes, por gravidade, sendo necessários apenas dois corredores de acesso para as empilhadeiras: o primeiro para carregamento e o segundo para descarregamento. Como exemplo, é possível destacar o *flow-rack* e o *push-back* (RIBEIRO, 2006).

O estudo deste trabalho será de sistemas estáticos tipo *porta-pallets*, sendo que no item 2.3 é apresentado seu princípio de funcionamento e componentes.

2.3. Sistema do tipo *porta-pallets*

O sistema *porta-pallets* convencional mostrado na Figura 2.6 é o mais usado em distribuidoras de produtos (depósitos), destacando-se pelo acesso direto e unitário a cada palete estocado. Nele, o carregamento e o descarregamento são feitos por meio de

empilhadeiras, que transladam em corredores específicos garantindo a movimentação das cargas com o mínimo de operações possíveis.

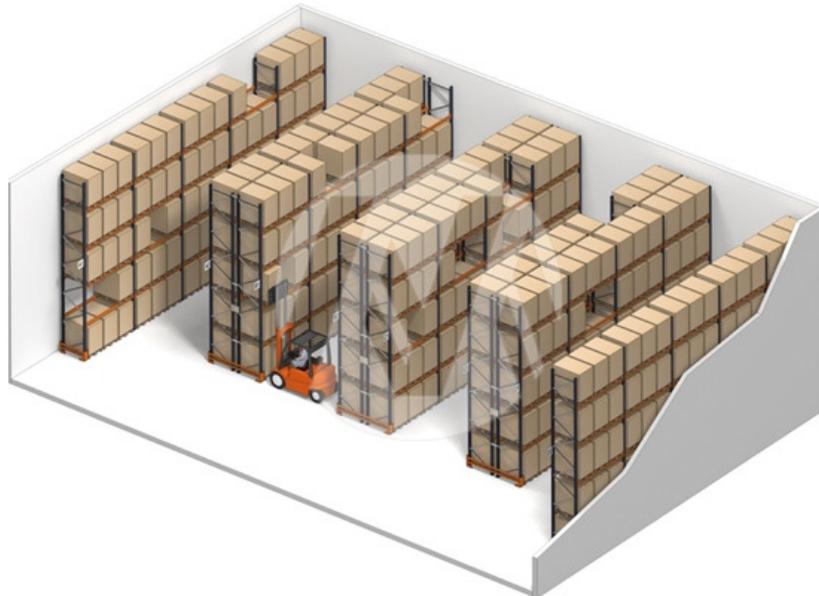


FIGURA 2.6 - Esquema de um sistema *porta-pallets* em funcionamento (MECALUX, 2011).

A altura desse sistema é determinada pelo alcance do equipamento que movimenta as cargas. No tipo convencional, as empilhadeiras alcançam uma altura média de 6m. A desvantagem desse sistema é a necessidade dos corredores de acesso, o que diminui o volume de produtos estocados.

Na Figura 2.7, é mostrada uma vista superior do sistema, indicando seus corredores de acesso. Na Figura 2.8, é exibida uma imagem tridimensional do sistema indicando seus principais componentes.

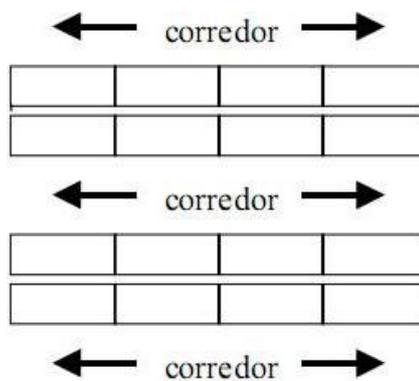


FIGURA 2.7 - Vista superior do sistema *porta-pallets* (CAMPOS, 2003).

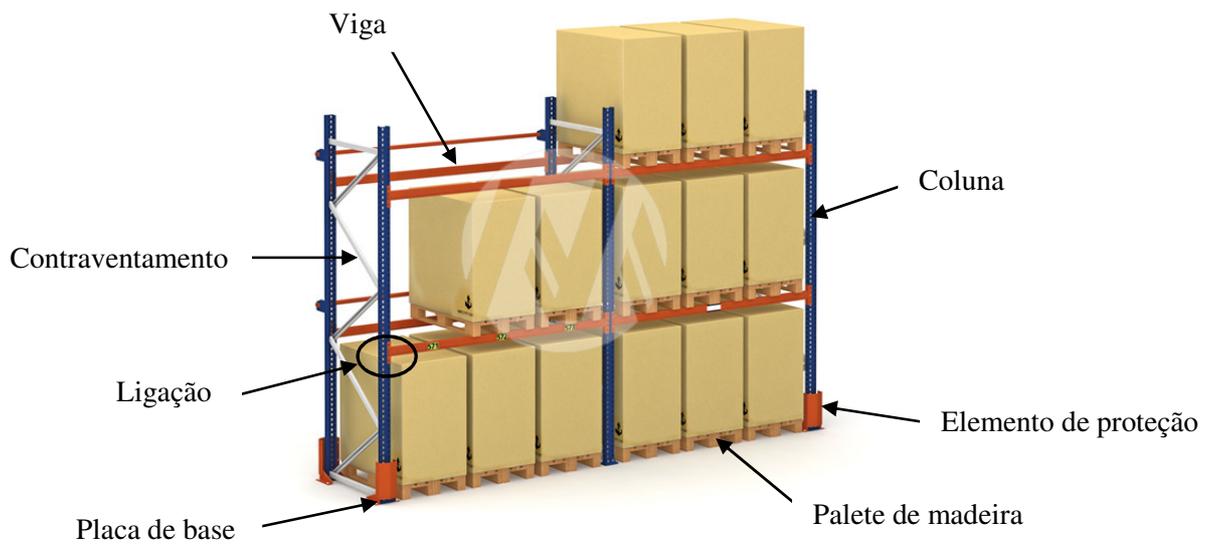


FIGURA 2.8 - Componentes do sistema *porta-pallets*. Vista tridimensional (MECALUX, 2011).

2.3.1. Elementos componentes do sistema *porta-pallets*

A seguir, tem-se uma descrição dos principais componentes do sistema *porta-pallets*, a saber: vigas, colunas, contraventamentos, distanciadores, placa de base e ligações viga-coluna.

2.3.1.1. Vigas

As vigas têm a finalidade de receber o carregamento dos pallets e transmiti-lo às colunas e bases por meio das ligações (OLIVEIRA, 2000).

A Figura 2.9 apresenta as seções mais usuais (abertas e fechadas) para as vigas do sistema *porta-pallets*.

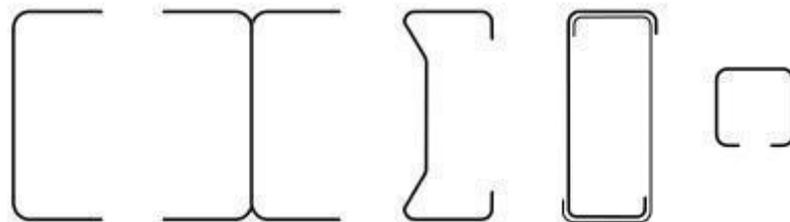


FIGURA 2.9 – Seções transversais usuais das vigas do *porta-pallets*. Da esquerda para direita: seções U, I, sigma, fechada e semi-aberta (Ue) (RIBEIRO, 2006).

As seções abertas são mais econômicas, e sua fabricação por meio da conformação a frio é mais fácil em relação às seções fechadas, embora aquelas apresentem menor estabilidade. Para o carregamento do sistema porta-pallets, são utilizados geralmente dois paletes por viga, embora tal configuração possa ser alterada em função da necessidade do cliente chegando a três paletes por viga (FIGURA 2.10).



FIGURA 2.10 – Tipo de configuração de carregamento utilizado no sistema *porta-pallets*. No centro da imagem três paletes por viga e no canto direito dois paletes por viga (ÁGUIA, 2011).

2.3.1.2. Colunas

Neste sistema, o tipo da seção transversal da coluna a ser utilizada depende do fabricante da estrutura. Cada fabricante apresenta uma quantidade e sequência de furos próprios ao longo da coluna, que facilitam a ligação com as vigas e contraventamentos e o encaixe do pino de segurança. As seções comumente usadas nesses sistemas são as abertas do tipo U enrijecido e rack (ou garrafa), conforme a Figura 2.11. As seções do tipo rack são mais vantajosas que as do tipo U enrijecido por apresentarem “flanges de ligação” para a conexão dos contraventamentos, tornando a montagem do sistema mais rápida e econômica. A Figura 2.12 mostra como é feita a ligação dos contraventamentos nas seções do tipo rack e U enrijecido.

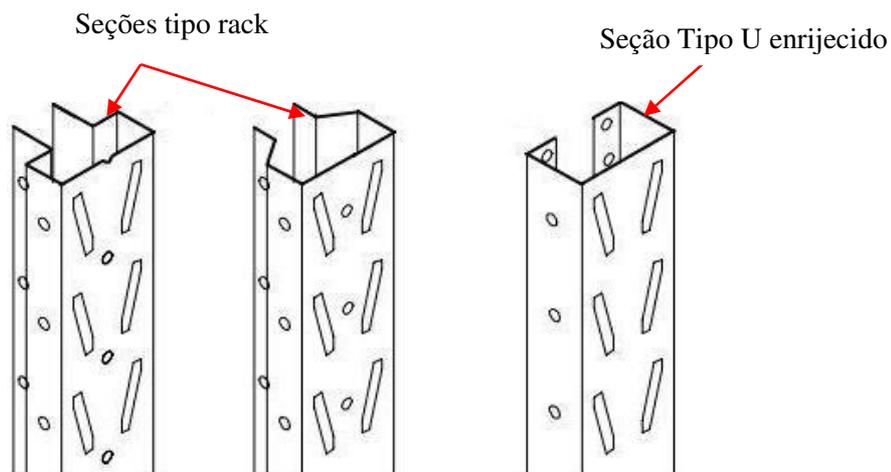


FIGURA 2.11 - Tipos de seções utilizadas nas colunas dos racks (CAMPOS, 2003).

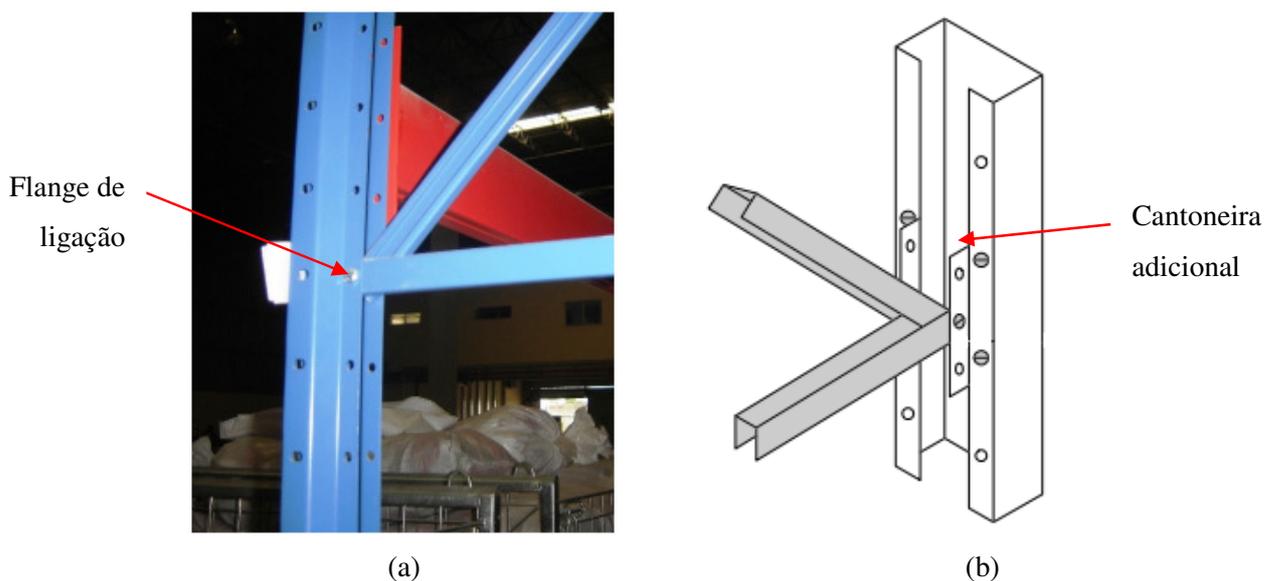


FIGURA 2.12 – Ligação dos contraventamentos nas colunas: (a) com flanges de ligação da seção tipo rack; (b) com cantoneiras adicionais na seção tipo U enrijecido (RIBEIRO, 2006).

2.3.1.3. Contraventamentos

Os contraventamentos são peças estruturais que garantem a estabilidade do sistema, tendo seções do tipo cantoneira e U enrijecido. No sistema de armazenagem do tipo *porta-pallets*, os contraventamentos são fixados em suas faces laterais (FIGURA 2.13).

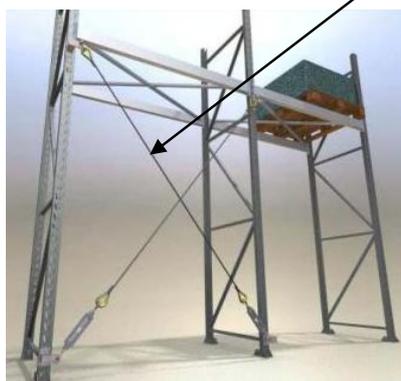
Contraventamento
Lateral (face
lateral)



FIGURA 2.13 - Contraventamentos laterais do sistema *porta-pallets* (ÁGUIA, 2011).

Dependendo da necessidade, é possível também inserir contraventamentos verticais de fundo no sistema (FIGURAS 2.14 (a) e 2.14 (b)) e também contraventamentos horizontais internos aos planos de carga (FIGURA 2.14(c)). O primeiro tem a desvantagem da perda de acessibilidade aos produtos por um dos lados dos racks; e o segundo, pelo aumento do custo e tempo na montagem da estrutura.

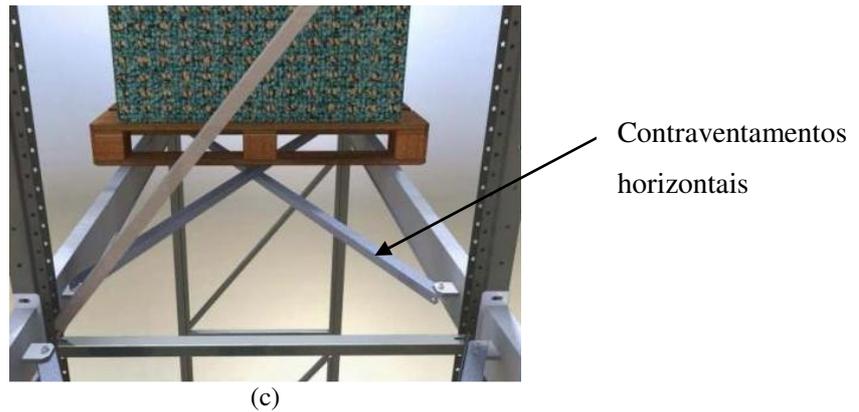
Contraventamentos verticais



(a)



(b)



(c)
 FIGURA 2.14 – Contraventamentos adicionais para o sistema *porta-pallets*: (a) Contraventamento vertical (ALTAMIRA, 2011); (b) Contraventamento vertical (MECALUX, 2011); (c) Contraventamento horizontal (ALTAMIRA, 2011).

2.3.1.4. Distanciadores

Os distanciadores são peças com a função de interligar as colunas adjacentes e estão posicionados na face lateral do sistema, no mesmo plano dos contraventamentos, entre colunas. Os distanciadores são geralmente compostos por seções do tipo U simples. A Figura 2.15 ilustra esses elementos.

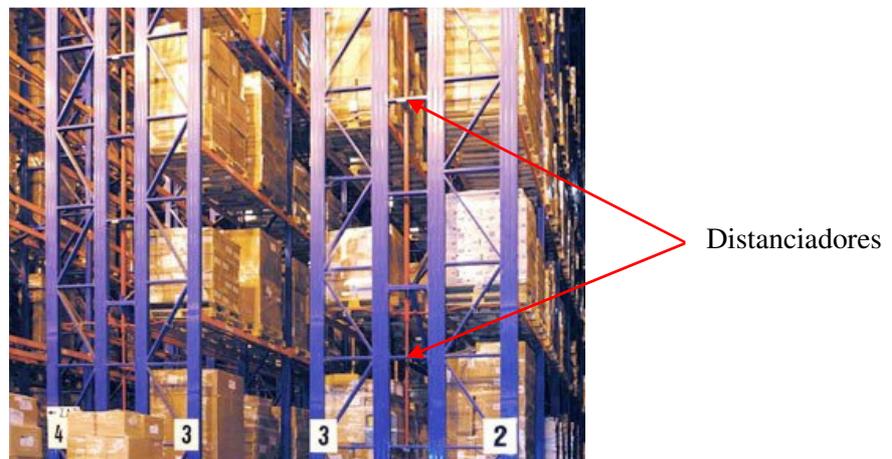


FIGURA 2.15 - Distanciadores do sistema *porta-pallets* (ESMENA, 2011).

2.3.1.5. Placas de base

As placas de base têm por função fixar as colunas e distribuir a carga que transmitem ao piso de apoio (ALTAMIRA, 2011). São compostas por chapas finas e

fixadas no piso por meio de parafusos (FIGURA 2.16). O nivelamento do piso é de suma importância para que as imperfeições geométricas não apareçam na estrutura. Caso sejam detectados desníveis elevados no piso, devem ser acrescentadas placas niveladoras.

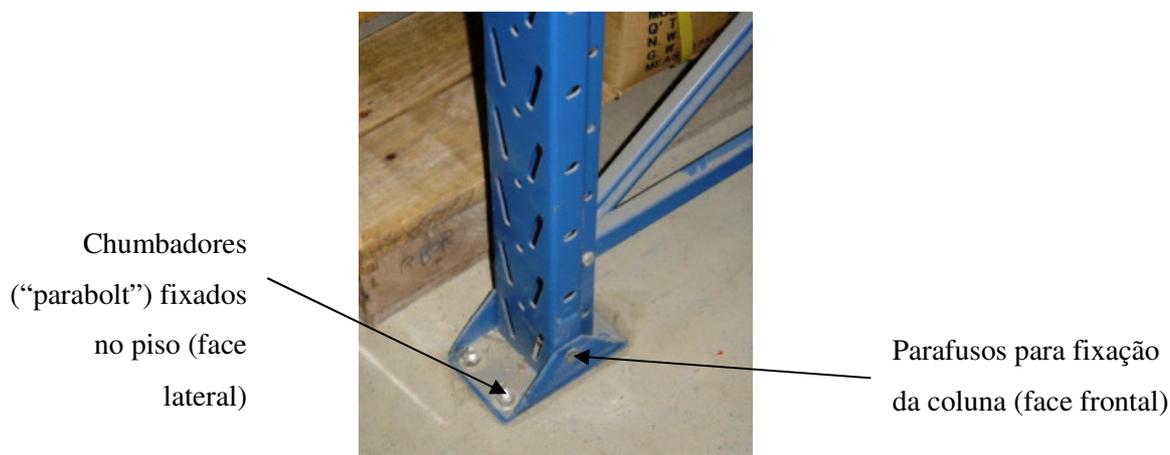


FIGURA 2.16 - Placa de base mais usada nos sistemas *porta-pallets* (RIBEIRO, 2006).

Na face frontal dos sistemas de armazenagem tipo *porta-pallets*, as placas de base podem ter sua ligação considerada rotulada. Já na face lateral, a ligação devido aos parafusos de fixação pode ser considerada rígida.

2.3.1.6. Ligações viga-coluna

As ligações entre as vigas e colunas desse tipo de sistema serão apresentadas e detalhadas no capítulo 3 - Ligações.

2.4. Estabilidade do sistema

Nos sistemas de armazenagem industrial, a estabilidade estrutural é um fator determinante para o seu bom funcionamento. No *porta-pallets*, a estabilidade é garantida pelos contraventamentos fixados na face lateral da estrutura, pelos contraventamentos adicionais (quando necessários) de fundo e no plano horizontal entre as vigas e pela rigidez das ligações. Outro fator que não pode ser descartado da análise

dessas estruturas é o efeito não-linear $P-\Delta$, que relaciona as forças axiais “P” com seus respectivos deslocamentos laterais “ Δ ” (BEALE *et al*, 2004).

2.5. Critérios de operacionalização e segurança

Para garantir a integridade dos *racks*, quanto à operação e à segurança, o RMI (2008) recomenda que:

- A carga máxima dimensionada para a estrutura não pode ser ultrapassada. Assim, placas indicando essa carga suportada por unidade e de todo o sistema deverão ser instaladas em locais de fácil visibilidade;
- O sistema não pode ser alterado em sua configuração sem autorização do fabricante;
- Os paletes a serem usados, principalmente os de madeira, devem ter sua integridade mantida em ótimas condições de uso;
- Os produtos estocados devem estar empilhados corretamente para serem estáveis, e os paletes sob os produtos devem estar apoiados nas vigas;
- As inspeções devem ser feitas constantemente para a detecção de falhas na estrutura. Caso isso ocorra, a região danificada deverá ser descarregada, e o reparo feito. A região somente voltará a ser utilizada após a liberação pelos responsáveis pelo sistema.

Capítulo 3

LIGAÇÕES

Neste capítulo, são descritas a classificação das ligações viga-coluna e a importância da avaliação da rigidez da ligação em função do tipo de *rack* utilizado. São apresentadas também as formulações do RMI (2008) para a determinação dos valores de rigidez das ligações dos sistemas *porta-pallets* por meio do ensaio *Cantilever Test*. Por fim, são mostrados os valores de rigidez encontrados com base nos ensaios experimentais realizados anteriormente por Freitas e Silva (2007).

3.1. Ligações semi-rígidas

As ligações viga-coluna (parafusadas ou não-parafusadas) podem ser classificadas em três tipos: flexíveis, semi-rígidas ou rígidas.

As ligações flexíveis são aquelas que permitem a rotação relativa entre as peças com um comportamento próximo ao de uma rótula, transmitindo um pequeno momento fletor. As ligações rígidas têm rigidez suficiente para manter praticamente constante o ângulo entre as peças (rotação quase nula) para qualquer nível de carga, até atingir o momento resistente da ligação. E, por último, as ligações semi-rígidas, consideradas intermediárias entre as flexíveis e a rígidas (PFEIL, 2008).

Oliveira (2000), Aguirre (2005) e Souza (2005) realizaram trabalhos que consideravam as ligações dos sistemas de armazenagem industrial como semi-rígidas, conseguindo bons resultados em relação à resistência da estrutura.

Nos *racks*, as ligações semi-rígidas são as que melhor simulam o seu comportamento, devido principalmente às “garras dentadas” existentes nas extremidades das vigas para a conexão com as colunas.

No mercado atual, pequenas reduções no custo podem representar a aquisição de novos projetos para fabricação e execução de estruturas. Os fabricantes de *racks*

perceberam que, admitindo as ligações como flexíveis (rotuladas), sem estudos mais profundos, estavam, em determinadas situações, tornando os sistemas superdimensionados economicamente. Por isso, desenvolveram ensaios experimentais para quantificar a rigidez das ligações e, com isso, economizar no quantitativo de materiais e avaliar a estabilidade dos sistemas.

Considerando a versatilidade das ligações dos sistemas de armazenagem o RMI (*Rack Manufacturers Institute*), dos Estados Unidos, desenvolveu um ensaio experimental chamado *Cantilever Test* e uma formulação matemática que com base nos resultados deste ensaio, permite o cálculo da rigidez da ligação dos *racks*. O ensaio e a formulação matemática são apresentados a seguir.

3.2. Prescrições do RMI para cálculo da rigidez

As prescrições do RMI (2008) consideram avaliações experimentais para determinar o valor da rigidez das ligações viga-coluna dos *racks*. A seguir tem-se a descrição do ensaio *Cantilever Test* e da equação existente para a avaliação desses valores.

3.2.1. Ensaio da viga em balanço (*Cantilever Test*)

Numa análise estrutural que considera as ligações rígidas, os seus elementos devem manter constante o ângulo formado entre a viga e coluna (devido à carga aplicada). Em *racks*, o comportamento não se apresenta dessa maneira. Se forem consideradas as ligações desses sistemas como rígidas, haverá influência direta no comportamento global, o que é muito importante visto a esbeltez da estrutura. Assim, é praticamente impossível estabelecer um procedimento geral para definir a rigidez do sistema. A determinação da rigidez real da ligação viga-coluna é o modo mais seguro para a avaliação estrutural de sistemas do tipo *rack*. A rigidez é experimentalmente obtida por meio do *Cantilever Test*, no qual a rotação (ângulo em radianos) é definida por uma relação linear entre o momento e a rigidez.

O *Cantilever Test*, portanto, 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 3.1 e consiste em um protótipo padrão com coluna de 76cm de altura engastada em suas extremidades em suportes rígidos, conectada em sua meia altura a uma viga de 66cm de comprimento. A carga é aplicada sobre a viga a 61cm da face da coluna. Nesse ponto, um transdutor de deslocamentos deve ser instalado.

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*.

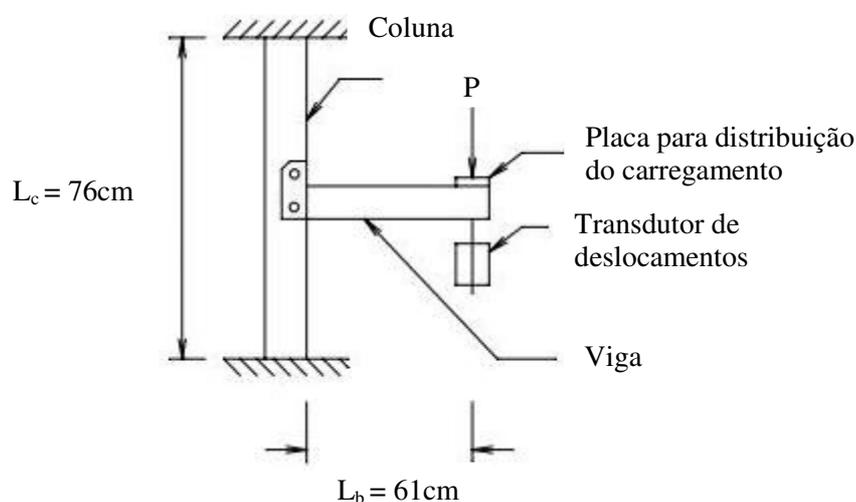


FIGURA 3.1 - Configuração do Cantilever Test (RMI, 2008).

Na Figura 3.1, 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.

3.2.2. Rigidez da ligação do Cantilever Test

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

$$F = \frac{M}{\theta} \quad (3.1)$$

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

$$\delta = PL_b^2 \left(\frac{L_c}{16EI_c} + \frac{L_b}{3EI_b} + \frac{1}{F} \right) \quad (3.2)$$

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

$$F = \frac{(R.F)}{\frac{\delta_{0,85}}{P_{0,85}L_b^2} - \frac{L_c}{16EI_c} - \frac{L_b}{3EI_b}} \quad (3.3)$$

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 (61 cm);

L_c = comprimento da coluna (76 cm);

E = módulo de elasticidade ($E= 200000$ MPa);

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 3.3, observa-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 (ANEXO I); 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. Observa-se, no entanto, que toda a análise é linear, e o comportamento observado nos ensaios tem uma não linearidade que não é considerada na equação.

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* (FIGURA 3.2).

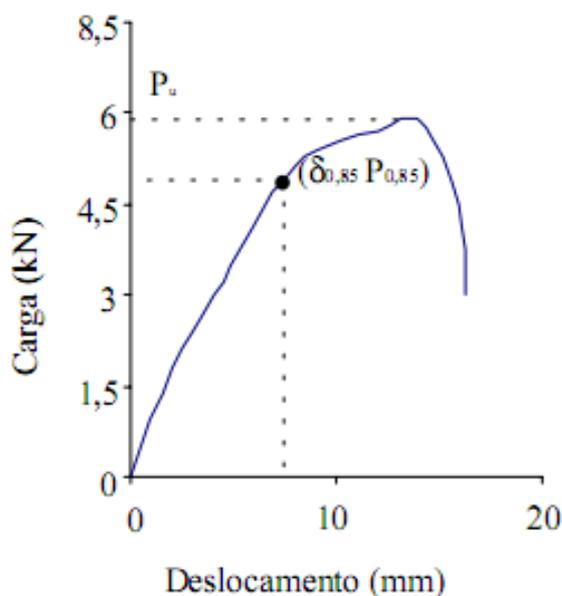


FIGURA 3.2 - Obtenção do par de valores $P_{0,85}$ e $\delta_{0,85}$ por meio da curva carga x deslocamento com indicação da carga última (P_u) (OLIVEIRA, 2000).

Segundo o RMI, para determinar o valor final da rigidez, devem ser efetuados dois testes idênticos. Se os resultados apresentarem um desvio padrão superior a 10%, um terceiro ensaio deve ser realizado. A média dos dois valores mais elevados deve ser considerada como o resultado da rigidez da ligação viga-coluna.

3.3. Apresentação dos resultados experimentais

Os resultados experimentais foram determinados por Freitas e Silva (2007) no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil, da Escola de Minas, na Universidade Federal de Ouro Preto. O programa experimental teve como objetivo a determinação dos valores de rigidez das ligações viga-coluna dos *racks* tipo *porta-pallets*, embasado nas prescrições do RMI (2008). Foram realizados os ensaios do tipo *Cantilever Test* e *Portal Test*, sendo apenas o primeiro objeto de estudo nesta dissertação.

Uma observação importante a ser feita é sobre o comprimento da coluna usada no ensaio *Cantilever Test*. Segundo o RMI (2008), a coluna deverá ter comprimento igual a 76cm. Mas, nos experimentos, foram utilizadas colunas com comprimento igual

a 79,6cm. Isso ocorreu para que as perfurações da coluna não interferissem no engastamento das extremidades.

Os resultados obtidos com o ensaio do *Cantilever Test* serão mostrados após uma breve apresentação dos perfis utilizados e de suas propriedades geométricas necessárias para o cálculo da rigidez da ligação.

3.3.1. Dimensões e propriedades geométricas dos perfis utilizados

Os perfis utilizados nos ensaios foram de três seções diferentes para as colunas e três seções diferentes para as vigas. A seção transversal das colunas foi do tipo rack ou garrafa e são identificadas como C1, C2 e C3, todas com espessuras de 2,25mm. As vigas são de seção transversal tipo caixão com as seguintes dimensões: 42x88mm, 50x105mm, 50x120mm (largura x altura em milímetros), todas com espessuras de 2,0mm. Na Figura 3.3, tem-se a nomenclatura utilizada nas dimensões do perfil da coluna; e na Tabela 3.1, os valores nominais das dimensões dos perfis ensaiados, C1, C2 e C3.

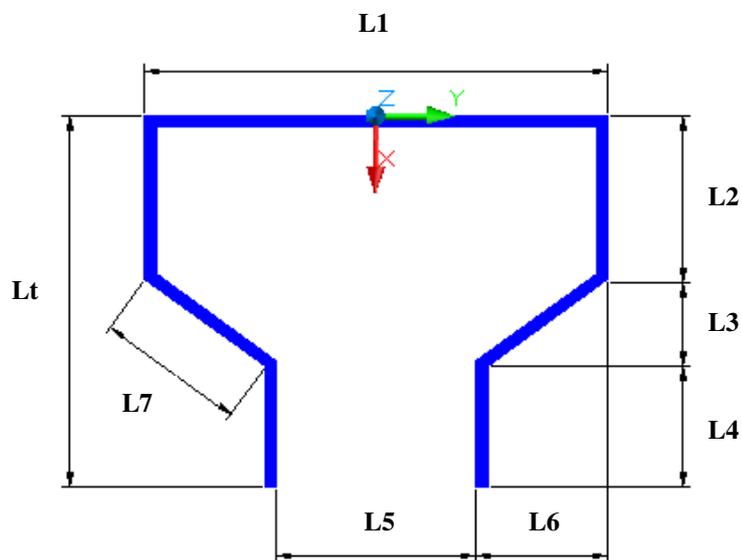


FIGURA 3.3 - Nomenclatura adotada para identificação das dimensões da seção tipo *rack* das colunas.

TABELA 3.1 - Dimensões nominais das seções das colunas tipo C1, C2 e C3.

Dimensões Nominiais	C1	C2	C3
Lt (mm)	54,0	68,0	84,0
L1 (mm)	76,0	84,0	94,0
L2 (mm)	30,0	34,0	50,0
L3 (mm)	4,0	12,0	13,0
L4 (mm)	20,0	21,0	21,0
L5 (mm)	32,0	32,0	32,0
L6 (mm)	22,0	26,0	31,0
L7 (mm)	22,4	28,6	33,6

A partir das três seções das colunas e considerando que cada coluna é conectada a três vigas, as nove configurações distintas de ligações foram analisadas e ensaiadas e, posteriormente, foram encontrados os valores de rigidez experimentais. As combinações criadas, segundo Freitas e Silva (2007), e a nomenclatura dos ensaios são indicadas na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - Nomenclatura adotada para as configurações dos modelos experimentais.

Coluna	Viga (mm)	Nº do ensaio	Nomenclatura
C1	42x88	()	C1-42x88 ()
	50x105	()	C1-50x105 ()
	50x120	()	C1-50x120 ()
C2	42x88	()	C2-42x88 ()
	50x105	()	C2-50x105 ()
	50x120	()	C2-50x120 ()
C3	42x88	()	C3-42x88 ()
	50x105	()	C3-50x105 ()
	50x120	()	C3-50x120 ()

Para que a rigidez da ligação fosse obtida por meio da equação (3.3) prescrita pelo RMI (2008), propriedades geométricas (baseadas no sistema de eixos indicados na Figura 3.4) foram calculadas e estão apresentadas na Tabela 3.3. A inércia das colunas foi calculada por meio de sua seção com furos.

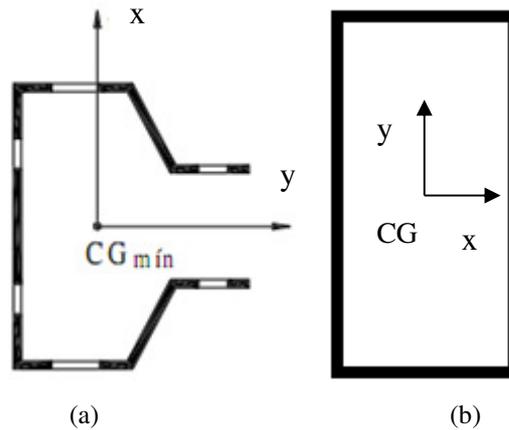


FIGURA 3.4 - Sistema de eixos utilizados para cálculo das propriedades geométricas: (a) colunas; (b) vigas.

TABELA 3.3 - Valores das inércias calculadas para determinação da rigidez da ligação.

Coluna	Momento de inércia (cm⁴) (em torno do eixo y)
C1	21,583
C2	32,9552
C3	51,0578
Viga	Momento de inércia (cm⁴) (em torno do eixo x)
42x88	48,8657
50x105	84,5968
50x120	117,9950

3.3.2. Resultados experimentais

Na Tabela 3.4, são apresentados os resultados experimentais obtidos por meio do ensaio *Cantilever Test* para as ligações viga-coluna.

TABELA 3.4 - Resultados experimentais do *Cantilever Test* (FREITAS; SILVA, 2007).

<i>COLUNAS C1</i>	P (kN)	P _{0,85} (kN)	δ (mm)	$\delta_{0,85}$ (mm)	F (kNm/rad)	F _(média) (kNm/rad)
					R.F=1	R.F=1
C1-42x88 (1)	2,705	2,300	21,879	14,601	71,888	72,227
C1-42x88 (2)	2,560	2,176	21,614	13,714	72,566	
C1-50x105 (1)	3,382	2,875	23,801	15,458	82,268	78,458
C1-50x105 (3)	3,182	2,705	24,677	15,796	74,647	
C1-50x120 (1)	4,040	3,434	29,447	18,022	82,374	86,203
C1-50x120 (2)	3,810	3,239	24,251	15,754	90,032	
<i>COLUNAS C2</i>	P (kN)	P _{0,85} (kN)	δ (mm)	$\delta_{0,85}$ (mm)	F (kNm/rad)	F _(média) (kNm/rad)
					R.F=1	R.F=1
C2-42x88 (1)	2,585	2,197	21,323	13,948	69,650	69,423
C2-42x88 (2)	2,784	2,366	24,754	15,216	68,895	
C2-50x105 (1)	2,699	2,294	19,364	12,239	80,470	81,812
C2-50x105 (2)	2,500	2,215	17,360	11,018	83,154	
C2-50x120 (1)	3,714	3,157	27,684	15,171	88,193	88,701
C2-50x120 (2)	3,418	2,905	22,024	13,823	89,209	
<i>COLUNAS C3</i>	P (kN)	P _{0,85} (kN)	δ (mm)	$\delta_{0,85}$ (mm)	F (kNm/rad)	F _(média) (kNm/rad)
					R.F=1	R.F=1
C3-42x88 (1)	2,579	2,192	24,159	15,801	59,277	57,186
C3-42x88 (2)	2,905	2,469	32,804	18,976	55,094	
C3-50x105 (1)	3,291	2,797	33,278	19,091	59,907	61,048
C3-50x105 (2)	3,400	2,890	31,471	19,063	62,189	
C3-50x120 (1)	4,251	3,613	32,208	19,677	75,086	72,730
C3-50x120 (2)	4,028	3,424	32,534	19,779	70,374	

Para a análise numérica das ligações viga-coluna descrita no capítulo 4, serão utilizados os modelos descritos na Tabela 3.5, selecionados por apresentarem as menores cargas últimas entre os ensaios realizados.

TABELA 3.5 - Modelos selecionados para serem utilizados na análise numérica descrita no capítulo 4.

<i>COLUNAS C1</i>	P (kN)	P _{0,85} (kN)	δ (mm)	$\delta_{0,85}$ (mm)	F (kNm/rad)
					R.F=1
C1-42x88 (2)	2,560	2,176	21,614	13,714	72,566
C1-50x105 (3)	3,182	2,705	24,677	15,796	74,647
C1-50x120 (2)	3,810	3,239	24,251	15,754	90,032
<i>COLUNAS C2</i>	P (kN)	P _{0,85} (kN)	δ (mm)	$\delta_{0,85}$ (mm)	F (kNm/rad)
					R.F=1
C2-42x88 (1)	2,585	2,197	21,323	13,948	69,650
C2-50x105 (1)	2,699	2,294	19,360	12,239	80,470
C2-50x120 (2)	3,418	2,905	22,024	13,823	89,209
<i>COLUNAS C3</i>	P (kN)	P _{0,85} (kN)	δ (mm)	$\delta_{0,85}$ (mm)	F (kNm/rad)
					R.F=1
C3-42x88 (1)	2,579	2,192	24,159	15,801	59,277
C3-50x105 (1)	3,291	2,797	33,278	19,091	59,907
C3-50x120 (2)	4,028	3,424	32,534	19,779	70,374

Onde:

P = carga última;

P_{0,85} = carga referente a 85% da carga última;

δ = deslocamento último;

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

F = rigidez da ligação;

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

Capítulo 4

ANÁLISE NUMÉRICA DAS LIGAÇÕES

Neste capítulo, são apresentados a metodologia utilizada na análise numérica das ligações semi-rígidas do sistema de armazenagem tipo *porta-pallets* e os resultados encontrados. Nove modelos numéricos foram simulados por meio do *software Ansys 11.0*, para avaliação da rigidez das ligações viga-coluna utilizando as prescrições do RMI (2008) vistas no capítulo 3. A geometria dos modelos, as propriedades dos materiais empregados, os elementos finitos aplicados, as condições de contorno dos elementos e o método usado para obtenção das cargas e deslocamentos são expostos neste capítulo. Ao seu final, são exibidos os resultados obtidos considerando a análise não linear física e geométrica.

4.1. Descrição dos modelos numéricos

A nomenclatura utilizada para os modelos numéricos é apresentada na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Nomenclatura dos modelos numéricos.

NOMENCLATURA DOS MODELOS				
Coluna	Viga (mm)	Nº do ensaio	Experimental	Numérico
C1	42x88	(2)	C1-42x88 (2)	NC1-42x88
	50x105	(3)	C1-50x105 (3)	NC1-50x105
	50x120	(2)	C1-50x120 (2)	NC1-50x120
C2	42x88	(1)	C2-42x88 (1)	NC2-42x88
	50x105	(1)	C2-50x105 (2)	NC2-50x105
	50x120	(2)	C2-50x120 (2)	NC2-50x120
C3	42x88	(1)	C3-42x88 (1)	NC3-42x88
	50x105	(1)	C3-50x105 (1)	NC3-50x105
	50x120	(2)	C3-50x120 (2)	NC3-50x120

4.1.1. Modelagem geométrica

Os desenhos iniciais dos elementos constituintes dos modelos numéricos (coluna, garra e viga) que simularam o ensaio *Cantilever Test*, prescrito pelo RMI (2008), se deram por meio do *software AutoCad 2008* (FIGURA 4.1). As principais dimensões das colunas, vigas e garras são mostradas na Tabela 4.2.

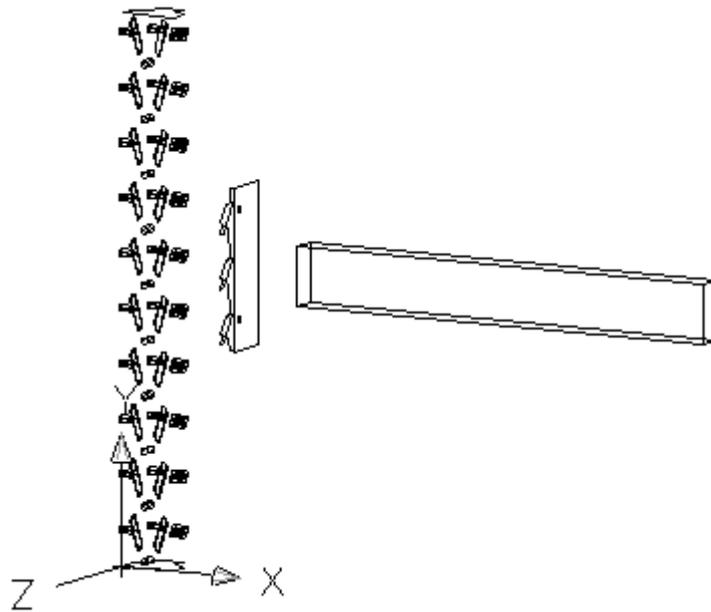


FIGURA 4.1 - Modelo inicial gerado no software *AutoCad 2008*.

TABELA 4.2 – Principais dimensões das colunas, vigas e garras constituintes dos modelos numéricos.

Elemento	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
COLUNA	2,25	796
VIGA	2,0	660
GARRA	3,3	235

Do *AutoCad 2008*, os modelos iniciais foram exportados para o *Ansys 11.0*, onde foram construídas todas as áreas externas das colunas e seus respectivos furos. As vigas foram acopladas às “garras dentadas” e, em seguida, encaixadas nas colunas, finalizando a modelagem geométrica dos modelos numéricos (FIGURA 4.2).

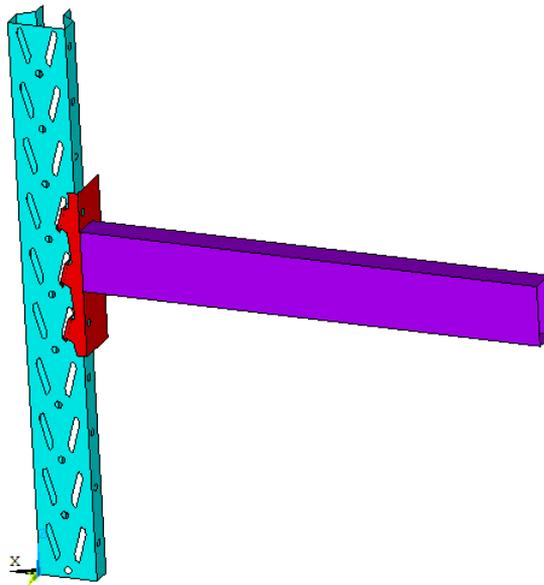


FIGURA 4.2 – Modelo geométrico finalizado.

4.1.2. Propriedades dos materiais utilizados

Na análise dos modelos numéricos, foi utilizado material com relação tensão x deformação com diagrama bi-linear. Na tabela abaixo, são apresentadas as propriedades gerais desse material e o tipo de aço constituinte das colunas, vigas e garra.

TABELA 4.3 – Propriedades gerais do material utilizado nos modelos e o tipo de aço das colunas, vigas e garra.

Propriedades Gerais				
Módulo de Elasticidade do aço (E)			200.000	
Coeficiente de Poisson (ν)			0,33	
Coeficiente de atrito estático entre aços secos			0,74	
Peça	Aço	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Observação
Coluna 1 (C1)	A570-Gr45	485,56	529,69	Valores obtidos através de ensaio de caracterização do aço
Coluna 2 (C2)		434,85	539,21	
Coluna 3 (C3)		413,59	516,21	
Vigas	ASTM A36	250	400	Valores Nominais
Garra	SAE 1020	180	300	Valores Nominais

4.1.3. Elementos finitos utilizados

Entre os vários elementos de casca disponíveis na biblioteca do *Ansys*, foi escolhido para a simulação numérica das ligações viga-coluna neste trabalho o elemento *Shell 181*. Sua escolha deve-se ao sucesso obtido em simulações anteriores (SOUZA, 2005) e também pela facilidade de adaptação aos contornos das colunas, das vigas e, principalmente, aos das garras.

O elemento *Shell 181* (FIGURA 4.3) apresenta quatro nós com seis graus de liberdade por nó, translações nas direções x , y e z , e rotações em torno de x , y e z .

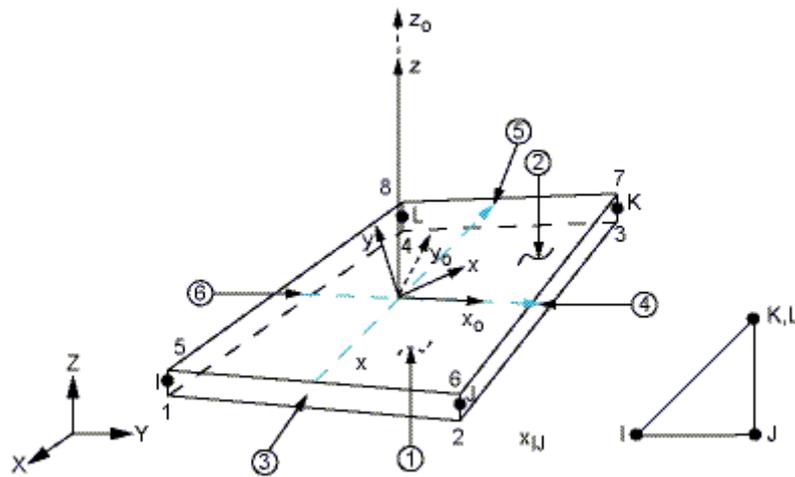


FIGURA 4.3 – Elemento de casca *Shell 181* (*Ansys 11.0*).

Para simular o contato entre as colunas e as garras da ligação viga-coluna, foram utilizados os elementos *Target 170* e *Conta 174*. O *Target 170* foi usado por ser um elemento aplicável em superfícies 3-D e por ter a capacidade de se moldar em superfícies rígidas e complexas. Ele apresenta três graus de liberdade por nó. Como explicitado, ele é o “alvo” para receber o elemento de contato. A Figura 4.4 mostra a geometria de tal elemento.

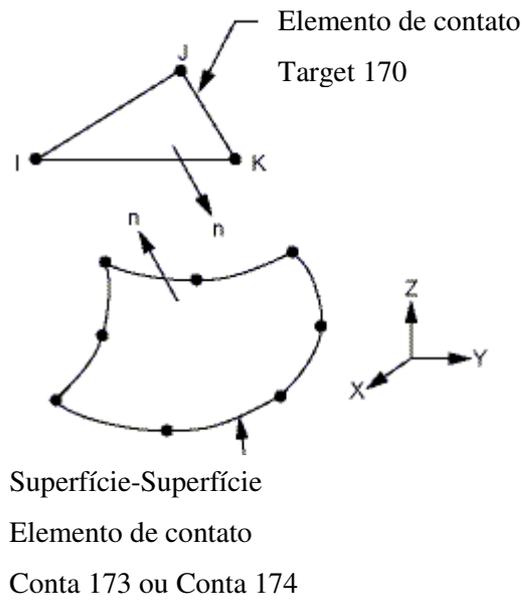


FIGURA 4.4 – Elemento de contato *Target 170* (Ansys 11.0).

O elemento *Conta 174* se aplica a estruturas 3-D e apresenta as mesmas características do elemento *Shell* ou “sólido”, o qual está ligado. Apresenta três graus de liberdade por nó (FIGURA 4.5).

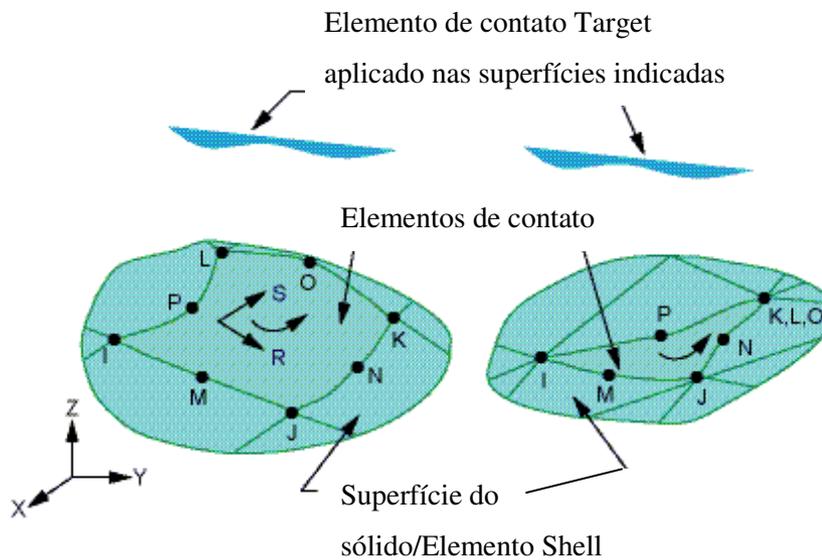


FIGURA 4.5 – Elemento de contato *Conta 174* (Ansys 11.0).

Na Figura 4.6, o elemento *Shell 181* é utilizado na coluna (elementos triangulares), na viga (elementos quadrilaterais) e na garra (elementos triangulares).

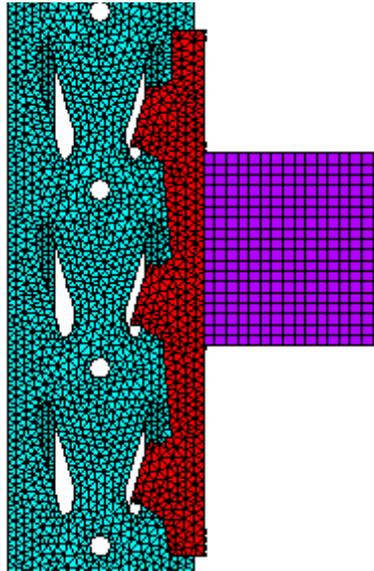


FIGURA 4.6 – Detalhe do elemento *Shell 181* aplicado no modelo numérico.

Os elementos *Target 170* e *Conta 174* foram aplicados no contato entre a garra e a coluna (FIGURA 4.7), no qual o atrito estático ocorre à medida que o carregamento é aplicado.

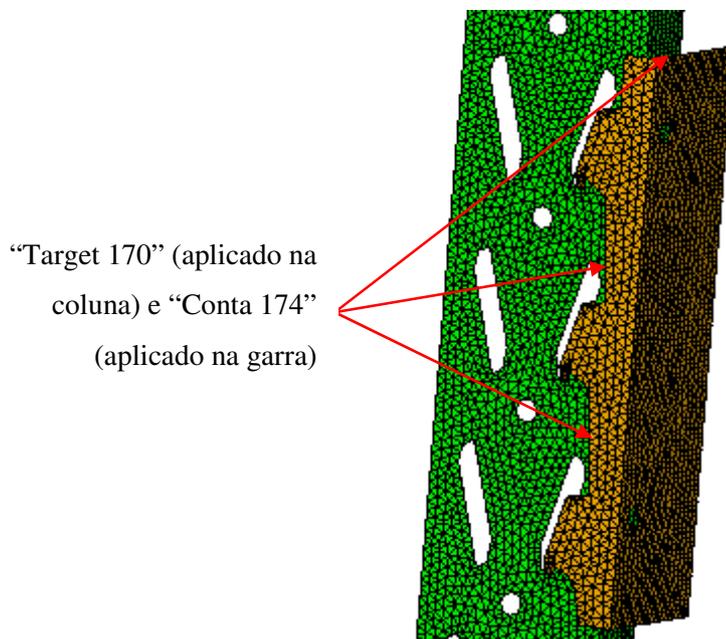


FIGURA 4.7 – Elementos *Target 170* (verde) e *Conta 174* (marrom), aplicados no contato garra-coluna.

4.1.4. Condições de contorno

Segundo o RMI (2008), para executar o ensaio *Cantilever Test*, as duas extremidades da coluna devem estar conectadas a suportes rígidos para que, durante o ensaio, não ocorram deslocamentos laterais da coluna. No modelo numérico, os suportes rígidos foram representados pelo engastamento de todos os nós das seções extremas da coluna, restringindo, assim, todos os seus movimentos (FIGURA 4.8).

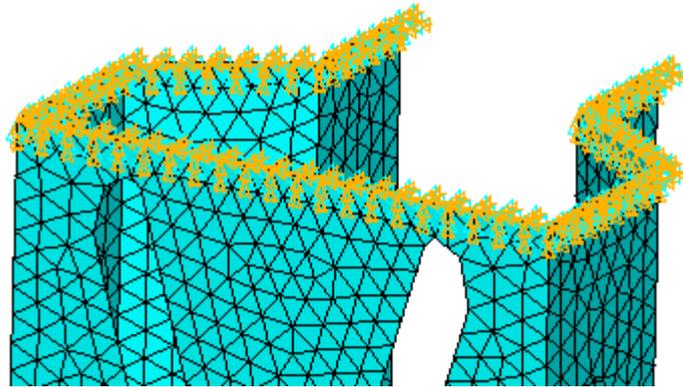


FIGURA 4.8 – Restrições aplicadas aos nós das seções extremas da coluna simulando os suportes rígidos.

Os sistemas de armazenagem industrial apresentam pinos de segurança para garantir a estabilidade do sistema caso a garra se desloque sob a ação de cargas, não perdendo, assim, o contato com a coluna. Para chegar à melhor maneira de representar os pinos, vários modelos foram simulados (baseados em estudos anteriores como Sarawit e Pekoz (2003)), sendo as principais tentativas:

- Acoplamento dos nós dos furos da coluna e da garra, liberando os movimentos de rotação de ambos e restringindo as translações;
- Acoplamento dos nós dos furos da coluna e da garra, restringindo todos os movimentos de rotação e translação dos nós dos furos inferiores e liberando completamente os nós dos furos superiores;
- Acoplamento dos nós dos furos da coluna e da garra restringindo todos os movimentos de rotação e translação;
- Acoplamento do nó inferior dos furos da coluna e da garra, restringindo seus movimentos de rotação e translação.

A última tentativa foi a que acarretou melhores resultados pós-convergência dos modelos, garantindo que a coluna e a garra trabalhassem sempre juntas (FIGURA 4.9).

Para que os modelos numéricos não apresentassem problemas de movimento de corpo rígido durante a sua execução, foi necessário também o acoplamento (graus de liberdade restringidos) de alguns nós da parte externa da garra com nós da face externa da alma da coluna (FIGURA 4.9). Tais nós foram escolhidos após tentativas com diferentes configurações de acoplamento.

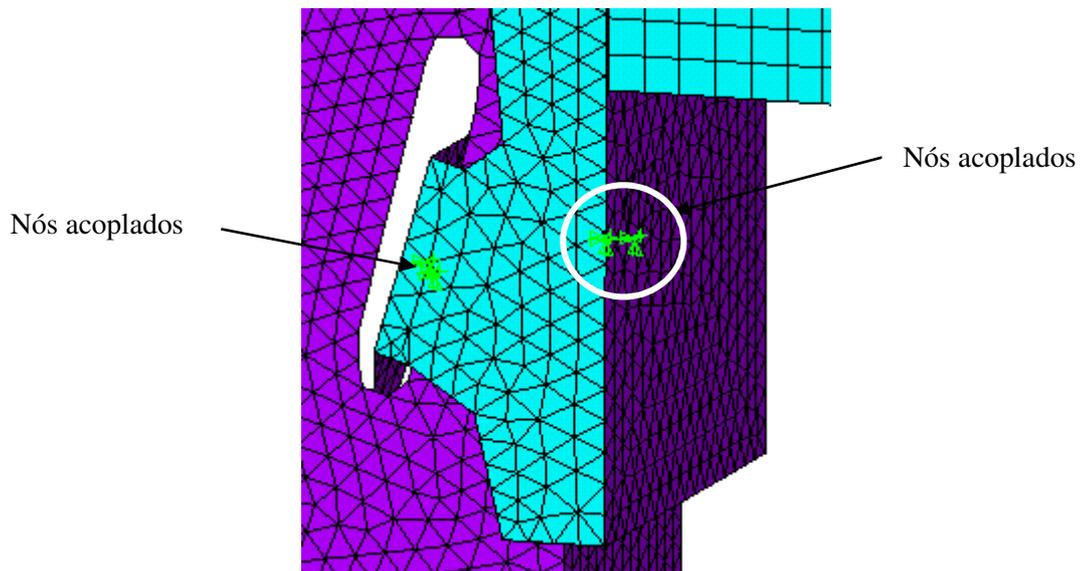


FIGURA 4.9 - Acoplamento dos nós dos furos da coluna e garra (direita); e na região garra-coluna (esquerda).

4.2. Aplicação do Carregamento

Neste trabalho, vários modelos foram simulados de acordo com a aplicação do controle de carga direta sobre a viga a 61cm da face lateral da coluna, conforme descreve o RMI (2008) para a realização do ensaio *Cantilever Test*. Esse método não demonstrou bons resultados para a modelagem aqui proposta devido a vários parâmetros de instabilidade dos perfis formados a frio. Assim, foi utilizado para a modelagem numérica o controle dos deslocamentos para a aplicação do carregamento. Dessa forma, foi feita a liberação do deslocamento do nó central da viga, na posição indicada pelo RMI, a 61cm da face da coluna para aplicação da carga (FIGURA 4.10), limitando, porém, a translação vertical do nó ao valor de deslocamento que se deseja

obter. Após a aplicação desse método, as cargas aplicadas em cada passo para a obtenção dos deslocamentos são obtidas.

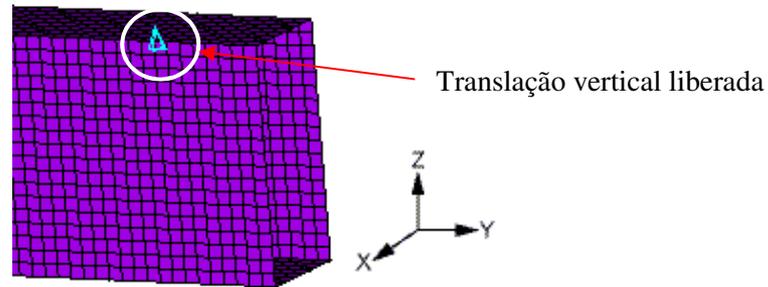


FIGURA 4.10 - Translação liberada em “z” para obtenção do deslocamento desejado.

4.3. Apresentação e análise dos resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados das análises numéricas realizadas quanto: às tensões; às cargas últimas obtidas com o deslocamento máximo; o mecanismo de colapso observado; e os valores de rigidez de todos os modelos numéricos das ligações viga-coluna, com base no ensaio *Cantlever Test* e equação (3.3). Os resultados dos modelos numéricos são expostos em três etapas, sendo cada uma delas representada por um tipo de coluna (C1, C2 ou C3) associada aos três respectivos tipos de vigas (42x88, 50x105 e 50x120).

4.3.1. Modelos NCI-42x88, NCI-50x105 e NCI-50x120

Deslocamentos e cargas últimas obtidas

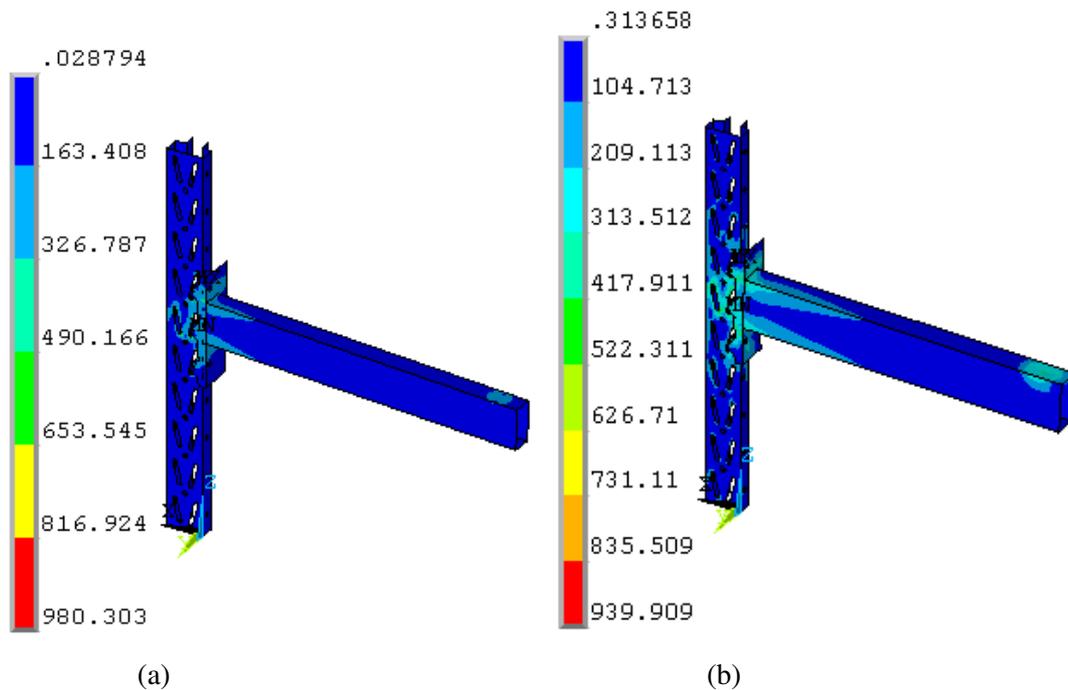
Nesses três modelos da coluna “C1”, os deslocamentos controlados por meio do método de controle de deslocamentos no eixo “z” (translação vertical liberada no nó sugerido pelo RMI para aplicação de carga) são indicados na Tabela 4.4, junto aos respectivos valores obtidos das cargas últimas (cargas máximas atingidas quando os deslocamentos impostos foram alcançados).

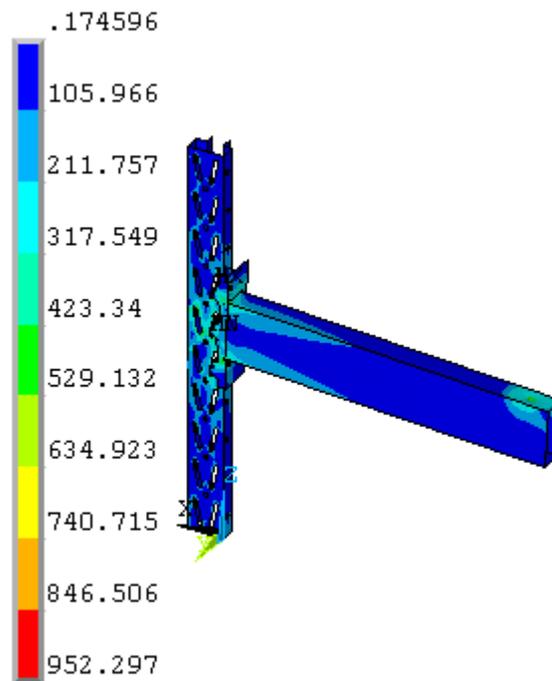
TABELA 4.4 - Deslocamentos máximos controlados e cargas últimas encontradas.

	Deslocamento (mm)	Carga última (kN)
NC1-42x88	21,614	2,623
NC1-50x105	24,677	3,803
NC1-50x120	24,251	4,542

Análise de tensões

As tensões (*von Mises*) resultantes de cada modelo são apresentadas na Figura 4.11, e pode-se observar que as mesmas ultrapassaram o limite de escoamento de seus aços em algumas regiões.





(c)

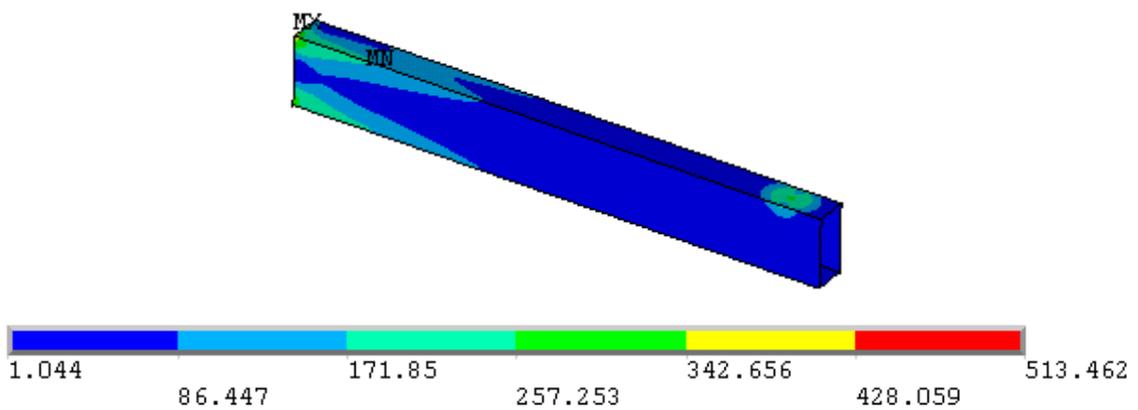
FIGURA 4.11 - Distribuição de tensões (*von Mises*) para os modelos: (a) NC1-42x88; (b) NC1-50x105; (c) NC1-50x120 (Escala de representação: 1,5).

Para encontrar os valores máximos das tensões que cada componente do modelo (viga, garra e coluna) foi submetido, é necessário fazer uma análise individual dessas peças, conforme apresentado a seguir:

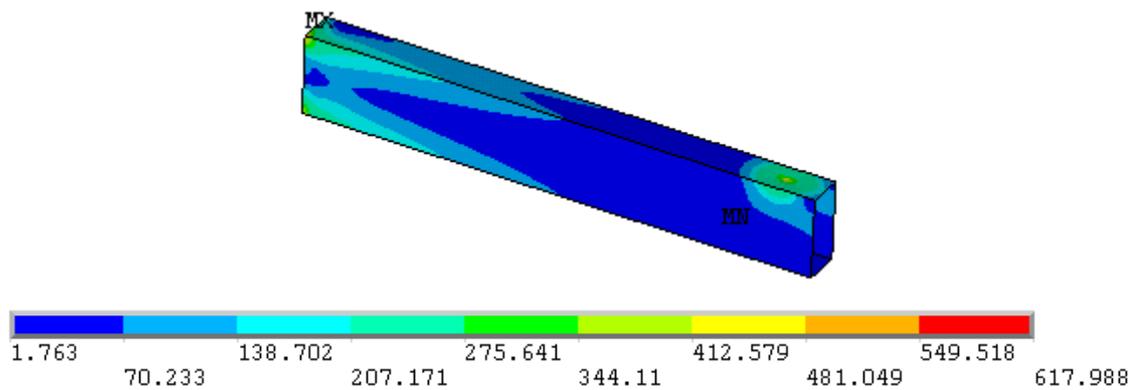
a) Vigas

O aço das vigas possui uma tensão de início de escoamento (f_y) igual a 250 MPa. Observa-se que, em algumas regiões, a plastificação (valores de tensão acima de f_y) ocorreu nesses modelos. Pode-se observar na Figura 4.12 que tais regiões de concentração de tensões elevadas são: a região de conexão das vigas com as garras e a região de aplicação da carga sobre a viga. Na primeira, o modelo numérico pode ser melhorado considerando a solda da ligação, o que poderia diminuir o efeito localizado da concentração de tensões. Na segunda, as tensões são irrelevantes, porque, nos ensaios, a carga é distribuída e aplicada (por meio do atuador hidráulico) sobre uma chapa, transferindo as tensões para toda a viga, não ficando concentrada no local. No modelo NC1-42x88, a tensão máxima atingida foi de 513,462 MPa, sendo sua área de

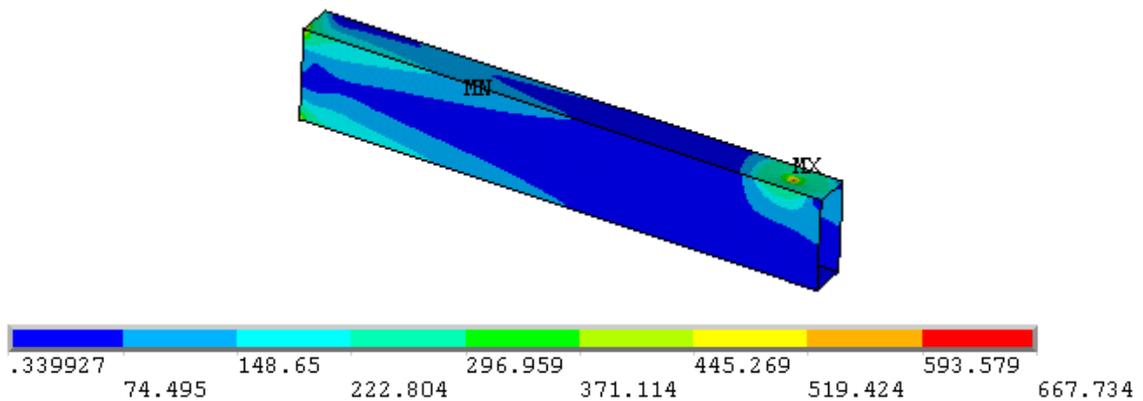
ocorrência muito pequena, localizada na região da solda da viga com a garra. Nos modelos NC1-50x105 e NC1-50x120, as tensões máximas chegaram a 617,988 MPa na região de conexão da viga com a garra e 667,734 MPa na região de aplicação da carga, respectivamente. Como as peças possuem inércias maiores que a viga do modelo NC1-42x88, elas absorvem grande parte das tensões no ponto de aplicação de carga (segundo RMI) antes de transferi-las para a ligação viga-coluna.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.12 - Distribuição de tensões (*von Mises*) das vigas dos modelos: (a) NC1-42x88; (b) NC1-50x105; (c) NC1-50x120 (Escala de representação: 1,5).

b) Garras

O aço das garras das ligações viga-coluna possui uma tensão de escoamento (f_y) igual a 210 MPa. Observa-se na Figura 4.13 que as tensões máximas atingidas por meio da simulação foram de 416,548 MPa, 584,089 MPa e 588,657 MPa para os modelos NC1-42x88, NC1-50x105 e NC1-50x120, respectivamente, sendo maiores nas duas últimas devido a maior carga aplicada em suas vigas. Os pontos de maior concentração de tensões nas garras foram: nas regiões de contato com a viga porque há tração na garra em sua parte superior e compressão na inferior, e na região do acoplamento dos nós laterais com a coluna. Esse acoplamento (necessário para evitar movimento de corpo rígido nos modelos) foi responsável pela não-deformação dos “dentes da garra” e, conseqüentemente, evitou a abertura do “dente superior” da garra, como ocorrido nos resultados experimentais.

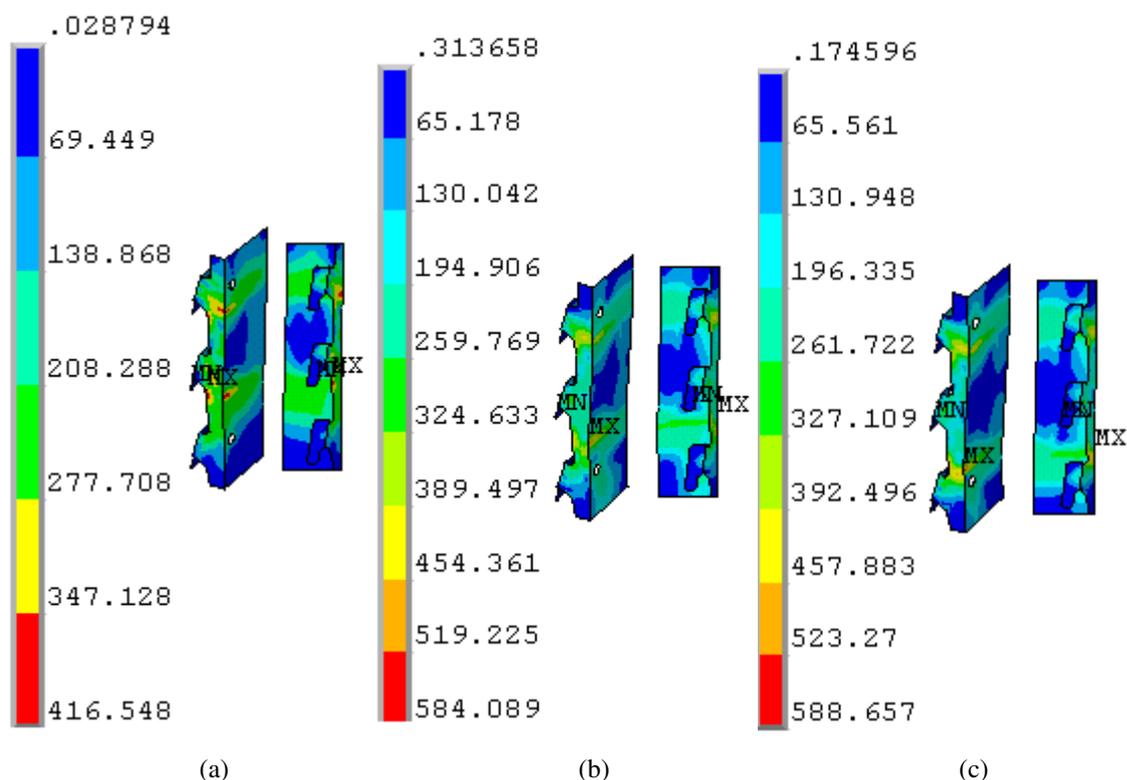


FIGURA 4.13 - Distribuição de tensões nas garras dos modelos: (a) NC1-42x88; (b) NC1-50x105; (c) NC1-50x120 (Escala de representação: 1,5).

c) Colunas

A tensão de escoamento do aço das colunas utilizadas nos modelos em questão é de 485,56 MPa. Na Figura 4.14, tem-se a distribuição das tensões (*von Mises*) para as colunas dos modelos NC1-42x88, NC1-50x105 e NC1-50x120. Pode-se afirmar que suas maiores tensões foram de 980,303 MPa, 939,909 MPa e 952,297 MPa, localizadas ao redor do rasgo, onde o “dente superior” da garra se encaixa. Pode-se observar também que devido à maior carga aplicada na viga “50x120”, esta apresentou tensões distribuídas em áreas maiores ao longo de seu comprimento em relação aos outros modelos.

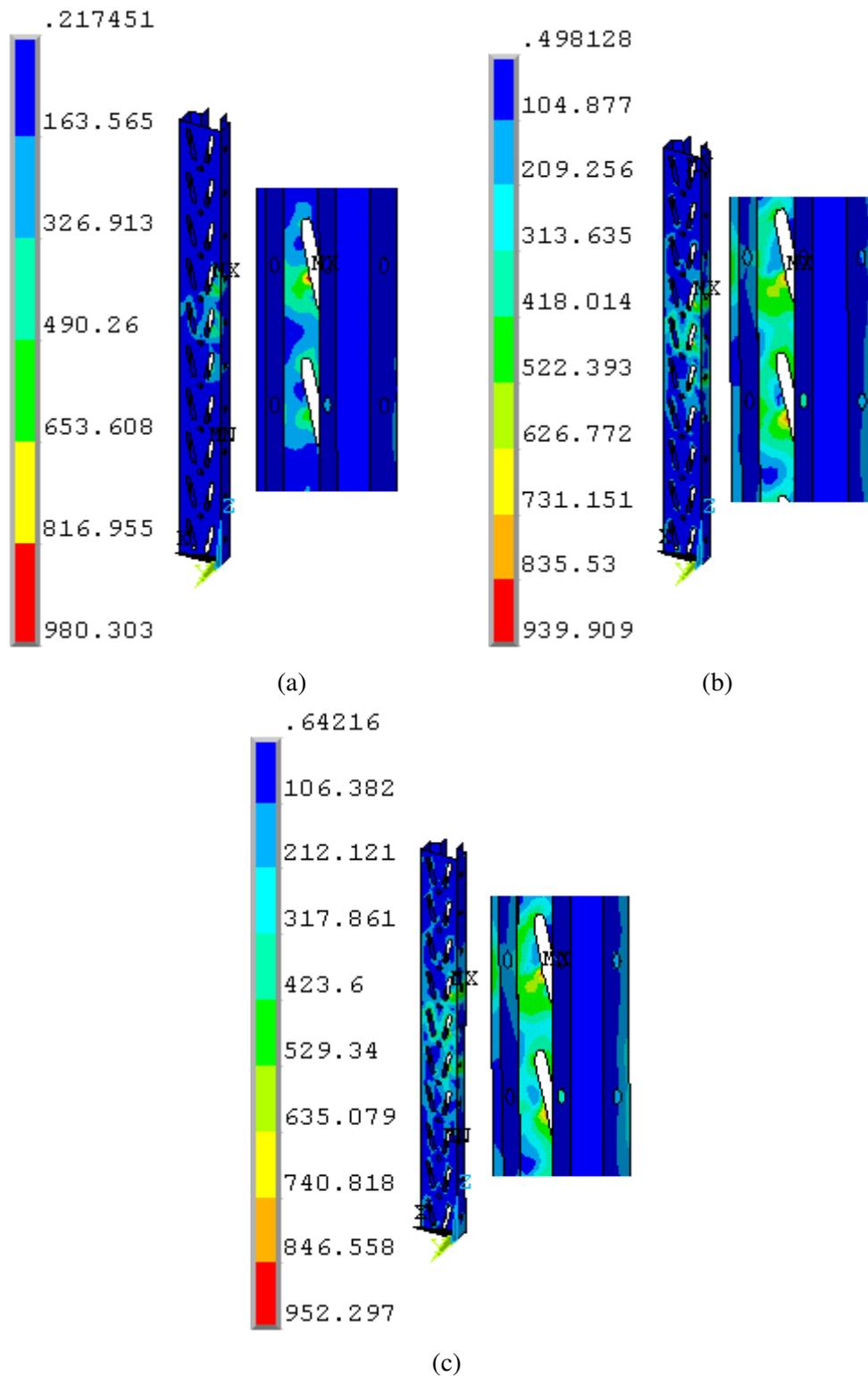


FIGURA 4.14 - Distribuição de tensões (*von Mises*) nas colunas dos modelos: (a) NC1-42x88; (b) NC1-50x105; (c) NC1-50x120 (Escala de representação: 1,5).

Rigidez da ligação

Após a simulação dos modelos numéricos da ligação viga-coluna, baseada nas prescrições do RMI por meio do ensaio *Cantilever Test*, a curva carga-deslocamento (FIGURA 4.15) foi obtida.

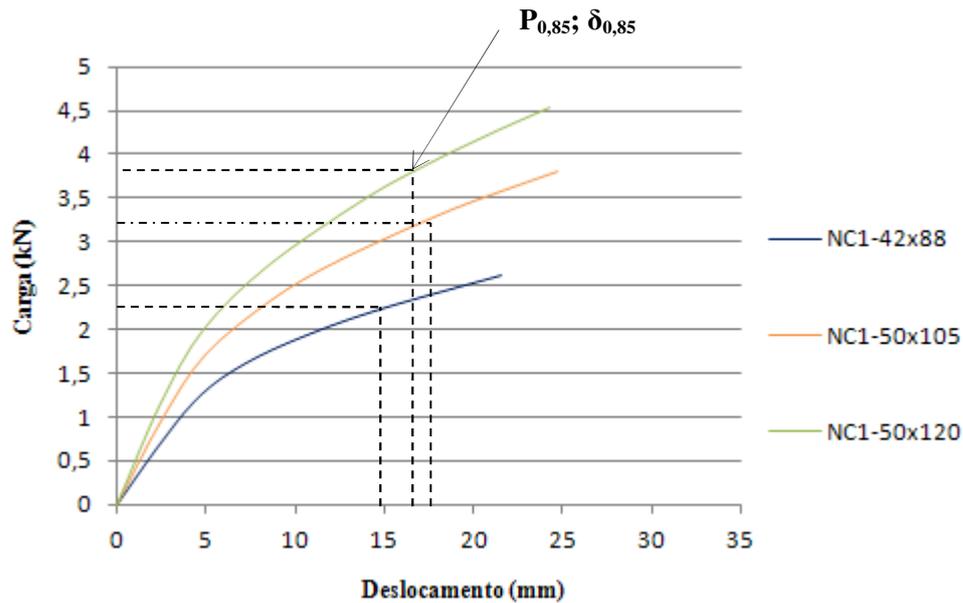


FIGURA 4.15 - Curva carga x deslocamento da ligação dos modelos NC1-42x88, NC1-50x105 e NC1-50x120.

Pela Figura 4.15, pode-se concluir que o modelo NC1-50x120 é o mais rígido dos três modelos apresentados, sendo o valor da rigidez aumentado de acordo com o crescimento da inércia das vigas. Com os pares de valores retirados da curva carga x deslocamento ($P_{0,85}$ e $\delta_{0,85}$) descritos na Figura 4.15, por meio da equação (3.3) prescrita pelo RMI (2008), obtiveram-se os valores de rigidez dos modelos que são apresentados na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 - Rigidezes encontradas para os três modelos da coluna C1 através da equação (3.3).

Modelo	$P_{0,85}$ (kN)	$\delta_{0,85}$ (mm)	F (kNm/rad)
NC1-42x88	2,230	14,760	68,330
NC1-50x105	3,233	17,250	83,026
NC1-50x120	3,861	17,200	99,915

4.3.2. Modelos: NC2-42x88, NC2-50x105 e NC2-50x120

Deslocamentos e cargas últimas obtidas

Para os três modelos numéricos em questão, os deslocamentos controlados por meio do método de controle de deslocamentos no eixo “z” (translação vertical liberada no nó sugerido pelo RMI para aplicação de carga) são indicados na Tabela 4.6 a seguir, juntamente aos valores das cargas últimas obtidos ao se atingir os deslocamentos impostos.

TABELA 4.6 - Deslocamentos máximos liberados e cargas últimas encontradas.

	Deslocamento (mm)	Carga última (kN)
NC2-42x88	21,300	2,905
NC2-50x105	19,364	3,056
NC2-50x120	22,024	2,964

Na Figura 4.16, serão mostradas as distribuições de tensões (*von Mises*) para os modelos em questão e pode-se observar que os mesmos ultrapassaram em alguns pontos o limite de escoamento de seu aço.

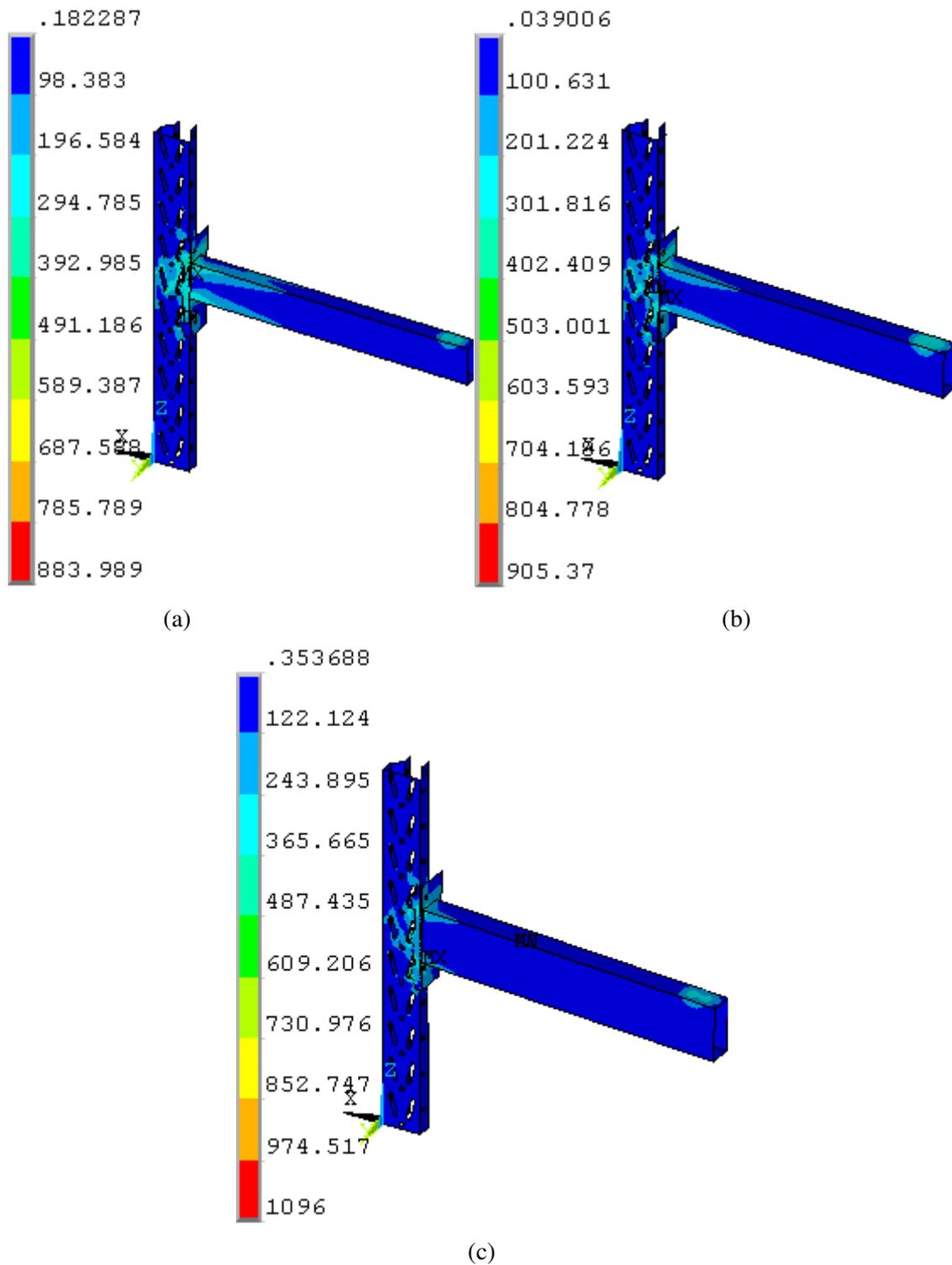
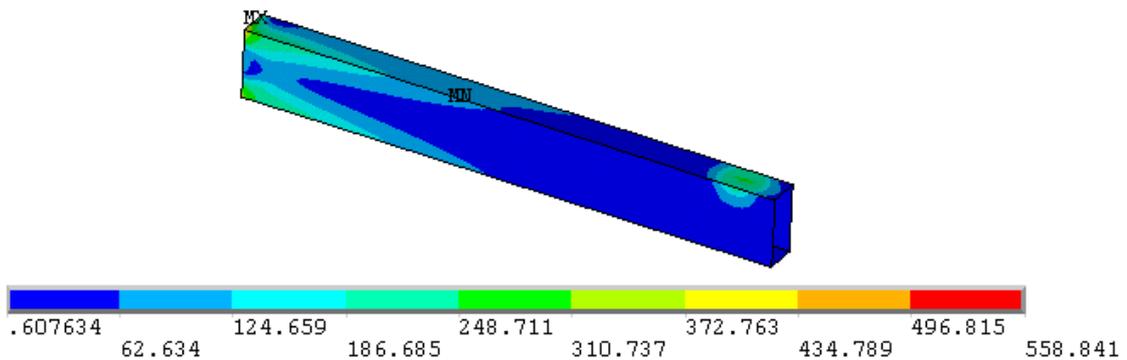


FIGURA 4.16 - Distribuição das tensões (*von Mises*) dos modelos: NC2-42x88, NC2-50x105 e NC2-50x120 (Escala de representação: 1,5).

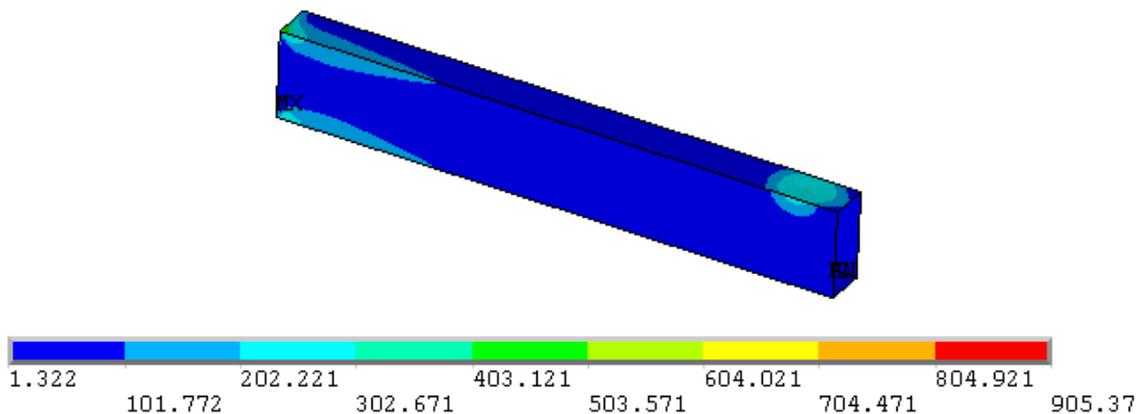
Em seguida, é feita a análise de tensões de cada peça dos modelos numéricos, ou seja, da coluna, da viga e da garra individualmente.

a) Vigas

Com base na Figura 4.17, pode-se afirmar que todas as vigas dos modelos da coluna “C2” atingiram e ultrapassaram a tensão de escoamento do seu aço ($f_y=250$ MPa), sendo alcançadas tensões de 558,841 MPa, 905,370 MPa e 470,42 MPa, para as os modelos NC2-42x88, NC2-50x105 e NC2-50x120, respectivamente. Observa-se que, na região do deslocamento liberado (onde são aplicadas as cargas segundo RMI) e na região de conexão da viga com a garra, as tensões chegaram aos seus maiores valores. O primeiro devido à falta de meios do método de controle de deslocamentos em reduzir as tensões localizadas no ponto de aplicação da carga; e o segundo por não ter havido simulação da solda da conexão nos modelos. Nota-se que devido a sua maior inércia, a viga do modelo NC2-50x120 apresentou tensões elevadas no ponto de liberação do deslocamento (ponto de aplicação da carga segundo RMI) superiores aos valores obtidos nos demais modelos.



(a)



(b)

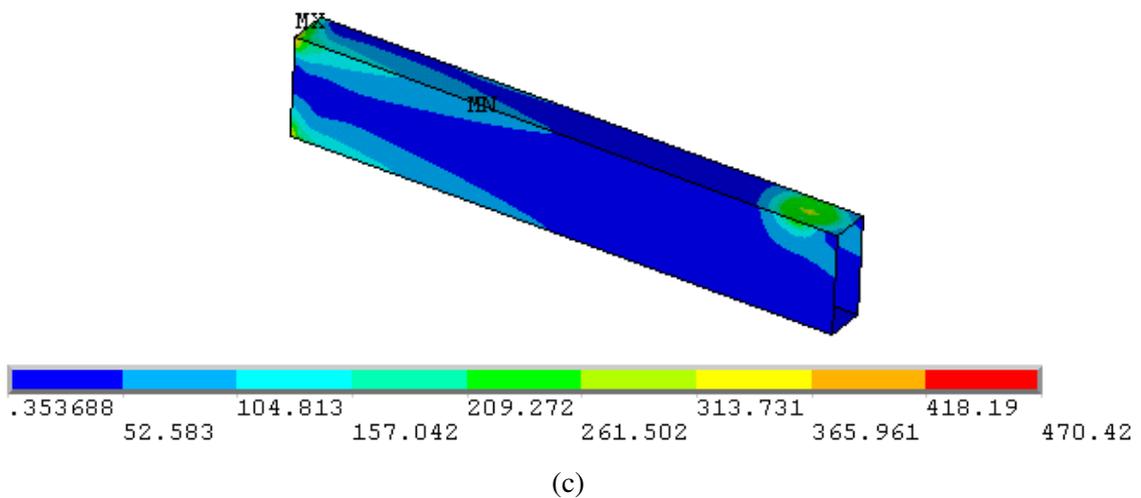


FIGURA 4.17 - Distribuição das tensões (*von Mises*) das vigas dos modelos: (a) NC2-42x88; (b) NC2-50x105; e (c) NC2-50x120 (Escala de representação: 1,5).

b) Garras

Pela Figura 4.18, conclui-se que as maiores tensões presentes nas garras dos modelos da coluna “C2” são aquelas indicadas na região superior e inferior das mesmas, ou seja, na região que a garra está sendo tracionada e comprimida, respectivamente. Essas tensões alcançaram seus valores máximos de 420,76 MPa para o modelo NC2-42x88; 482,966 MPa para o NC2-50x105; e 546,303 MPa para o NC2-50x120; ultrapassando, portanto, o limite de escoamento de 210 MPa do aço das garras. Os “dentes das garras” não absorveram tensões significativas devido ao acoplamento realizado entre alguns nós da garra e da alma da coluna, que impediu a transmissão de tensões até os “dentes”, principalmente até os superiores. Logo, percebe-se que as três garras em questão apresentaram comportamentos semelhantes.

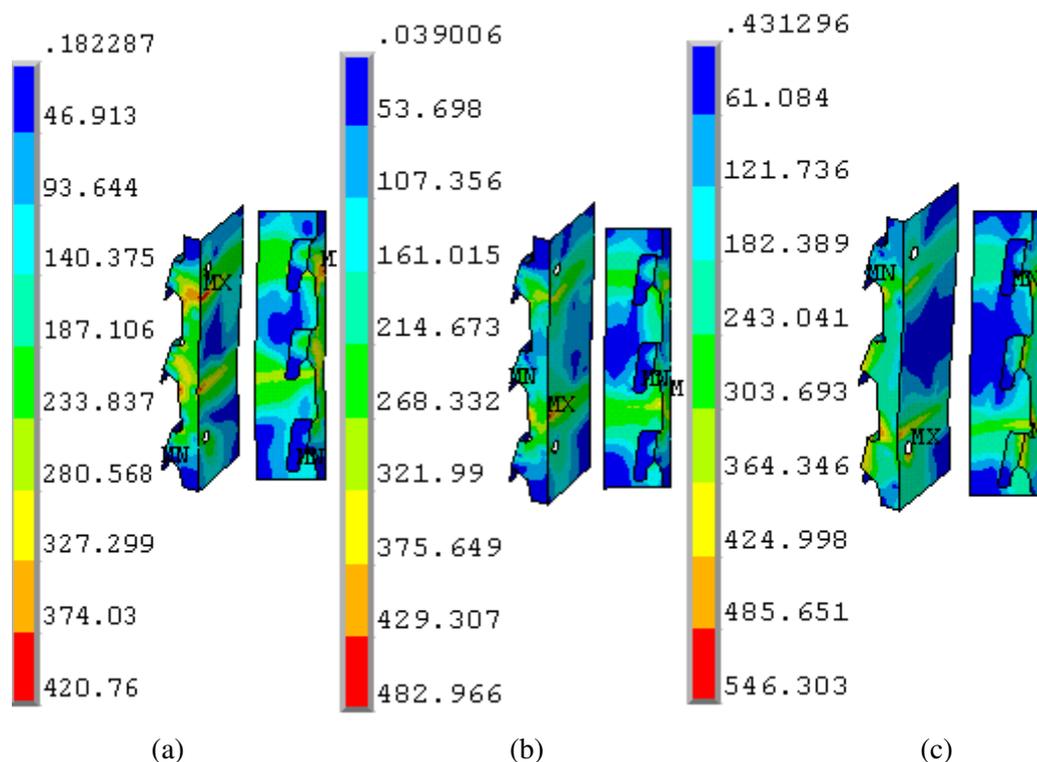


FIGURA 4.18 - Distribuição de tensões (*von Mises*) das garras dos modelos: (a) NC2-42x88; (b) NC2-50x105; (c) NC2-50x120 (Escala de representação: 1,5).

c) *Colunas*

A tensão de escoamento da coluna utilizada nos modelos em questão é de 434,85 MPa. Como pode ser analisado na Figura 4.19, as tensões absorvidas pelas colunas dos modelos “C2” atingiram valores de 883,989 MPa, 739,172 MPa e 1096 MPa, para os modelos NC2-42x88, NC2-50x105 e NC2-50x120, respectivamente. Esses valores são superiores ao limite de escoamento. As regiões onde ocorreu o maior acúmulo de tensões foram: a dos furos nos flanges da coluna e a do rasgo superior da coluna no qual o “dente” superior da garra se encaixa. Observa-se que a coluna do modelo “50x105” apresentou a maior concentração de tensões (FIGURA 4.19 (b)) eentre os três modelos aqui estudados.

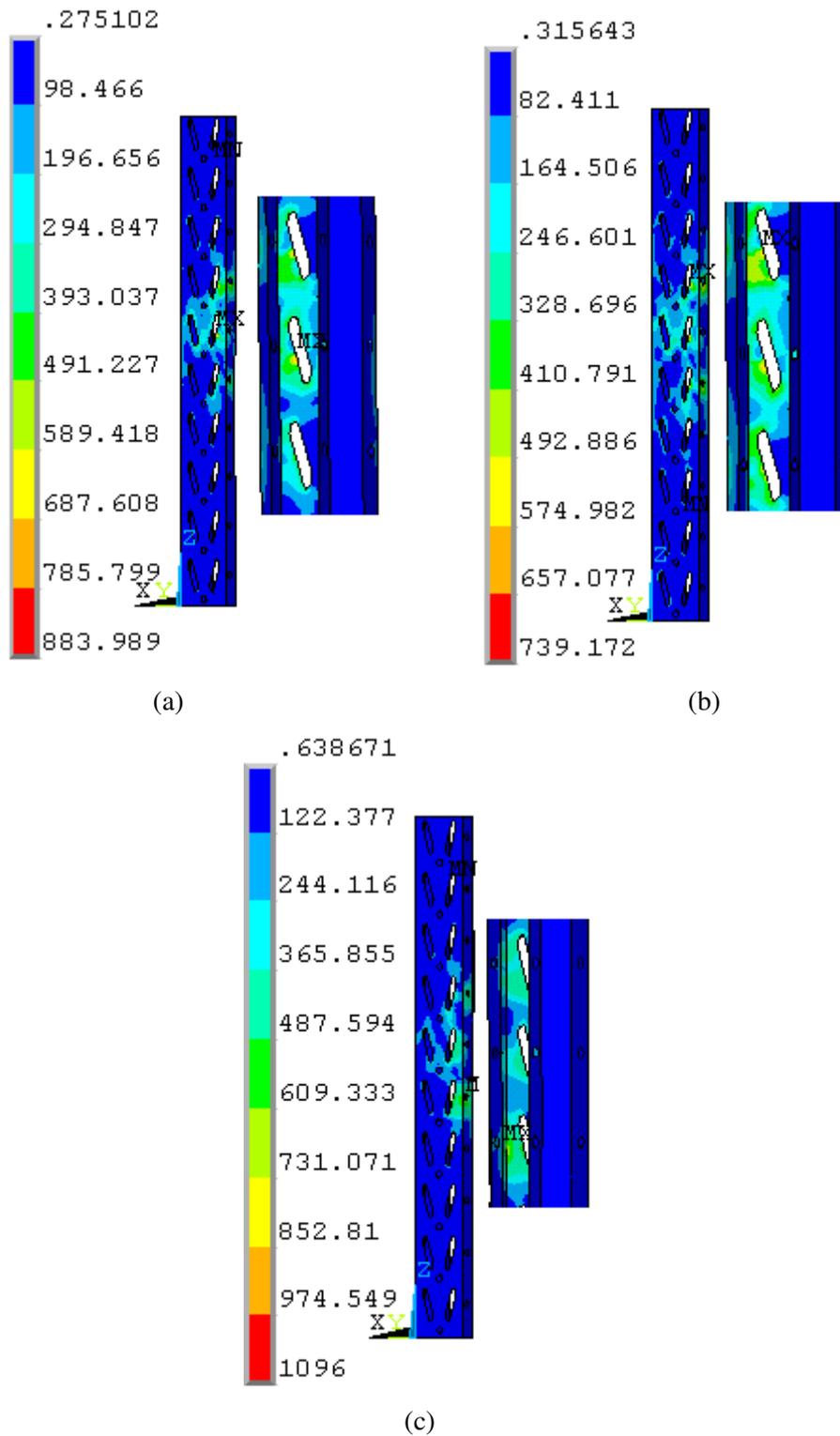


FIGURA 4.19 - Distribuição das tensões (*Von Mises*) das colunas dos modelos: (a) NC2-42x88; (b) NC2-50x105; (c) NC2-50x120 (Escala de representação: 1,5).

Rigidez da ligação

Baseado no ensaio *Cantilever Test* sugerido pelo RMI (2008) para determinação da rigidez da ligação viga-coluna com a equação (3.3) prescrita, os modelos numéricos da coluna “C2” foram simulados, e a seguinte curva carga-deslocamento (FIGURA 4.20) foi construída.

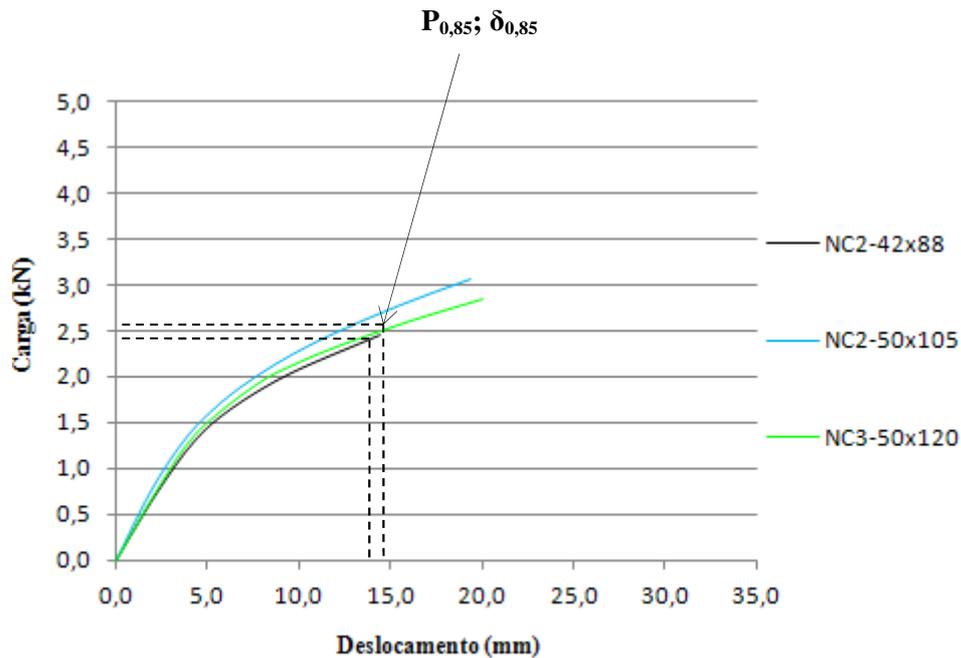


FIGURA 4.20 - Curva carga x deslocamento da ligação dos modelos NC2-42x88, NC2-50x105 e NC2-50x120.

Diferentemente dos modelos da coluna “C1”, o modelo NC2-50x105 foi o mais rígido dos três modelos das colunas “C2”. Os valores das rigidezes obtidas de acordo com a equação (3.3) prescrita pelo RMI são indicados abaixo (TABELA 4.7).

TABELA 4.7 - Rigidezes encontradas para os três modelos da coluna “C2” por meio da equação (3.3).

Modelo	$P_{0,85}$ (kN)	$\delta_{0,85}$ (mm)	F (kNm/rad)
NC2-42x88	2,469	14,510	76,759
NC2-50x105	2,598	13,370	83,873
NC2-50x120	2,519	14,750	70,635

4.3.3. Modelos: NC3-42x88, NC3-50x105 e NC3-50x120

Deslocamentos e cargas últimas obtidas

Na simulação numérica dos modelos em questão, foram impostos deslocamentos verticais máximos para obtenção das respectivas cargas últimas. Os valores das cargas e dos deslocamentos são apresentados na Tabela 4.8, ambos responsáveis pela obtenção do valor de rigidez da ligação viga-coluna dos modelos em análise.

TABELA 4.8 - Deslocamentos máximos liberados e cargas últimas encontradas.

	Deslocamento (mm)	Carga última (kN)
NC3-42x88	24,159	2,933
NC3-50x105	31,471	4,104
NC3-50x120	32,534	4,835

Estes modelos numéricos, assim como os das colunas “C1” e “C2”, ultrapassaram o limite de escoamento do aço na análise realizada. A Figura 4.21 exibe a distribuição de tensões (*von Mises*) para os modelos da coluna “C3” e, em seguida, suas peças (coluna, viga e garra) são analisados separadamente em termos de tensões.

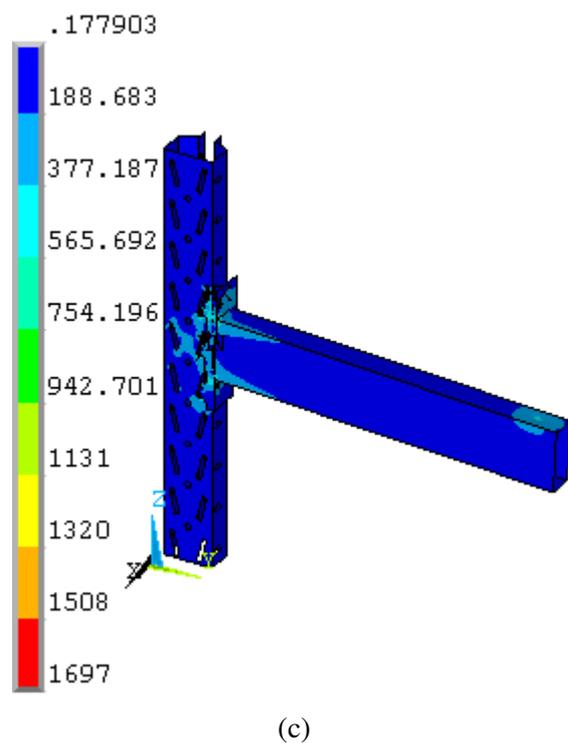
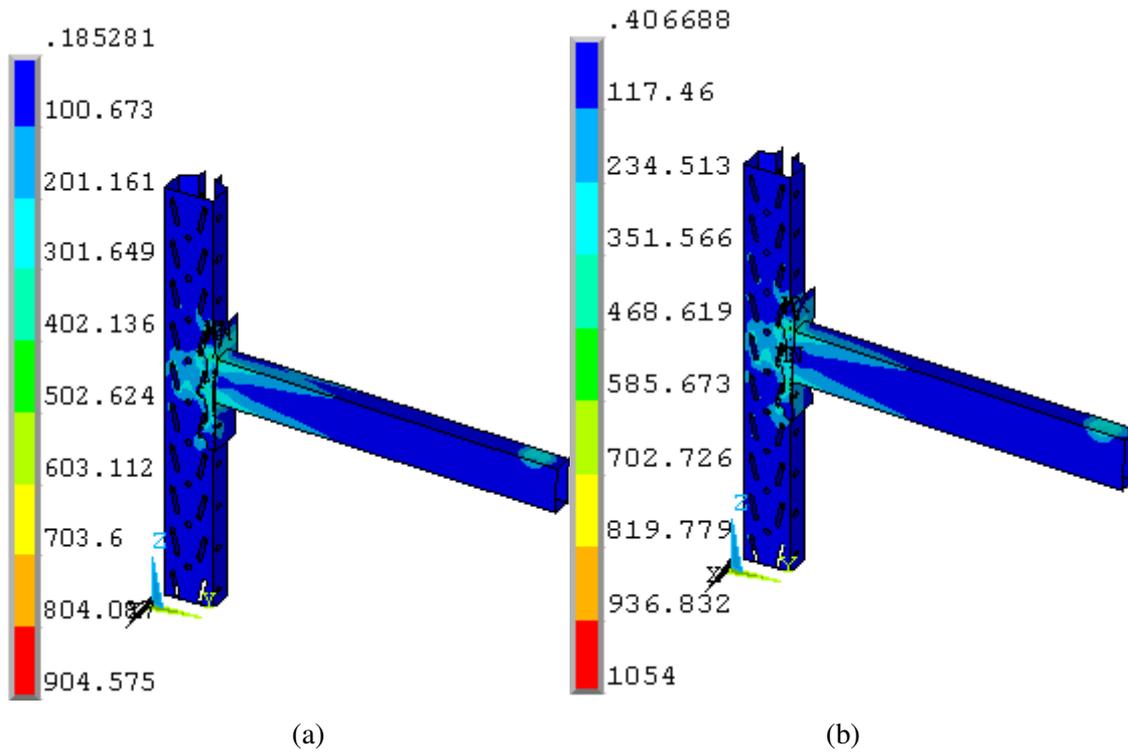
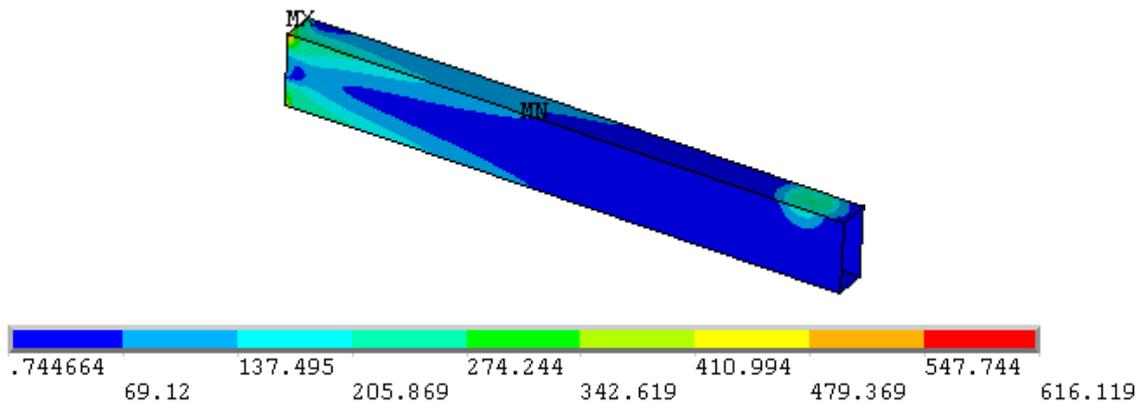


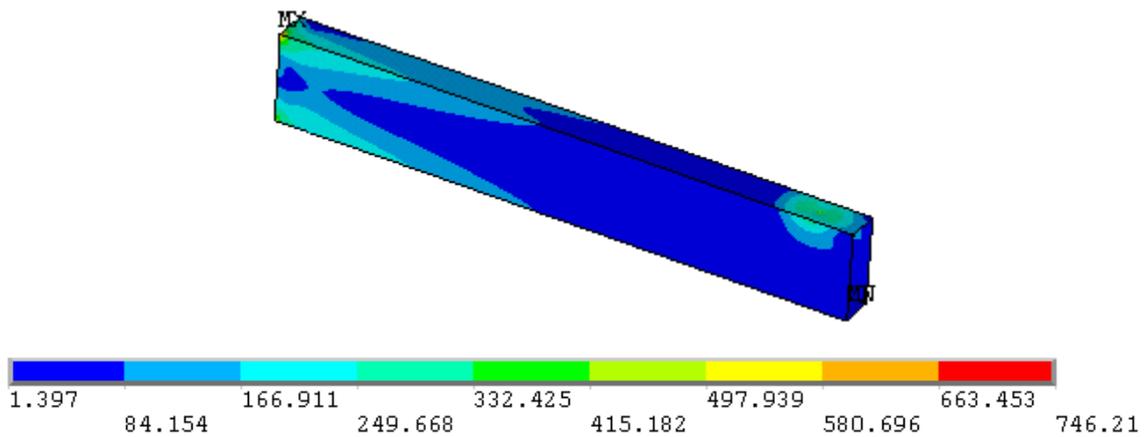
FIGURA 4.21 - Distribuição das tensões (*von Mises*) para os modelos; (a) NC3-42x88; (b) NC3-50x105; (c) NC3-50x120 (Escala de representação: 1,5).

a) Vigas

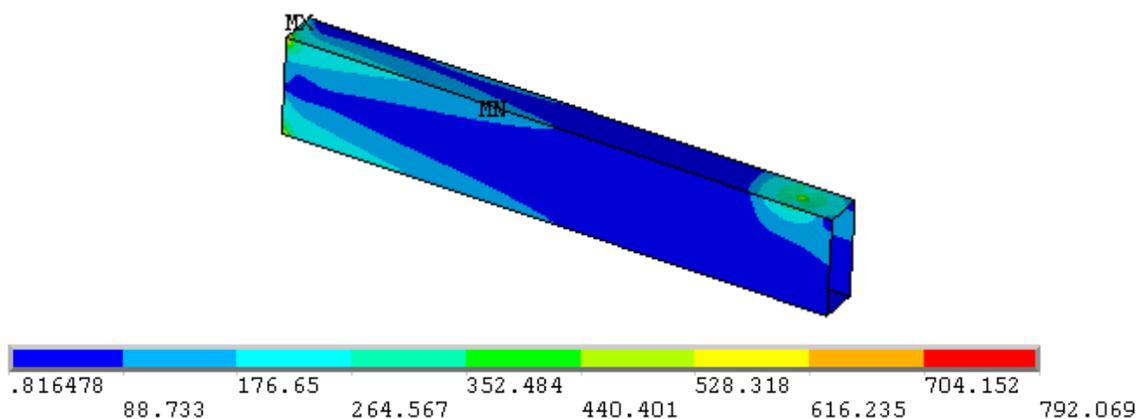
O aço das vigas dos modelos referentes à coluna “C3” possui limite de escoamento igual a 250 MPa. Na Figura 4.22, vê-se que as tensões nas vigas ultrapassaram o seu limite de escoamento, sendo os valores iguais a 616,119, 746,21 e 792,069 MPa para os modelos NC3-42x88, NC3-50x120 e NC3-50x120, respectivamente. Igualmente aos modelos apresentados anteriormente, pode-se observar que os pontos onde as tensões são mais elevadas são: no ponto de liberação do deslocamento vertical (ponto prescrito pelo RMI para aplicação da carga por meio do ensaio do *Cantilever Test*) e na extremidade da viga onde ocorre a conexão com a garra. Atenta-se que o comportamento das vigas é semelhante, apesar de que a viga “50x120” (por apresentar maior inércia) absorveu tensões mais altas nos pontos citados anteriormente.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.22 - Distribuição das tensões (*von Mises*) para as vigas dos modelos: (a) NC3-42x88; (b) NC3-50x105; (c) NC3-50x120 (Escala de representação: 1,5).

b) Garras

O limite de escoamento (f_y) do aço das garras dos modelos NC3-42x88, NC3-50x105 e NC3-50x120 é de 210 MPa. As tensões sofridas pelas garras são 481,196 MPa, 557,89 MPa e 659,512 MPa para os modelos NC3-42x88, NC3-50x105 e NC3-50x120, respectivamente. Pode-se observar pela figura 4.23 que tais tensões se localizam na região tracionada e comprimida da garra e que seus “dentes” absorveram uma parcela muito pequena das tensões devido ao acoplamento realizado entre seus nós externos e alguns nós externos da coluna. Conclui-se, também, que o comportamento das três garras foi semelhante.

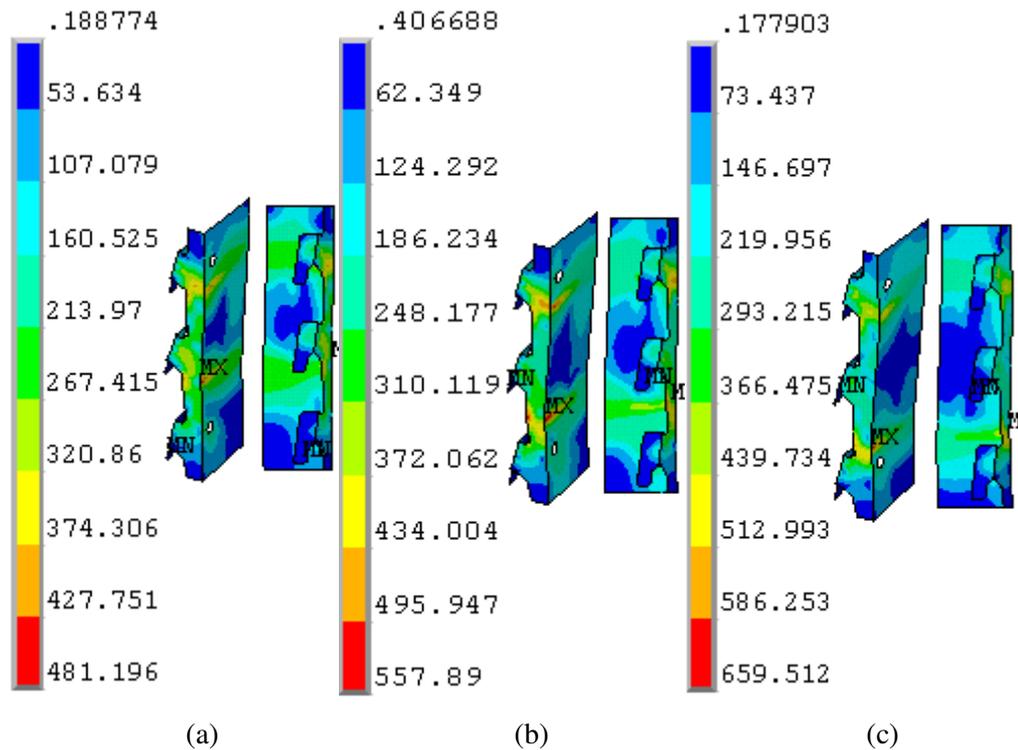


FIGURA 4.23 – Distribuição de tensões (*von Mises*) para as garras dos modelos: (a) NC3-42x88; (b) NC3-50x105; (c) NC3-50x120 (Escala de representação: 1,5).

c) Colunas

A Figura 4.24 apresenta a distribuição de tensões para as colunas dos modelos NC3-42x88, NC3-50x105 e NC3-50x120. Os valores máximos alcançados por elas, respectivamente, foram de 904 MPa, 1054 MPa e 1697 MPa, ultrapassando o limite de escoamento de seu aço ($f_y=413,59$ MPa). Vê-se, na Figura 4.24, que as maiores concentrações de tensões nas colunas foram na região dos furos laterais da coluna (principalmente o superior por estar tracionado) e na região interna da alma devido à força que o “dente” superior da garra exerce sobre o rasgo superior da coluna.

Conclui-se, ainda, que a coluna do modelo NC2-50x105 apresentou a maior distribuição de tensões em relação aos demais modelos.

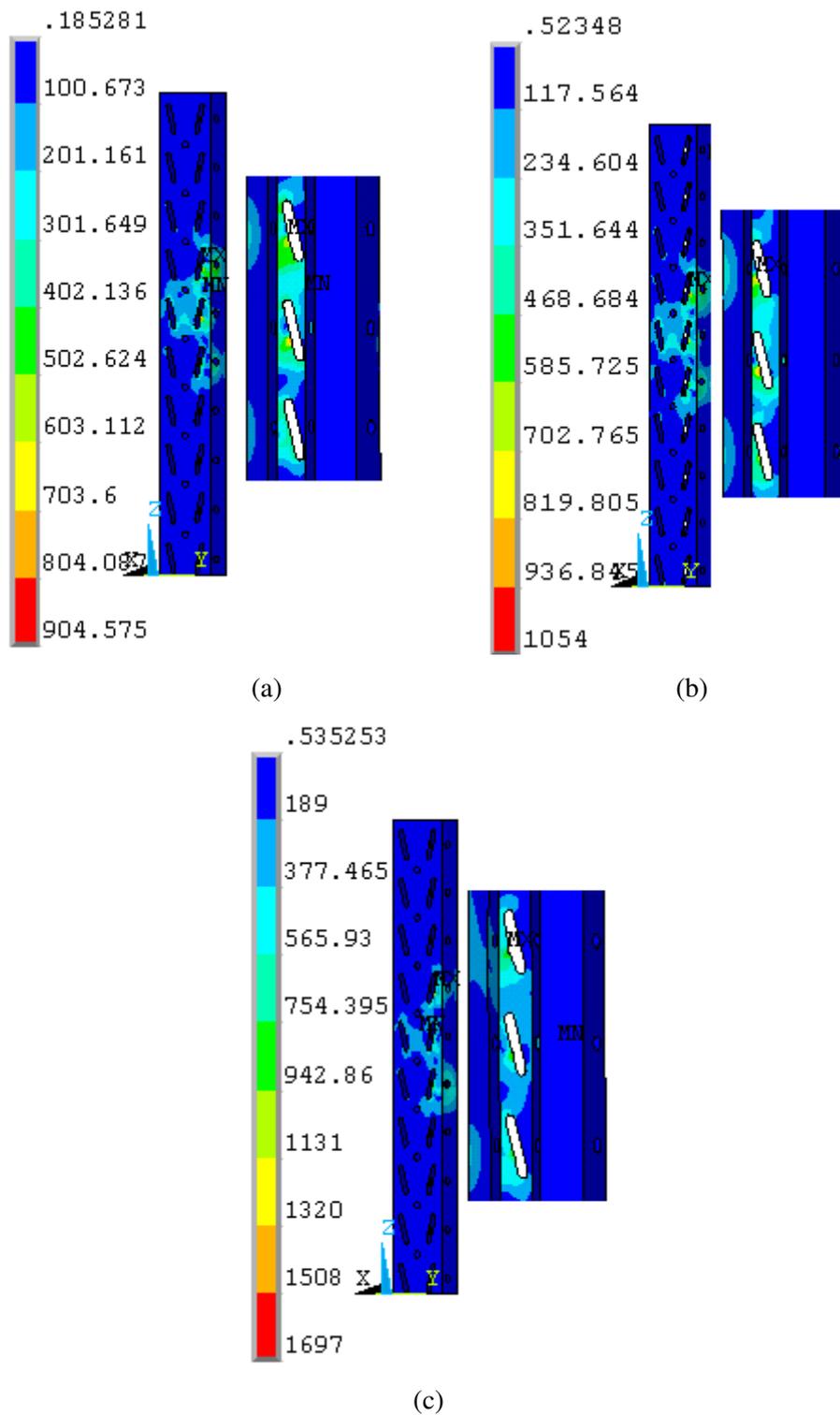


FIGURA 4.24 - Distribuição das tensões (von Mises) para as colunas dos modelos: (a) NC3-42x88; (b) NC3-50x105; (c) NC3-50x120 (Escala de representação: 1,5).

Rigidez da ligação

Com base nos resultados obtidos pela análise numérica do ensaio *Cantilever Test* e no método de controle de deslocamentos, a curva carga-deslocamento (FIGURA 4.25) foi construída.

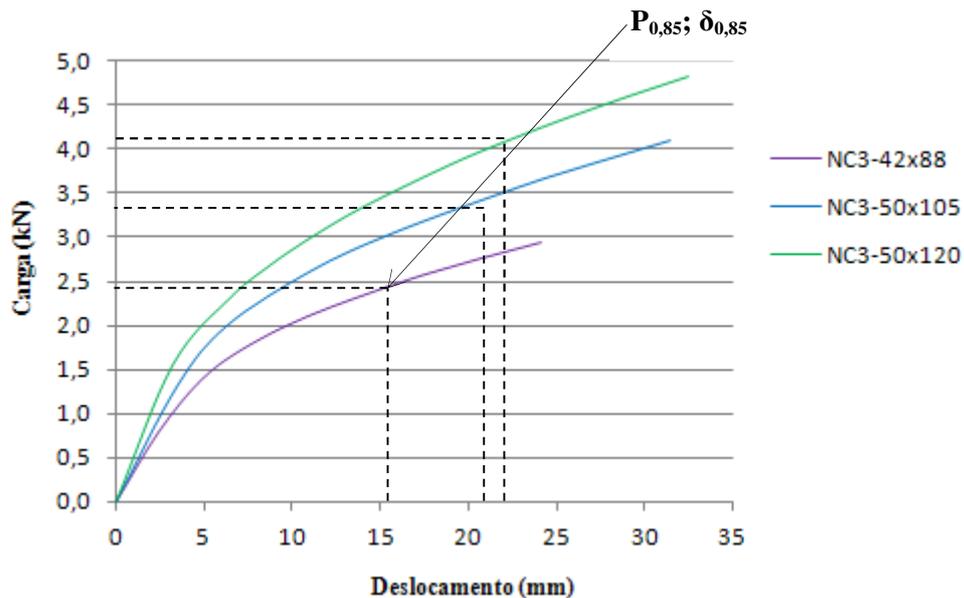


FIGURA 4.25 - Curva carga x deslocamento da ligação dos modelos NC3-42x88, NC3-50x105 e NC3-50x120.

Assim como nos modelos da coluna “C1”, o NC-50x120 foi o que apresentou a maior rigidez. Cabe também destacar que a rigidez dos modelos é maior quanto maior a inércia de suas vigas. A Tabela 4.9 apresenta os valores das rigidezes obtidas segundo a equação (3.3) (RMI, 2008).

TABELA 4.9 - Rigidezes encontradas para os dois modelos da coluna “C3” por meio da equação (3.3).

Modelo	$P_{0,85}$ (kN)	$\delta_{0,85}$ (mm)	F (kNm/rad)
NC3-42x88	2,493	16,13	61,525
NC3-50x105	3,489	21,570	66,808
NC3-50x120	4,110	22,227	75,653

A seguir, é apresentado um quadro resumo (TABELA 4.10) contendo todos os resultados dos nove modelos numéricos estudados e apresentados neste capítulo.

TABELA 4.10 - Resultados dos modelos das ligações viga-coluna analisados numericamente neste capítulo.

Modelo	P_{0,85} (kN)	δ_{0,85} (mm)	F (kNm/rad)
NC1-42x88	2,230	14,76	68,330
NC1-50x105	3,233	17,25	83,026
NC1-50x120	3,861	17,200	99,915
NC2-42x88	2,469	14,510	76,759
NC2-50x105	2,598	13,370	83,873
NC2-50x120	2,519	14,750	70,635
NC3-42x88	2,493	16,130	61,525
NC3-50x105	3,489	21,570	66,808
NC3-50x120	4,110	22,227	75,653

Pela tabela acima, pode-se concluir de uma maneira geral (exceto para o modelo NC2-50x120, que apresentou uma rigidez abaixo dos modelos NC2-42x88 e NC2-50x105) que aumentando a inércia das vigas, as rigidezes das ligações viga-coluna são aumentadas para um mesmo tipo de coluna.

Capítulo 5

APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

Os valores de rigidez dos modelos numéricos da ligação viga-coluna dos sistemas de armazenagem tipo *porta-pallets* obtidos neste trabalho (capítulo 4) são comparados a seguir com os valores experimentais apresentados no capítulo 3. Além disso, as cargas, os deslocamentos e o modo de falha dos modelos numéricos também são avaliados e comparados com os valores experimentais. Em seguida, é feita uma discussão com relação à metodologia utilizada para determinação da rigidez da ligação.

5.1. Comparação dos resultados experimentais e numéricos

A seguir, serão comparados os respectivos resultados dos modelos experimentais e numéricos.

5.1.1. *C1-42x88 (2) x NC1-42x88; C1-50x105 (3) x NC1-50x105; C1-50x120 (2) x NC1-50x120.*

Na FIGURA 5.1, pode-se ver o comportamento global dos modelos C1-42x88 (2) x NC1-42x88 e conclui-se que ele se deu de forma semelhante. Os outros dois modelos numéricos e experimentais da coluna “C1” também apresentaram tal configuração. Devido à carga aplicada na viga, o momento gerado na ligação viga-coluna tracionou a garra na sua parte superior (abrindo a garra) e comprimiu na inferior (fechando a garra), fazendo com que a garra apresentasse a forma de “S” nos resultados experimentais e numéricos (FIGURA 5.2).

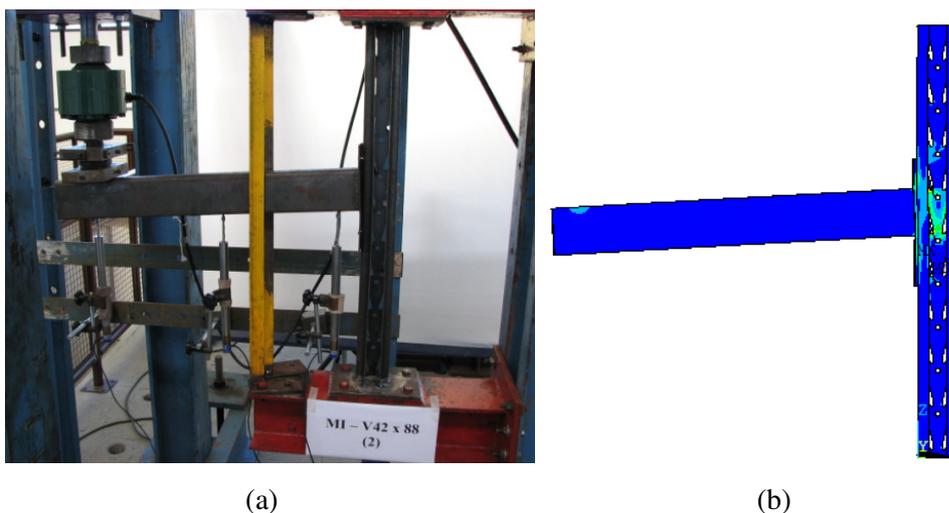


FIGURA 5.1 – Deslocamento final dos modelos: (a) experimental (C1-42x88) (2); (b) numérico (NC1-42x88), após análises concluídas (Escala de representação: 1).

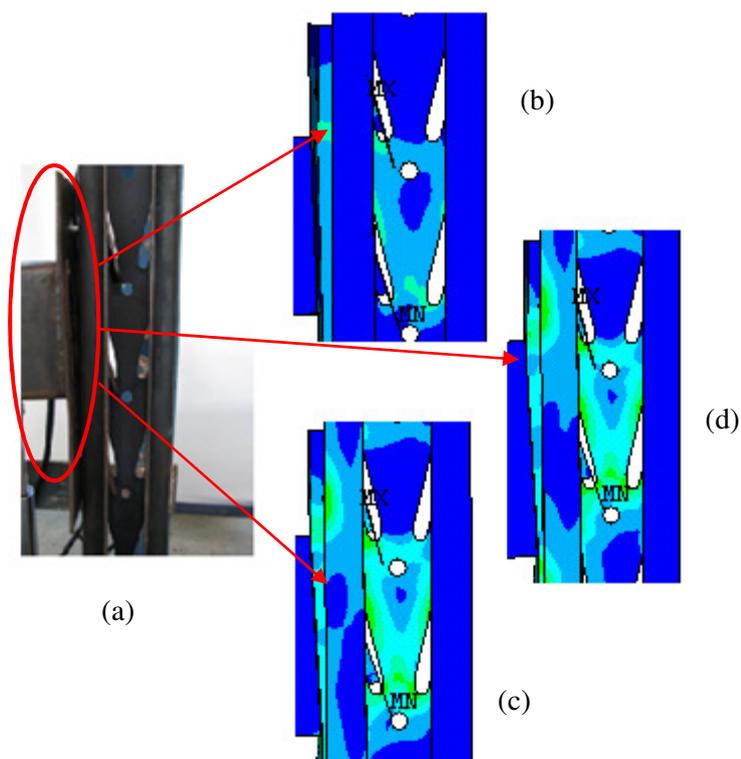


FIGURA 5.2 - Detalhe da abertura (“S”) da parte superior da garra da ligação viga-coluna dos modelos: (a) experimental (abertura típica dos três modelos); (b) NC1-42x88; (c) NC1-50x105; (d) NC1-50x120 (Escala de representação: 1,5).

O modo de falha da ligação dos modelos experimentais referentes à coluna “C1” se deu pela abertura do “dente” superior da garra na ordem de 4-6mm (os demais permaneceram inalterados), fazendo com que a carga última fosse assim estabelecida.

Para os modelos numéricos, a carga última foi obtida ao se atingir o deslocamento imposto na análise. A seguir, são apresentadas as curvas carga-deslocamento (FIGURA 5.3) dos modelos numéricos e experimentais referentes à coluna “C1”. A Tabela 5.1 expõe os resultados quanto à carga última e o respectivo deslocamento último. São exibidos também os valores das rigidezes experimentais e numéricas obtidos segundo a equação 3.3 proposta pelo RMI.

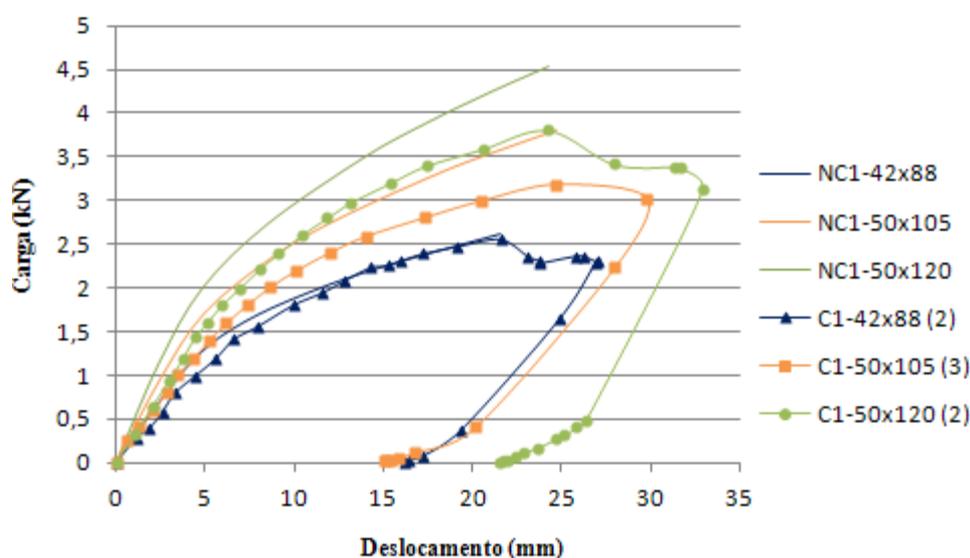


FIGURA 5.3 - Curva carga-deslocamento dos modelos numéricos x experimentais relativos à coluna “C1”.

TABELA 5.1 - Comparação dos principais valores encontrados através das prescrições do RMI para os modelos experimentais e numéricos referentes à coluna “C1”.

MODELO	$P_{exp.}$ (kN)	$P_{num.}$ (kN)	$P_{exp.,85\%}$ (kN)	$P_{num.,85\%}$ (kN)	$\delta_{exp.}$ (mm)	$\delta_{num.}$ (mm)	$\delta_{exp.,85\%}$ (mm)	$\delta_{num.,85\%}$ (mm)	F (kNm/rad) (R.F.=1)
C1-42x88 (2)	2,560	-	2,176	-	21,614	-	13,714	-	72,566
NC1-2x88	-	2,623	-	2,230	-	21,614	-	14,760	68,330
C1-50x105 (3)	3,182	-	2,705	-	24,677	-	15,796	-	74,647
NC1-50x105	-	3,803	-	3,233	-	24,677	-	17,250	83,026
C1-50x120 (2)	3,810	-	3,239	-	24,251	-	15,754	-	90,032
NC1-50x120	-	4,542	-	3,861	-	24,251	-	17,200	99,915

Pode-se observar que os valores de rigidez dos modelos numéricos e experimentais são próximos. É de fácil percepção que os modelos numéricos possuem uma maior inclinação da curva carga x deslocamento ao longo de suas trajetórias em relação aos modelos experimentais, o que acarretou uma maior rigidez dos primeiros. A

maior rigidez numérica é explicada pela necessidade de acoplamento de nós da garra com nós da coluna para evitar o movimento de corpo rígido do modelo.

5.1.2. *C2-42x88 (1) x NC2-42x88; C2-50x105 (1) x NC2-50x105; C2-50x120 (2) x NC2-50x120*

Da mesma maneira que os modelos da coluna “C1”, os modelos experimentais e numéricos da coluna “C2” também apresentaram comportamentos globais aproximados em termos de deslocamento final da ligação (FIGURA 5.4) e deformabilidade da garra (FIGURA 5.5). O segundo deu-se pela tração (parte superior) e compressão (parte inferior) aplicados na garra devido ao momento gerado pela carga a qual a viga foi submetida, deixando a garra com a forma de um “S”, o que ocorreu nos modelos experimentais e numéricos.

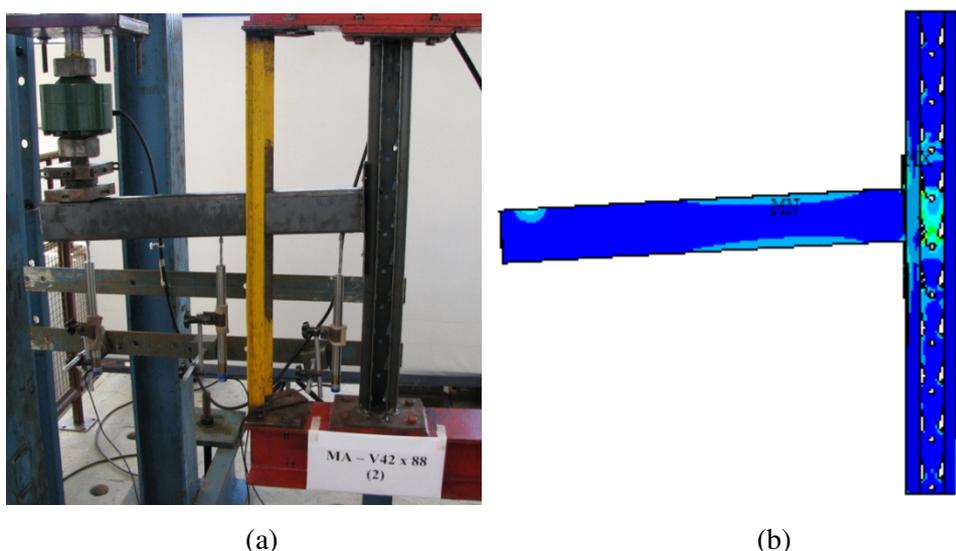


FIGURA 5.4 - Deslocamentos finais dos modelos: (a) experimental (comportamento típico dos três modelos); (b) numérico (comportamento típico dos três modelos), após simulações realizadas (Escala de representação: 1).

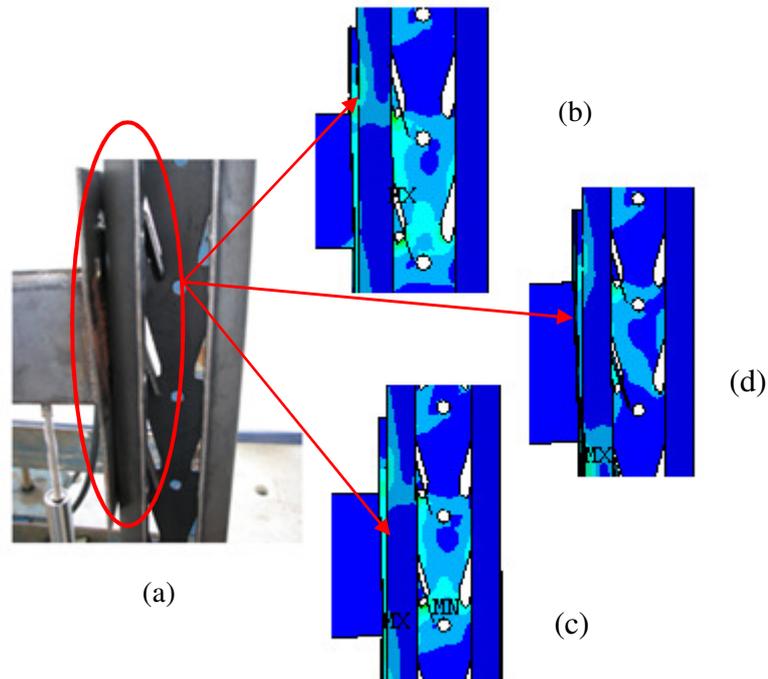


FIGURA 5.5 - Detalhe da abertura (“S”) da parte superior da garra da ligação viga-coluna dos modelos: (a) experimental (abertura típica dos três modelos); (b) NC2-42x88; (c) NC2-50x105; (d) NC2-50x120 (Escala de representação: 1,5).

Sobre o modo de falha, para o modelo experimental, assim como nos modelos referentes à coluna “C1”, ele se deu por meio da abertura do “dente” superior da garra após o carregamento na viga, que tracionou a garra na parte superior e comprimiu na inferior. A deformação do “dente” superior foi de 4 a 6mm. Alcançada tal deformação, a carga e os deslocamentos últimos foram encontrados. Para os modelos numéricos referentes à coluna “C2”, não foi possível determinar se os “dentes” superiores se deformariam como nos modelos experimentais, devido ao acoplamento dos nós da garra e da coluna descrito anteriormente. Para esse tipo de análise, o modo de falha deve ser baseado somente no escoamento do aço dos elementos dos modelos numéricos. A carga última para esses modelos é obtida quando o deslocamento máximo é atingido. A seguir, são apresentadas as comparações dos principais resultados dos modelos numéricos e experimentais referentes à coluna 2 (“C2”) (TABELA 5.2) e suas curvas carga-deslocamento (FIGURA 5.6).

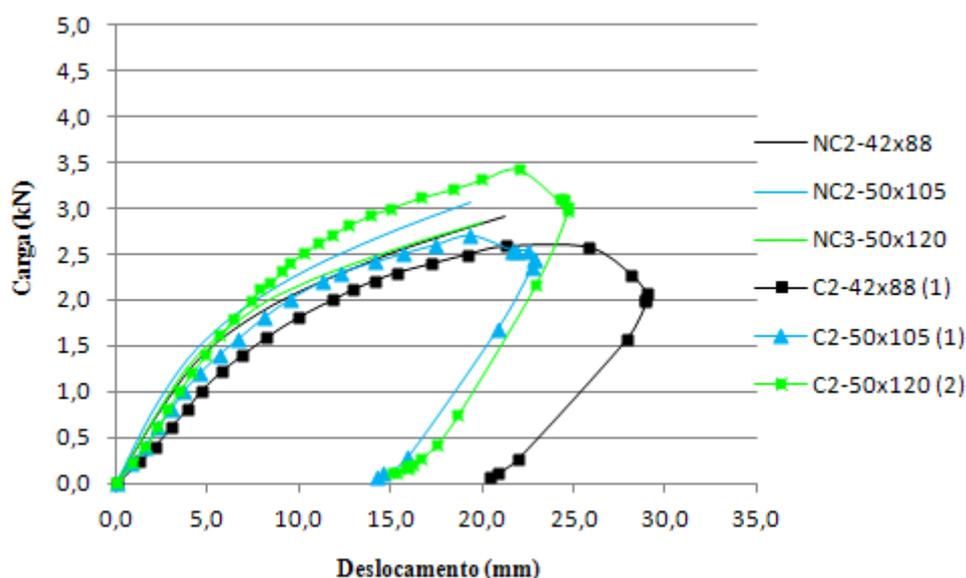


FIGURA 5.6 - Curva carga-deslocamento dos modelos numéricos x experimentais relativos à coluna “C2”.

TABELA 5.2 - Comparação dos principais valores encontrados com as prescrições do RMI para os modelos experimentais e numéricos referentes à coluna “C2”.

MODELO	$P_{exp.}$ (kN)	$P_{num.}$ (kN)	$P_{exp.,85\%}$ (kN)	$P_{num.,85\%}$ (kN)	$\delta_{exp.}$ (mm)	$\delta_{num.}$ (mm)	$\delta_{exp.,85\%}$ (mm)	$\delta_{num.,85\%}$ (mm)	F (kNm/rad) (R.F.=1)
C2-42x88 (1)	2,585	-	2,197	-	21,323	-	13,948	-	69,422
NC2-42x88	-	2,905	-	2,469	-	21,323	-	14,510	76,759
C2-50x105 (1)	2,699	-	2,294	-	19,364	-	12,239	-	81,812
NC2-50x105	-	3,056	-	2,598	-	19,364	-	13,370	83,873
C2-50x120 (2)	3,418	-	2,905	-	22,024	-	13,823	-	89,209
NC2-50x120	-	2,964	-	2,519	-	22,024	-	14,750	70,635

Os modelos numéricos apresentam uma inclinação do trecho inicial maior que a dos modelos experimentais, exceto para os modelos referentes às vigas 50x105. No segundo trecho, todos os modelos numéricos indicaram uma inclinação mais elevada que os experimentais, exceto também para os modelos da viga 50x105, o que acarretou seu menor valor de rigidez em relação ao experimental. A maior rigidez inicial dos modelos numéricos é justificada pela necessidade de acoplamento dos nós da garra com nós da coluna, para evitar problemas de convergência. De uma maneira geral, pode-se afirmar que os modelos numéricos e experimentais obtiveram resultados semelhantes.

5.1.3. Modelos: C3-42x88 (1) x NC3-42x88; C3-50x105 (1) x NC3-50x105; C3-50x120 (2) x NC3-50x120

Estes modelos numéricos e experimentais referentes à coluna “C3” também apresentaram comportamentos globais aproximados em termos de deslocamento final da ligação (FIGURA 5.7). Assim como os modelos das colunas “C1” e “C2”, a deformabilidade foi resultado do momento gerado na ligação viga-coluna pelo carregamento aplicado na viga, que tracionou a parte superior e comprimiu a parte inferior da garra. Devido ao momento em questão, a garra ficou com a forma de um “S” (FIGURA 5.8).

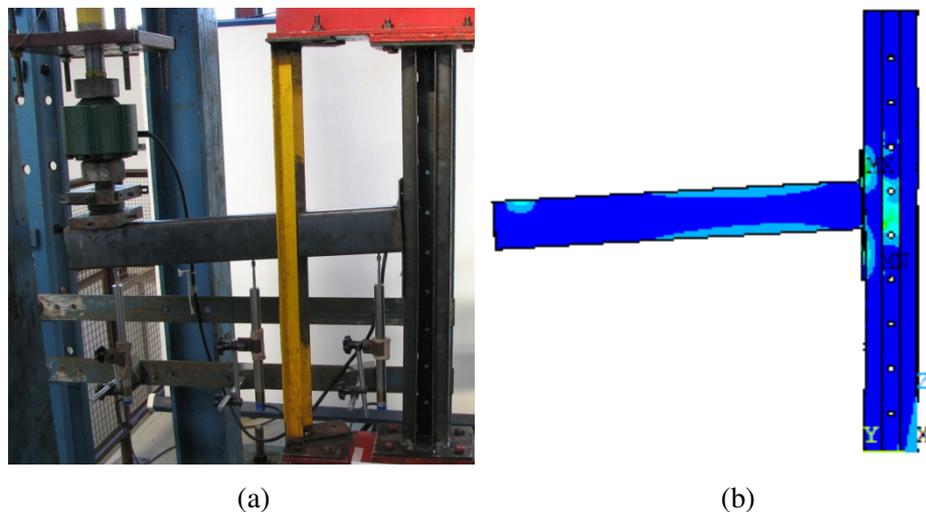


FIGURA 5.7 - Deslocamentos finais dos modelos: (a) experimental (comportamento típico dos dois modelos); (b) numérico (comportamento típico dos dois modelos), após simulações realizadas.

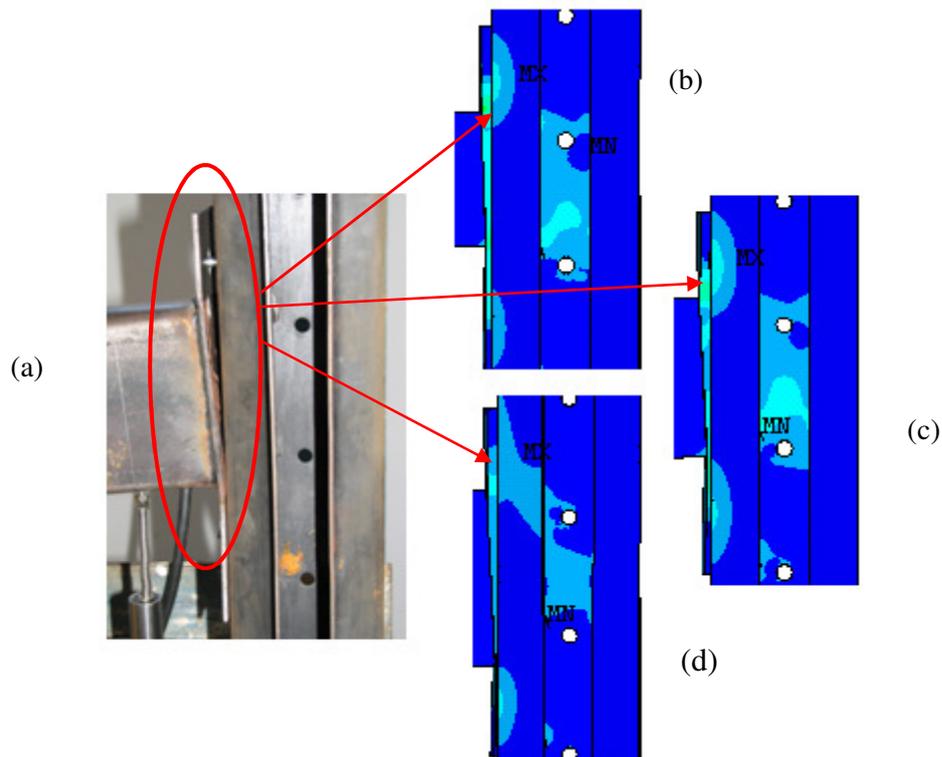


FIGURA 5.8 - Detalhe da abertura (“S”) da parte superior da garra da ligação viga-coluna dos modelos: (a) experimental (abertura típica dos três modelos); (b) NC3-42x88; (c) NC3-50x105; (d) NC3-50x120.

Os modelos experimentais da coluna “C3” apresentaram como modo de falha a abertura do “dente” superior da garra visto nos modelos anteriores das colunas “C1” e “C2”. A deformação do “dente” superior foi entre 4-6mm e foi o critério usado para a paralisação do ensaio e, assim, as cargas e deslocamentos últimos puderam ser obtidos. Tal deformação não ocorreu nos modelos numéricos da coluna “C3”, pois o acoplamento realizado entre os nós da garra e da coluna para evitar o movimento de corpo rígido impediu que isso acontecesse. No modelo numérico, o valor de sua carga última foi obtida quando o deslocamento máximo da ligação imposto foi alcançado. Pode-se observar, na Tabela 5.3 e Figura 5.9, as comparações dos principais resultados dos modelos numéricos e experimentais e sua curva carga-deslocamento.

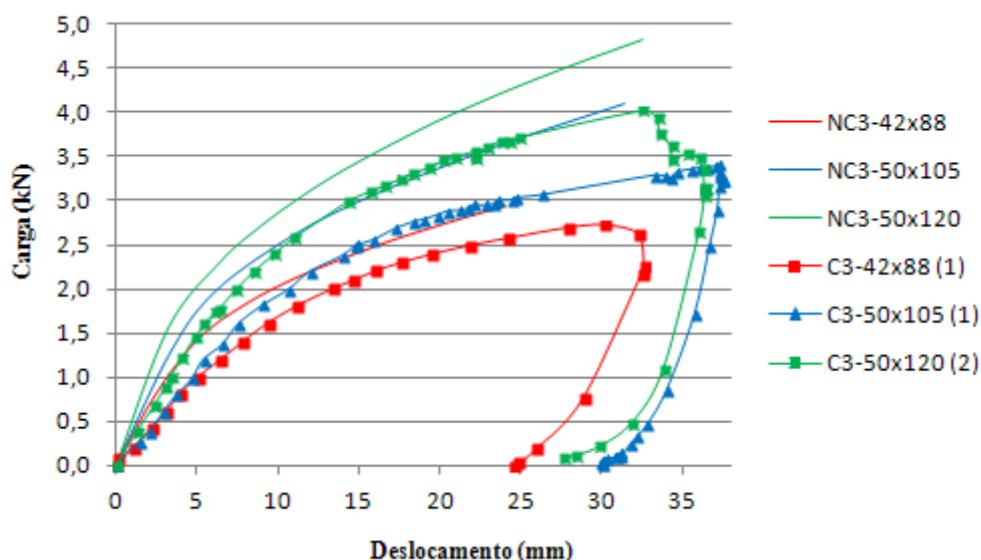


FIGURA 5.9 - Curva carga-deslocamento dos modelos numéricos x experimentais relativos à coluna “C3”.

TABELA 5.3 - Comparação dos principais valores encontrados através das prescrições do RMI para os modelos experimentais e numéricos referentes à coluna “C3”.

MODELO	$P_{exp.}$ (kN)	$P_{num.}$ (kN)	$P_{exp.,85\%}$ (kN)	$P_{num.,85\%}$ (kN)	$\delta_{exp.}$ (mm)	$\delta_{num.}$ (mm)	$\delta_{exp.,85\%}$ (mm)	$\delta_{num.,85\%}$ (mm)	F (kNm/rad) (R.F.=1)
C3-42x88 (1)	2,579	-	2,192	-	24,159	-	15,801	-	59,277
NC3-42x88	-	2,933	-	2,493	-	24,159	-	16,300	61,525
C3-50x105 (1)	3,291	-	2,797	-	33,278	-	19,091	-	59,907
NC3-50x105	-	4,104	-	3,489	-	31,471	-	21,570	66,808
C3-50x120 (2)	4,028	-	3,424	-	32,534	-	19,779	-	70,374
NC3-50x120	-	4,835	-	4,110	-	32,534	-	22,227	75,653

Assim como nos modelos das colunas 1 e 2, os modelos da coluna “C3” numéricos demonstraram uma maior rigidez em relação aos modelos experimentais. A inclinação das curvas numéricas é mais acentuada que a das experimentais. Esse comportamento faz com que as cargas últimas e os deslocamentos a 85% inseridas na equação (3.3) sejam elevados, aumentando o valor das rigidezes. Novamente, observa-se que os resultados dos modelos numérico e experimental apresentaram resultados próximos, validando os modelos desenvolvidos.

A seguir, é apresentado um quadro resumo (TABELA 5.4), comparando as rigidezes encontradas dos modelos experimentais e numéricos baseados nas prescrições do RMI (2008).

TABELA 5.4 - Comparação das rigidezes encontradas para os modelos experimentais e numéricos segundo RMI.

RIGIDEZ (kNm/rad)			
Coluna	Viga	Experimental	Numérico
Coluna 1 (C1)	42x88	72,566	68,330
	50x105	74,647	83,026
	50x120	90,032	99,915
Coluna 2 (C2)	42x88	69,422	76,759
	50x105	81,812	83,873
	50x120	89,209	70,635
Coluna 3 (C3)	42x88	59,277	61,525
	50x105	59,907	66,808
	50x120	70,374	75,653

Pela tabela acima, conclui-se que, assim como nos modelos experimentais, as rigidezes das ligações viga-coluna dos modelos numéricos são ampliadas de acordo com o aumento das inércias das vigas para um mesmo tipo de coluna (exceto para os modelos destacados na tabela acima). Os valores encontrados para as rigidezes dos modelos numéricos a 85% da carga última e seu respectivo deslocamento último apresentaram uma diferença de 8 a 10% em relação aos resultados experimentais.

Vale ressaltar que, para alcançar os resultados numéricos aqui discutidos, os parâmetros da equação 3.3 (comprimento da viga e da coluna) prescritos pelo RMI não podem ser alterados. A altura da coluna (L_c), se modificada, não altera os resultados das rigidezes em grandes proporções, mas os comprimentos da viga (L_b) transformam significativamente as rigidezes caso variem. As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam o comprimento máximo da viga (696mm) e, por meio delas, observa-se que há um falso aumento de rigidez para valores maiores do comprimento da viga, bem como a pouca influência da rigidez da coluna para os casos analisados neste trabalho.

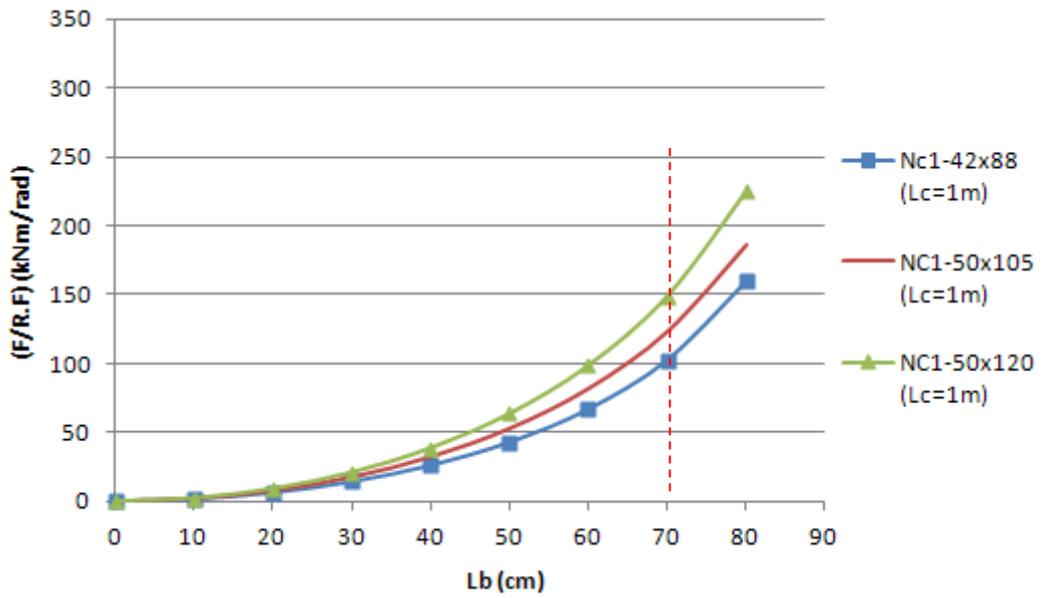


FIGURA 5.10 - Gráfico “F/R.F. x L_b”. Comprimento máximo permitido para a viga da ligação dos modelos da coluna C1.

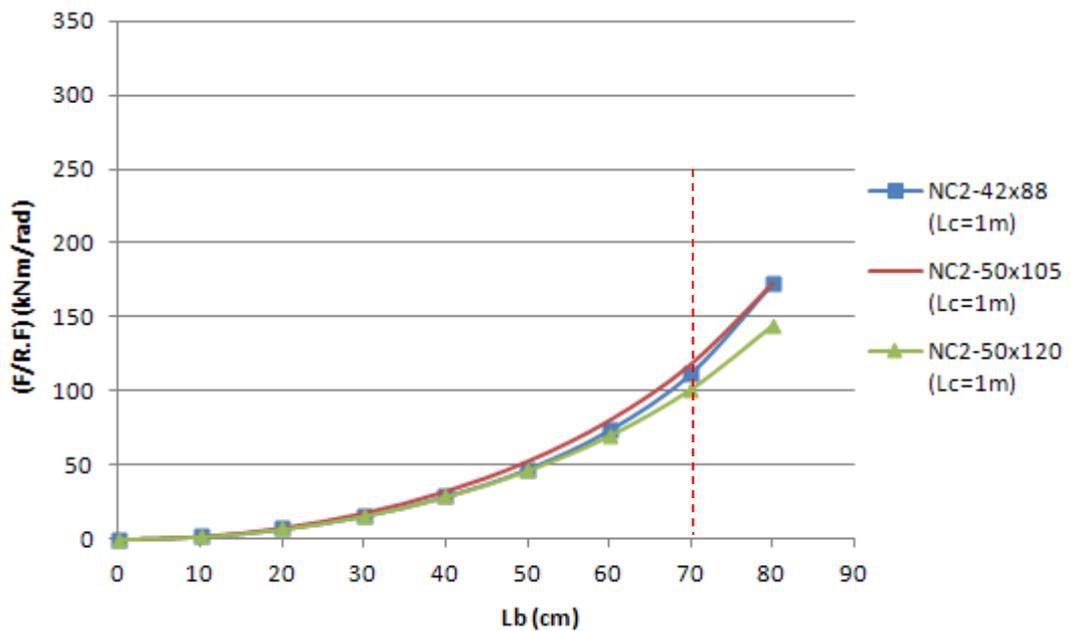


FIGURA 5.11 - Gráfico “F/R.F. x L_b”. Comprimento máximo permitido para a viga da ligação dos modelos da coluna C2.

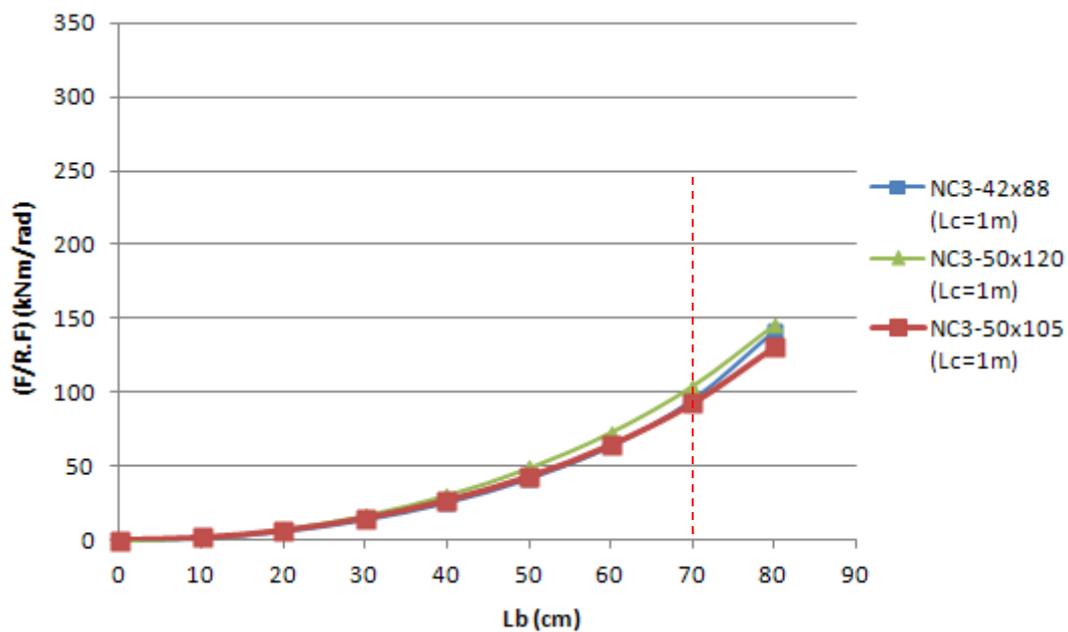


FIGURA 5.12 - Gráfico “F/R.F. x L_b”. Comprimento máximo permitido para a viga da ligação dos modelos da coluna C3.

Capítulo 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade de utilizar a modelagem numérica para descrever o comportamento, o mecanismo de falha e a rigidez de ligações viga-coluna de sistemas de armazenagem industrial do tipo *porta-pallets*. As análises utilizaram modelos numéricos desenvolvidos em elementos finitos por meio do *software* comercial *Ansys 11.0*.

Foram avaliados nove modelos numéricos considerando três colunas diferentes combinadas com três tipos de vigas. Os modelos analisados foram ensaiados anteriormente no Laboratório de Estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias, do Departamento de Engenharia Civil, da Escola de Minas, da Universidade Federal de Ouro Preto.

As simulações consideraram elementos de cascas com quatro nós e seis graus de liberdade por nó para simular a coluna, a viga e a garra. Para simular o contato entre a coluna e a garra, foram utilizados elementos de contato com três graus de liberdade por nó. Para as condições de contorno, reproduziu-se o engaste representado no ensaio experimental. Para reproduzir os pinos de segurança e viabilizar a análise numérica, foram acoplados nós da garra com nós da coluna. O carregamento foi aplicado a com base no controle de deslocamento localizado na extremidade da viga na posição definida pelos ensaios.

Os modelos indicaram com relação às tensões e às deformações valores compatíveis com os limites do material usado, recomendando a plastificação na região de união por solda entre a viga e a garra, na região dos furos da coluna onde há o contato com a garra e na própria garra, caracterizando o mecanismo de falha observado nos experimentos.

As análises numéricas mostraram uma menor contribuição da coluna na rigidez da ligação e que a mesma é fortemente influenciada pela garra utilizada na conexão

entre a viga e a coluna.

Com relação ao modo de falha, observou-se que, em todos os casos analisados, o modo de falha encontrado no modelo numérico foi o mesmo do experimental. Destaca-se que o modelo, apesar de restringido pelo acoplamento dos nós para viabilizar a análise, expôs a deformabilidade da garra e sua forte influência no comportamento da ligação.

No tocante à determinação do valor de rigidez das ligações, observa-se que a equação proposta pelo RMI (equação 3.3) possui três parcelas que contribuem para a avaliação da rigidez da ligação considerada. A primeira leva em conta os valores obtidos experimentalmente, portanto, o valor real total do deslocamento ou rotação da ligação; a segunda considera a relação rotação momento a meia altura da coluna (obtida a partir de uma coluna biengastada com carga momento a sua meia altura); e a terceira parcela, a relação rotação momento relativa a uma viga engastada e apoiada com carga concentrada. Assim, da rotação real total determinada experimentalmente, é retirada a parcela relativa a rotação da coluna e da viga de modo a obter o valor da rigidez da ligação. Nota-se, porém, que todas as parcelas que compõem a ligação consideram a linearidade geométrica e física do modelo e do material, respectivamente. No entanto, os resultados experimentais indicam uma não linearidade do comportamento da ligação que é também representada no modelo numérico.

Os valores numéricos obtidos para a rigidez a 85% das cargas e dos deslocamentos últimos e a linearização das análises, considerando a relação direta entre carga e deslocamento, apresentaram bons resultados quando os valores numéricos e experimentais são comparados. A diferença entre ambos não ultrapassou 10%.

Observou-se, também, que o modelo teórico do RMI é influenciado pelo comprimento da viga. Portanto, valores de comprimento diferentes (maiores) que os adotados influenciariam fortemente na avaliação da rigidez, gerando valores que não representariam a realidade da ligação.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se um estudo paramétrico para avaliar a rigidez da ligação, considerando a variação da tipologia de elementos, a fim de desenvolver modelo numérico do ensaio *Cantilever Test* por meio de “APDL” e avaliar a influência da solda da ligação garra-viga.

Referências bibliográficas

ÁGUIA. Águia Sistemas de Armazenagem Ltda., 2011. Disponível em: <<http://www.aguiasistemas.com.br>>.

AGUIRRE, C., 2005. Seismic Behavior of Rack structures. Journal of Constructional Steel Research, Vol.61, p.607-624.

AISI, 1996. Cold Formed Steel Design Manual. American Iron and steel Institute, Washington, DC.

ALTAMIRA. Altamira Indústria Metalúrgica, 2011. Disponível em: <<http://www.altamira.com.br>>.

AS 4084, 1993. Steel Storage Racking Standards Association of Australia.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MOVIMENTAÇÃO E LOGÍSTICA, 2011. Disponível em: <<http://www.abml.org.br>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762:2010: *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15524:2007: *Sistemas de armazenagem: Diretrizes para o uso de estruturas tipo Porta-Pallets seletivos.*

BALDASSINO, N.; BERNUZZI, C., 2000. Analysis and Behavior of Steel Storage Pallet Racks. Thin-Walled Structures, v.37, p. 277-304.

BS 499, 1969. Specifications for the Use of Cold Formed Steel in Building. British Standards Institution.

BS 499, 1975. Specifications for the Use of Cold Formed Steel in Building. British Standards Institution, Addendum nº1.

Beale, R. G.; Godley, M. H. R., 2004. Sway analysis of Spliced pallet rack structures Computers and Structures, v.82, p.2145-2156.

BERTOLINI. Bertolini Sistemas de Armazenagem, 2011. Disponível em: <<http://www.bertolini.com.br>>.

CAMPOS, S. R., 2003. Estudo Teórico-Experimental de sistemas de armazenagem industrial tipo Drive-in. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

DAVIES, J. M.; LEACH, P.; TAYLOR, A., 1997. The Design of Cold-Formed Steel Sections Subject to axial Load and Bending. Thin-Walled Structures, v.29, p.141-157.

ESMENA. Esmena Portugal Sistemas de Armazenagem, 2011. Disponível em: <<http://www.esmenapt.pt>>.

EUROCODE, 2005. Design of Steel Structures. General requirements, Mai.

FEM, 2000. Recommendation for the design of steel. Pallet Racking and shelving. Section X of the Federation Europeene de la Manutention.

FIEL. Fiel S.A. Móveis e Equipamentos Industriais, 2011. Disponível em: <<http://www.fiel.com.br>>.

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

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

HARRIS, E.; HANCOCK, G. J., 2002. Sway Stability Testing of High Rise Rack Sub-Assemblages. Sway sixteenth International Specialty Conference in Cold Formed Steel Structures proceedings, Missouri-Rolla.

ISMA. ISMA S/A Indústria Silveira de Móveis de Aço, 2011. Disponível em: <<http://www.isma.com.br>>.

MECALUX. Mecalux Soluções de armazenagem, 2011. Disponível em: <<http://www.mecalux.com.br>>.

OLIVEIRA, A. M., 2000. Análise Teórico-Experimental de Sistemas Industriais de armazenagem (“Racks”). Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

RASMUSSEN, K. J. R.; GILBERT, B. P., 2009. Experimental tes on steel storage rack components. Research Report, nº R899, University of Sydney, Austrália.

RASMUSSEN, K. J. R.; HUA V., 2011. Static friction coefficient between pallets and beam rail and pallet shear stiffness tests. Research Reports, nº R914, University of Australia.

RIBEIRO, F. S., 2006. Análise Teórico-Experimental de colunas curtas em Perfis Formados a frio de Seção Transversal tipo Rack. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

RMI, 2008. Specification for the Design, testing and Utilization of Industrial Steel. Storage Racks, Charlotte, North Carolina.

SARAWIT, A. T.; PEKOZ, T., 2003. Cold-Formed Steel Frame and Beam-Column. Design. Final report, Cornell University.

SARAWIT, A. T.; PEKOZ, T., 2006. Notional load Method for industrial steel storage racks. Thin-Walled Structures, v.44, p.1280-1286.

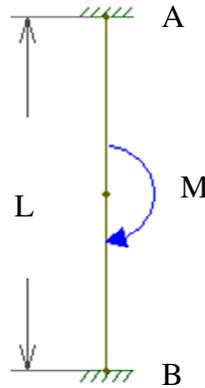
SAJJA, S. R.; BEALE, R. G.; GODLEY, M. H. R., 2008. Shear Stiffness of pallet rack upright frames. Thin-Walled Structures, v.64, p.867-874.

SOUZA, F. T., 2005. Análise Teórico-Experimental de sistemas apertados com elementos perfurados em perfis formados a frio-Racks. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

TEH, L. H.; HANCOCK, G. J.; CLARKE, M. J., 2004. Analysis and Design of Double-Sided High-Rise Steel Paleta Rack Frames. Journal of Structural Engineering. Vol.130, nº7, p.1011-1021.

ANEXO I

COLUNA BI-ENGASTADA (INÉRCIA CONSTANTE)



Reações:

$$R_A = R_B = 3M/2L$$

Momentos:

$$M_A = \frac{-Mxb}{L} x \left(2 - \frac{3xb}{L} \right) = -\frac{M}{2} x \left(2 - \frac{3}{2} \right) = -\frac{M}{4}$$

$$M_B = \frac{-Mxa}{L} x \left(2 - \frac{3xa}{L} \right) = -\frac{M}{2} x \left(2 - \frac{3}{2} \right) = -\frac{M}{4}$$

$$M(x) = \frac{M}{4} - \frac{3M}{2L} (x)$$

$$EIy'' = M(x) = \frac{M}{4} - \frac{3M}{2L} (x)$$

$$EI\theta (x) = \frac{M}{4} (x) - \frac{3}{4L} x^2 + c_1; \text{ como } \theta(0) = 0 \longrightarrow c_1 = 0;$$

$$EIy (x) = \frac{M}{8} x^2 - \frac{M}{4L} x^3 + c_1x + c_2; \text{ como } y(0) = 0 \longrightarrow c_2 = 0;$$

$$EI\theta (L/2) = \frac{ML}{8} - \frac{3L^2}{16L} = \frac{-ML}{16} \longrightarrow \boxed{\frac{\theta}{M} = \frac{-L}{16EI}}$$