

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

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SISTEMAS
AORTICADOS COM ELEMENTOS PERFURADOS EM
PERFIS FORMADOS A FRIO - RACKS**

FLÁVIO TEIXEIRA DE SOUZA

ORIENTADORES: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas
Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha 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, setembro de 2005.

S729a Souza, Flávio Teixeira de.
Análise teórico-experimental de sistemas apertados com
elementos perfurados em perfis formados a frio – racks [manuscrito]. /
Flávio Teixeira de Souza. - 2005.
xiii 104f. : il., color, graf., tabs.

Orientador: Profª Drª Arlene Maria Sarmanho Freitas; Prof. Dr. Marcílio
Sousa da Rocha Freitas.
Área de concentração: Construção Metálica.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Estruturas metálicas - Teses.
3. Pesquisa experimental - Teses. 4. Paletes (Transporte, armazenagem, etc.)
5. Análise numérica. 1 – Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDU: 624.014

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom supremo da vida.

A meus pais e à minha irmã, presenças constantes a me apoiar e incentivar.

A meus orientadores, Arlene e Marcílio, por compartilharem os conhecimentos e os exemplos de profissionalismo e dedicação.

Aos professores, pelos ensinamentos.

À Águia Sistemas de Armazenagem pela cessão dos protótipos ensaiados.

A meus colegas engenheiros Ana Amélia, Ana Carolina, Cristiano, Paulo, Ígor, Ânderson e aos arquitetos Betina, Cristiane, Flávia, Renata e Kneipp, pelo companheirismo.

Aos amigos Kátia, Fernando, Cereno e Marcelo, pela ajuda preciosa em diversos momentos.

Aos meus colegas de trabalho no Laboratório de Estruturas: João, Wilson (Dequinha), Carlos e Geraldo, por jamais terem medido esforços na realização dos ensaios experimentais.

Às minhas colegas de trabalho no SISBIN/UFOP Jussara, Madalena, Marilene, Maristela e Sione, cuja compreensão de minhas necessidades, apoio e incentivo foram imprescindíveis para que este trabalho se concretizasse.

Ao Prof. Walter Arcanjo Dornelas, de quem tenho a satisfação de me considerar amigo.

A Róvia, pela presteza e dedicação em resolver os problemas.

Aos colegas Fernanda, André, Fabiano (Abel) e Alexandre por terem ajudado na construção e na realização dos ensaios.

Aos meus colegas funcionários da Prefeitura Universitária e do Departamento de Metalurgia por terem ajudado na construção dos protótipos ensaiados.

À UFOP e à Fundação Gorceix pelo suporte financeiro.

Aos meus parentes e amigos, presentes em todos os momentos.

Enfim, a todos de alguma maneira participaram desta conquista. Através de frias palavras em uma folha de papel é impossível a expressão de minha gratidão e reconhecimento.

RESUMO

Os sistemas de armazenagem industrial são amplamente utilizados em depósitos, uma vez que permitem o melhor aproveitamento do espaço e permitem fácil acesso às cargas armazenadas. Os sistemas são constituídos com perfis formados a frio, estando então sujeitos aos fenômenos de instabilidade característicos de seções de paredes esbeltas e deste tipo de estrutura. Além disto, as colunas possuem perfurações ao longo do comprimento que visam a montagem através de ligações encaixadas e/ou parafusadas que influenciam no seu comportamento. Existem diversos tipos de sistemas, que variam em função do tipo de carga armazenada. Entre eles tem-se o sistema drive-in, que se caracteriza por alta densidade de armazenagem, proporcionada pela ausência de vigas transversais. Isto faz com que sua estabilidade nesta direção seja obtida através da fixação da base e da ligação das colunas com a viga longarina existente no topo da estrutura. As recomendações de normas existentes não prevêm a avaliação do sistema drive-in. Neste trabalho foi realizado 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 são comparados com resultados numéricos, que consideram parâmetros como a influência da fixação da base e a rigidez das ligações entre a longarina e a coluna e entre o braço e a coluna.

ABSTRACT

Industrial Storage Racks are used in warehouses, because they improve the space occupation, and let easy access to the products. They are built with cold formed profiles, and presents the instability phenomena like local and distortional modes, common in thin-walled members. The uprights of these structures shows holes to make easy the assemblage. There are various types of racks, that fit to the product to be stored. Among them, we find the drive-in system. This system has high storage density, due to the absence of beams in down-aisle direction, and the rigidly in this direction is due to the base fixity and the beam-column connection rigidly. There aren't standard prescriptions to analysis and design of drive-in systems. This work shows a theoretical-experimental evaluation of this kind of structure, where the global behavior and the interaction among the components are evaluated. The experimental data are compared with numerical results, and parameters like the influence of base fixity and beam to column connection rigidly are considered in the analysis.

ÍNDICE

Agradecimentos	II
Resumo.....	III
Abstract.....	IV
Índice.....	V
Lista de figuras	VIII
Lista de TABELas	XIII
1. Introdução.....	1
1.1. Perfis formados a frio.....	2
1.2. Sistemas de Armazenagem Industrial	5
1.2.1. Histórico.....	5
1.2.2 – Tipos de sistemas de armazenagem industrial:	6
1.3. Estudos de sistemas de armazenagem industrial.....	10
1.3.1. Estudo dos componentes dos racks	10
1.3.2. Sistemas porta-paletes.....	11
1.3.3. Sistemas drive-in.....	14
1.4. Objetivo e descrição do trabalho.....	14
2. Sistema Drive-in em estudo	16
2.1. Vigas	16
2.2. Colunas.....	18
2.3. Contraventamentos.....	19
2.4. Placas de base.....	19

2.5. Ligações	20
2.6. Propriedades geométricas dos elementos constituintes do sistema drive-in	21
3. Estudo da coluna curta	23
3.1. Prescrições do RMI para perfis formados a frio perfurados	23
3.2. Ensaio da coluna curta	25
3.3. Análise via elementos finitos	27
3.4. Elementos utilizados na análise	28
3.6. Simulações realizadas	30
3.6.1. Coluna nominal	31
3.6.2. Coluna real	31
3.6.3. Coluna bruta	32
3.6.4. Coluna líquida	33
3.7. Apresentação e análise dos resultados	34
3.7.1. Capacidade de carga.....	34
3.7.2. Modo de Colapso	36
4. Simulação numérica do sistema Drive-in.....	39
4.1. Simulação do sistema drive-in com elementos de barra	39
4.1.1. Elementos utilizados	39
4.1.2. Condições de carregamento e de fixação da estrutura	43
4.1.3. Hipóteses assumidas na análise.....	44
4.2. Simulação do sistema drive-in utilizando elementos de casca.....	44
5. Programa Experimental	48
5.1. Caracterização do material	48
5.2. Montagem da estrutura.....	49
5.3. Sistemas de aplicação de cargas.....	56
5.3.1. Sistema de aplicação de cargas verticais.....	57
5.3.2. Sistema de aplicação de cargas horizontais	60
5.4. Instrumentação e aquisição de dados	65
5.4.1 – Transdutores de deslocamentos (LVDT)	65

5.4.2. Defletômetros	66
5.4.3. Extensômetros	69
5.4.4. Células de carga	70
5.4.5. Sistemas de aquisição de dados.....	70
5.5. Metodologia de ensaio	72
6. Apresentação e análise dos resultados	74
6.1 Protótipo RACK01	74
6.2 Protótipo RACK02.....	81
6.3. Avaliação da influência da rigidez das ligações e placas de base no comportamento do sistema.....	91
7 - Conclusões.....	93
Referências.....	98

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Flambagem por distorção da seção transversal	3
Figura 1.2. Sistemas de armazenamento do tipo porta paletes	7
Figura 1.3. Esquema de funcionamento do sistema porta paletes.....	7
Figura 1.4. Modelo Drive-in em operação	8
Figura 1.5. Modelo Drive-in em operação.	8
Figura 1.6. Modelo Drive-in em operação.	9
Figura 1.7. Esquema de operação do sistema Drive-in.....	9

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Configuração do braço e viga do túnel:	17
Figura 2.2. Longarina com ligação de garra com dois dentes.....	17
Figura 2.3. Seções transversais das vigas utilizadas no sistema.	17
Figura 2.4. Tipos de colunas de sistemas industriais de armazenagem.	18
Figura 2.5. Seção transversal da coluna utilizada no sistema	18
Figura 2.6. Detalhe da posição e seção transversal dos contraventamentos na face lateral do sistema:	19
Figura 2.7. Placa de base.....	20
Figura 2.8. Ligação das colunas com a longarina.	21
Figura 2.9. Ligação parafusada com fixação no flange da coluna.	211

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Vista geral dos protótipos ensaiados:	25
Figura 3.2. Esquema geral de montagem do ensaio de coluna curta, posicionada na prensa hidráulica KRATOS.....	26
Figura 3.3. Seção transversal considerando a área líquida mínima com a indicação do centro de gravidade.....	26
Figura 3.4. Malha de elementos finitos	28
Figura 3.5. Elemento SHELL43.....	29
Figura 3.6. Elemento SOLID45	29
Figura 3.7. Elemento CONTAC49.....	30
Figura 3.8. Seção nominal com suas dimensões em cm.	31
Figura 3.10. Seção bruta com suas dimensões em cm.	33
Figura 3.11. Seção líquida e suas dimensões em cm.	33
Figura 3.12. Curva Carga x deslocamento para as propriedades nominais ($f_y = 250$ MPa).....	34 34
Figura 3.13. Curva carga x deslocamento para as propriedades experimentais.. ($f_y = 320,23$ MPa).....	35 35
Figura 3.14. Vista das indicações das distorções nas extremidades da coluna pelo afastamento dos flanges de ligação e aproximação deste flanges na meia altura da coluna (Oliveira (2000)).....	36
Figura 3.15- Deslocamentos obtidos com ampliação de 10 vezes.....	37

CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Elemento BEAM44.	40
Figura 4.2. Elemento LINK180.	41
Figura 4.3. Elemento BEAM4.	41
Figura 4.4. Elemento COMBIN14.....	42
Figura 4.5. Posicionamento dos elementos utilizados na análise.....	43

Figura 4.6. Carregamento utilizado e fixação da base.	44
Figura 4.7. Detalhes do modelo de casca.	45
Figura 4.8. Vista global do modelo.	46
Figura 4.9. Tensões de Von Mises na região dos braços.	47

CAPÍTULO 5

Figura 5.1. Vista frontal do protótipo ensaiado, com sua carga de projeto.	49
Figura 5.2. Vista lateral do protótipo ensaiado.	50
Figura 5.3. Vista superior do protótipo ensaiado.	51
Figura 5.4. Ligação das longarinas com a coluna.	51
Figura 5.5. Ligação do braço com a coluna.	52
Figura 5.6. Esquema de ligação do protótipo à laje de reação.	53
Figura 5.7. Fixação da base.	53
Figura 5.8. Ligação dos contraventamentos à coluna.	54
Figura 5.9. Abas para fixação dos contraventamentos superiores.	55
Figura 5.10. Ligação do braço à coluna.	55
Figura 5.11. Vigas de túnel.	56
Figura 5.12. Carregamento vertical.	57
Figura 5.13. Montagem do Cilindro Hidráulico 1.	58
Figura 5.14. Esquema de montagem do Cilindro Hidráulico 1.	58
Figura 5.15. Montagem do Cilindro Hidráulico 2.	59
Figura 5.16. Esquema de montagem do Cilindro Hidráulico 2.	59
Figura 5.17. Vigas de transmissão de carga.	60
Figura 5.18. Sistema de aplicação de cargas horizontais.	62
Figura 5.19. Esquema de carregamento horizontal.	63
Figura 5.20. Fixação da corda à estrutura.	64
Figura 5.21. Sistema de tubos para adição de água.	64
Figura 5.22. Posicionamento dos LVDT:	65
Figura 5.23. Posicionamento dos LVDT no topo da coluna.	66

Figura 5.24. Defletômetros no ensaio RACK01	67
Figura 5.25. Defletômetros no ensaio RACK02	68
Figura 5.26. Posicionamento dos defletômetros do ensaio RACK02	68
Figura 5.27 –Posicionamento dos extensômetros.	69
Figura 5.28. Extensômetro instalado no braço.	70
Figura 5.29. Vistas da Spider8	71
Figura 5.30. Montagem do sistema de aquisição de dados.	72

CAPÍTULO 6

Figura 6.1. Leituras das células de carga durante a realização do ensaio RACK01.....	74
Figura 6.2. Deformações específicas nos braços	75
Figura 6.3. Flambagem da alma dos braços.	76
Figura 6.4. Deslocamentos observados nos defletômetros posicionados próximos às bases das colunas.	777
Figura 6.5. Deslocamentos observados nos defletômetros posicionados nas colunas.....	788
Figura 6.6. Deslocamentos observados nos defletômetros e resultados das análises numéricas.....	79
Figura 6.7. Deslocamento no topo das colunas medidos pelos LVDT.	80
Figura 6.8. Comparação dos resultados teóricos e experimentais.	81
Figura 6.9. Leituras das células de carga durante o ensaio RACK02.	82
Figura 6.10. Deformações específicas observadas nos extensômetros.	83
Figura 6.11. Flambagem da alma dos braços.	83
Figura 6.12. Deslocamentos da extremidade do braço	84
Figura 6.13. Comparação entre os deslocamentos na extremidade dos braços e os resultados numéricos	85
Figura 6.14. Deslocamentos observados nos defletômetros posicionados próximos à base da coluna	86

Figura 6.15. Deslocamentos nos defletômetros posicionados à meia altura das colunas.....	87
Figura 6.16. Deslocamentos observados nos defletômetros e resultados das análises numéricas.....	88
Figura 6.17. Deslocamentos no topo das colunas.	89
Figura 6.18. Comparação dos resultados teóricos e experimentais	90
Figura 6.19. Comparação dos resultados teóricos com os dados experimentais	92

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1. Propriedades geométricas dos componentes do sistema “Drive-in”.	
.....	22

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1. Resultados da carga última experimental (P_{uexp}) dos ensaios realizados.....	27
Tabela 3.2. Dimensões da coluna real.....	32
Tabela 3.3. Comparação entre os valores obtidos.....	35

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1. Resultados do ensaio de caracterização do aço.....	48
--	----

1. INTRODUÇÃO

A utilização na Engenharia Civil de estruturas compostas por perfis formados a frio tem crescido nos últimos anos, em virtude das diversas vantagens que a utilização destes perfis oferece, tais como redução do peso final da estrutura e a diversidade de seções transversais. Por isto é cada vez mais comum a utilização de perfis formados a frio na construção de estruturas como estantes industriais de armazenamento, galpões, passarelas, residências, edifícios, entre outras.

Os perfis formados a frio são obtidos a partir de chapas dobradas a frio, e estão mais freqüentemente sujeitos a fenômenos de instabilidade quando comparados aos perfis laminados e soldados que são formados por chapas mais espessas. Estas características levam algumas vezes a procedimentos de avaliação de resistência específicos em relação àqueles empregados para os outros tipos de perfis.

Os sistemas de armazenagem industrial (racks) possuem diversas particularidades, como elevada esbeltez da estrutura, utilização de seções transversais características e elementos perfurados ao longo de seu comprimento para a conexão das ligações.

No Brasil, antes da publicação da norma brasileira (NBR 14672:01(2001)), para o dimensionamento de estruturas compostas por perfis formados a frio utilizavam-se normas européias (Eurocode 3 (1992)), americanas (AISI (1996)) ou australianas (AS/NZS 4600 (1996)). Porém, nenhuma destas normas considera a avaliação de elementos ou sistemas utilizados em estantes industriais. Sendo assim, os fabricantes destes tipos de estruturas utilizam prescrições específicas que possibilitam a previsão do comportamento estrutural deste tipo de elemento. Entre estes códigos, tem-se o americano (RMI (1997)) e os europeus (FEM (1996) e SEMA (1980)).

Neste capítulo, apresentam-se os perfis formados a frio, com uma breve introdução histórica, as particularidades em seu comportamento estrutural e os avanços em sua análise. Apresentam-se ainda os sistemas de armazenagem industrial, seu histórico, os tipos utilizados e as diversas pesquisas feitas no estudo global do sistema e na análise de seus componentes.

1.1. Perfis formados a frio

Os perfis formados a frio são aqueles constituídos por chapas metálicas de até 8 mm de espessura (NBR 14672:01(2001)). São fabricados por dobramento das chapas a temperatura ambiente, o que induz o efeito de encruamento do aço na seção. (Abdel-Rahman e Sivakumaran (1997)).

Segundo Yu (2000), a utilização destes perfis iniciou-se por volta de 1850, nos Estados Unidos e na Grã-Bretanha simultaneamente. Porém, somente a partir de 1946 seu uso foi popularizado, devido à publicação do primeiro procedimento de dimensionamento pelo AISI. Ressalta-se que esta norma foi baseada nos estudos realizados na Universidade de Cornell desde 1939, com o suporte do AISI e sob a direção do Professor George Winter.

Neste tipo de perfil, podem ocorrer modos de instabilidade isolados ou acoplados, como o modo global, que se refere ao comportamento do elemento estrutural, o modo local de placa, que é aquele onde não se alteram os ângulos da seção mas tão somente as placas deixam de ser planas e o modo distorcional, que é aquele em que os ângulos da seção sofrem alterações.

As normas e prescrições de projeto apresentam procedimentos analíticos para a consideração dos modos globais e o modo local de placa é considerado através do método das larguras efetivas. Com relação à determinação da resistência à flambagem distorcional, Hancock (1997) apresentou o desenvolvimento de uma formulação que foi utilizada na elaboração da norma australiana (AS/NZS 4600 (1996)) e, posteriormente, na norma brasileira (NBR 14672:01(2001)) (Batista et al (2000), Nagahama (2003)).

A figura 1.1 apresenta as configurações deformadas para seções sujeitas ao modo distorcional.

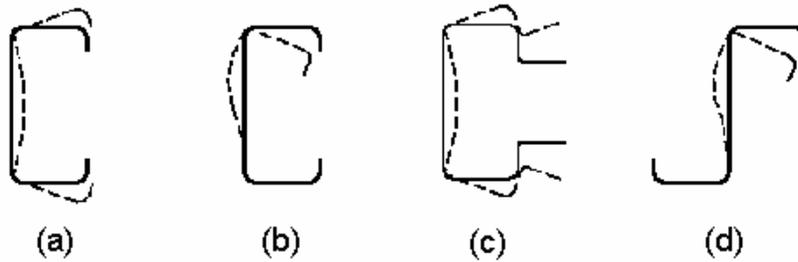


Figura 1.1. Flambagem por distorção da seção transversal (NBR 14672:01(2001)):
(a) Perfil U enrijecido sob compressão; (b) Perfil U enrijecido sob flexão; (c) Perfil rack sob compressão; (d) Perfil zeta sob flexão.

Vários pesquisadores têm buscado a determinação precisa da resistência de perfis formados a frio, procurando maneiras de representar não somente a manifestação isolada dos modos de flambagem, mas também o acoplamento entre eles. Assim, novas técnicas, com a utilização dos recursos computacionais, estão sendo desenvolvidas.

Uma descrição desta evolução dos métodos de análise é apresentada por Davies (2000), que apresenta os principais avanços obtidos com a melhoria da qualidade do aço estrutural e com a utilização de seções mais complexas, ressaltando as novas tendências para avaliação e dimensionamento, entre elas o emprego do Método das Faixas Finitas (Cheung apud Hancock et al (2001)), da Teoria da Viga Generalizada, e do Método da Resistência Direta.

A Teoria da Viga Generalizada (GBT) desenvolvida nas últimas décadas, inicialmente por Schardt (1989), busca unificar e estender as teorias convencionais para a análise de membros estruturais de paredes finas. Esta teoria leva em consideração os modos de deformação local (seção transversal) e global (membro) e pode ser aplicada para realizar tanto análises geometricamente linear (GBT de primeira ordem) quanto análises de estabilidade linear (GBT de segunda ordem), resultando num procedimento unificado para obter soluções precisas para uma grande variedade de problemas estruturais (Schardt (1994)). Outra importante possibilidade da GBT é a consideração isolada dos modos de flambagem ou a combinação deles de modo a ficar claro a importância de cada um.

Na última década, Davies e seus colaboradores (Davies e Leach (1994), Davies et al (1994)) publicaram diversos trabalhos aplicando a GBT na investigação do

comportamento de membros estruturais de perfis formados a frio, contribuindo para a validação desta teoria como um procedimento válido e muitas vezes vantajoso em relação aos métodos puramente numéricos de elementos finitos ou faixas finitas. Recentemente esta teoria foi ampliada para analisar membros estruturais esbeltos ortotrópicos (Silvestre e Camotim (2002a), Silvestre e Camotim (2002b)).

O Método da Resistência Direta (Schafer e Pekoz apud Hancock et al (2001)) analisa a seção como um todo, ao invés de analisar seus elementos individualmente. Schafer (2002) apresenta uma análise de seções comumente utilizadas e, a partir da comparação entre o Método da Resistência Direta e o Método das Larguras Efetivas, determinou que este último leva a resultados não conservadores.

A utilização de métodos numéricos para a avaliação do comportamento dos perfis formados a frio tem sido bastante estudada. Chai et al (2000) realizaram um estudo baseado no método dos elementos finitos para a avaliação do comportamento pós-crítico de perfis U enrijecido e cartola sob compressão. Chegaram então a diretrizes sobre as melhores formas de refinar a malha e representar as imperfeições iniciais.

Bakker e Pekoz (2003) estudaram as fontes de erros em análises não lineares via elementos finitos. Eles analisam os erros cometidos na concepção do modelo, na introdução dos dados ou na geração da malha, no processamento, onde existe a possibilidade de ocorrerem erros de convergência ou mesmo no pós-processamento, com a interpretação equivocada dos resultados. Analisam cada uma destas fontes de erro, e sugerem procedimentos para evitá-las e uma seqüência para rastreamento dos erros.

Sarawit et al (2003) fazem uma compilação dos avanços na simulação via elementos finitos para perfis formados a frio. Fazem considerações sobre os tipos de análise adequados e propõem modelos para a introdução das propriedades dos materiais, tensões residuais e imperfeições geométricas. Fazem ainda indicações dos tipos de elementos que devem ser utilizados, e comentam sobre diversos softwares disponíveis para estas análises.

Ressalta-se a importância do desenvolvimento dos recursos computacionais para que se tenha uma análise estrutural cada vez mais próxima da realidade, podendo-se considerar de forma realista o comportamento das estruturas. Chan (2001) apresenta

este desenvolvimento, desde as primeiras teorias até o advento dos modernos métodos de análise estrutural.

No Brasil, diversos estudos teórico-experimentais têm sido feitos para a avaliação do comportamento dos perfis formados a frio para a avaliação da manifestação dos modos de flambagem e do acoplamento entre eles, sob diversas condições de carregamento (Sarmanho (1991), Rodrigues (1993), Vazquez (2002), Pérez (2003)).

1.2 Sistemas de Armazenagem Industrial

1.2.1. Histórico

Os sistemas de armazenagem industrial, também conhecidos como racks, surgiram na década de 30 (Godley (1991)) e os elementos que os compunham eram cantoneiras de aço constituídas por perfis formados a frio com furos ao longo de seu comprimento. Esta configuração permitia grande flexibilidade, e as cantoneiras perfuradas tornaram-se usuais. Porém, o processo de montagem através de parafusos era trabalhoso, e a baixa resistência à torção das cantoneiras exigia uma grande quantidade de contraventamentos.

Posteriormente, os fabricantes desenvolveram outros tipos de ligação, utilizando o conceito de ligações não-parafusadas em que a conexão à coluna é feita através de garras dentadas, não sendo necessários os parafusos. A partir daí, observou-se uma considerável redução dos custos de montagem com a melhoria da eficiência das ligações e ganho de rigidez da estrutura. As colunas também evoluíram passando de seções cantoneira para U enrijecido, mas os sistemas ainda apresentavam dificuldades na montagem dos contraventamentos. Em seguida, foram desenvolvidos vários tipos de seções de colunas como, por exemplo, seções tipo “garrafa” chamadas também de seções tipo “rack”, que possuem elementos adicionais para a fixação dos contraventamentos. As colunas possuem também rasgos ao longo de sua altura, para permitir o encaixe das ligações.

Atualmente, os sistemas de armazenagem industrial têm utilização amplamente difundida em todo o mundo. Segundo Godley, já em 1991, 50 mil toneladas de aço

eram utilizadas anualmente na construção destas estruturas. Assim, sistemas cada vez mais complexos passaram a ser construídos, para atender à demanda crescente de aproveitamento do espaço.

O empirismo inicial passou então a dar lugar a processos rigorosos de dimensionamento, que levam em consideração as peculiaridades dos racks, que por serem estruturas bastante esbeltas apresentam diversos problemas que as tornam diferentes das estruturas correntes.

1.2.2 – Tipos de sistemas de armazenagem industrial:

Existem basicamente dois tipos de sistemas de armazenagem industrial: os estáticos e os dinâmicos. Sistemas dinâmicos são aqueles em que as cargas se movimentam em seu interior por meio da força da gravidade. Já os sistemas estáticos são aqueles em que a movimentação das cargas em seu interior é feita através de máquinas empilhadeiras. Para a acomodação das cargas, são utilizadas plataformas, geralmente de madeira, denominadas “paletes”.

Neste trabalho, enfocaremos os sistemas estáticos. Existe uma grande variedade de modelos, que se adaptam ao tipo de produto e ao espaço disponível para a armazenagem. Entre eles, destacamos o porta-paletes, que é o mais empregado em todo o mundo, e o drive-in, que será objeto deste estudo.

O sistema porta-paletes é muito utilizado devido à sua relativa simplicidade de operação e estabilidade estrutural. Sua altura está limitada pelo alcance das empilhadeiras, em cerca de 6 m. Para o acesso a cada produto são utilizados corredores que permitem o trânsito da empilhadeira, conforme apresentado a seguir. A figura 1.2 apresenta o sistema porta paletes em operação e a figura 1.3 mostra seu esquema de funcionamento.



Figura 1.2. Sistemas de armazenamento do tipo porta paletes (Águia (1999))

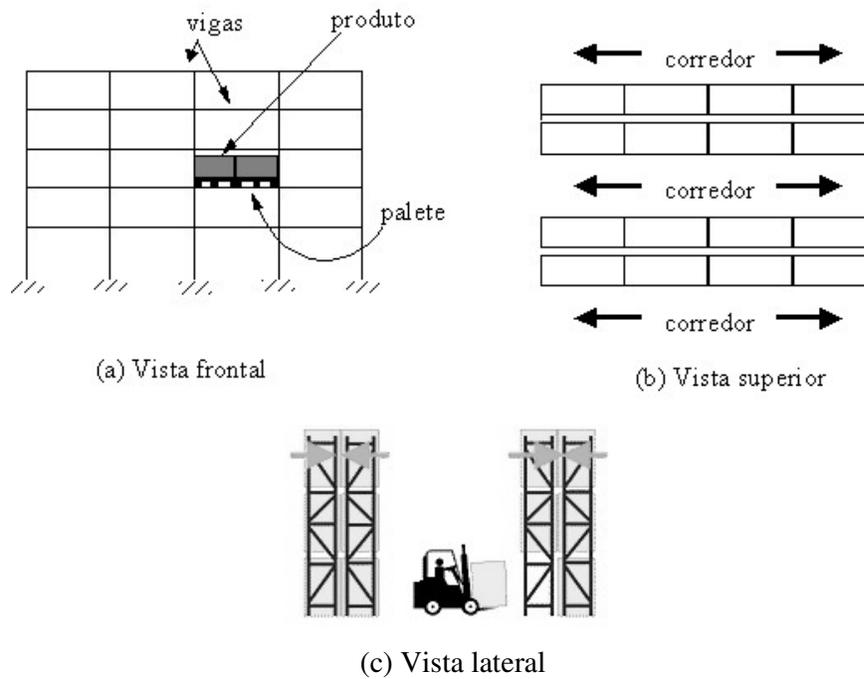


Figura 1.3. Esquema de funcionamento do sistema porta paletes

No sistema drive-in a principal característica é a ausência de vigas transversais, para permitir o deslocamento da empilhadeira em seu interior. Assim, toda a estabilidade do sistema é obtida através de contraventamentos colocados na região superior e posterior do sistema e da rigidez das ligações utilizadas. As figuras 1.4 a 1.6 mostram o sistema Drive-in em operação.



Figura 1.4. Modelo Drive-in em operação (Águia (1999)).



Figura 1.5. Modelo Drive-in em operação (Brownbuilt (2004)).



Figura 1.6. Modelo Drive-in em operação (Dexion (2004)).

No modelo Drive-in, a movimentação de cargas é feita através de uma face frontal de operação, sendo que a outra face (fundos) é contraventada, impossibilitando o deslocamento da empilhadeira. A figura 1.7 apresenta o esquema de funcionamento do sistema Drive-in.

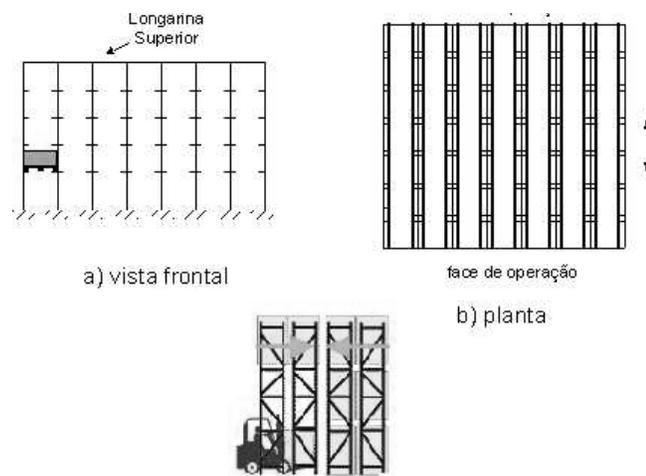


Figura 1.7. Esquema de operação do sistema Drive-in

Segundo fabricantes (Dexion (2004)), a utilização de sistemas Drive-in possibilita um aproveitamento do espaço 90% maior do que quando se usa sistemas porta-paletes. Este ganho se dá devido à ausência dos corredores que são imprescindíveis nos sistemas porta-paletes para acesso às cargas.

1.3. Estudos de sistemas de armazenagem industrial

A partir do início da década de 90, com a popularização dos recursos computacionais e do conseqüente desenvolvimento de novos métodos de análise estrutural, aconteceram grandes avanços no estudo dos sistemas de armazenagem. Godley (1991) fez um histórico da evolução dos racks até aquele momento. Apresentou uma descrição detalhada dos componentes e dos diversos tipos de sistemas disponíveis, além de uma abordagem analítica para avaliação dos comprimentos de flambagem das colunas.

Lewis (1991) avaliou, utilizando conceitos clássicos de instabilidade estrutural, os sistemas de armazenagem industrial. Observou então de forma analítica a influência da rigidez das ligações e da falta de prumo das colunas na capacidade portante da estrutura.

O Instituto de Fabricantes de Racks dos Estados Unidos (RMI (1997)) elaborou as especificações de projeto destas estruturas em consonância com a norma americana (AISI (1996)). As especificações abrangem basicamente os sistemas do tipo porta-paletes, ficando excluídos de seu escopo outros tipos, como o drive-in e o drive-through.

Nas especificações do RMI são estabelecidos tipos de materiais, os métodos de dimensionamento, os casos de carregamento a serem avaliados e os cuidados a serem tomados na montagem e utilização dos racks.

O RMI prescreve ainda alguns ensaios, visando a avaliação do comportamento destas estruturas. Entre eles encontram-se o ensaio da coluna curta, que visa quantificar a resistência dos elementos perfurados submetidos à compressão, o ensaio da viga em balanço, que visa determinar a rigidez da ligação e o ensaio do pórtico, que visa simular o funcionamento do rack.

1.3.1. Estudo dos componentes dos racks

Os componentes dos racks têm sido amplamente estudados. Para isto têm sido empregadas vias experimentais, teóricas ou mesmo simulações numéricas. Godley et al (2000) desenvolveram uma formulação para o estudo do comportamento das colunas e

sua validação é feita a partir de comparações com resultados obtidos via método dos elementos finitos.

Godley et al (2003) realizaram um estudo teórico-experimental para avaliação da influência das placas de base no comportamento de colunas. Esta avaliação foi feita através de ensaios, para avaliar o comportamento de colunas com diversos índices de esbeltez, e através da comparação destes resultados com estudos via elementos finitos. Foi analisado principalmente o caso em que a placa de base não é parafusada ao piso, como é usual em diversos modelos de rack. Através dos resultados obtidos, observou-se que neste caso a carga de colapso das colunas se aproxima da carga de Euler para colunas biapoiadas.

Oliveira (2000) realizou um estudo teórico-experimental das ligações e das colunas utilizadas em um modelo drive-in fabricado por uma empresa nacional, a Águia Sistemas de Armazenagem Industrial. Este estudo baseou-se nas prescrições do RMI (1997), com a realização do ensaio da coluna curta, para determinação da resistência da coluna e do ensaio da viga em balanço, para a determinação da rigidez das ligações.

1.3.2. Sistemas porta-paletes

O comportamento do sistema como um todo tem sido também bastante estudado, uma vez que o seu comportamento estrutural é influenciado pela sua esbeltez e pela sua geometria. Na grande maioria dos casos, são estudados os sistemas do tipo porta-paletes, devido à sua grande utilização em todo o mundo.

Baldassino e Bernuzzi (2000) fizeram a análise numérica de uma grande quantidade de modelos do tipo porta paletes comercializados na Europa. A partir deste estudo foram quantificadas a influência da rigidez das ligações, da placa de base e o efeito das imperfeições no comportamento dos racks. Recomendaram, então, a utilização da rigidez torcional das ligações entre vigas e colunas para fins de projeto e a avaliação experimental da rigidez das ligações das bases das estruturas, uma vez que ela influencia sobremaneira o comportamento global do rack

A influência das condições ambientais devem ainda ser consideradas. Em regiões sísmicas, este tipo de carga tem grande importância no comportamento dos racks. Bernuzzi e Castiglioni (2001) apresentam um estudo experimental das ligações

do rack submetidas a cargas estáticas e sísmicas. Os ensaios mostraram que as ligações dos racks possuem particularidades em seu comportamento se comparadas às ligações tradicionais, sendo necessária a avaliação da adequação dos processos de dimensionamento de ligações aos racks.

Aguirre (2005) realizou um estudo semelhante, com a análise experimental das ligações através de garras dentadas, submetidas a cargas cíclicas. Ele observou que o modo de colapso se inicia com o escoamento dos ganchos externos, e esta plastificação progride em direção à linha neutra da viga. Ele concluiu que a semi-rigidez da ligação deve, obrigatoriamente, ser usada em projeto, uma vez que a consideração da ligação como rígida é fortemente não conservadora.

Sarawit e Pekoz (2002, 2003) realizaram um estudo do comportamento dos sistemas de armazenagem do tipo porta-paletes. Estes estudos envolveram análises numéricas, a partir do qual os diversos componentes deste sistema foram estudados, visando a melhoria das prescrições de dimensionamento.

Analisaram, primeiramente, as placas de base através de análises numéricas, e avaliaram as equações propostas para o dimensionamento das mesmas. Concluíram, então, que o modelo corrente é muito conservador, e propuseram uma nova equação para este dimensionamento.

Estudaram também as ligações entre as vigas e as colunas, fazendo uma avaliação dos ensaios propostos pelo RMI para a determinação do comportamento destas ligações. Concluíram que estes ensaios não são adequados para a avaliação do efeito do esforço cortante, e sugeriram novos procedimentos em que o cisalhamento é melhor avaliado.

Além das análises de componentes isolados, o comportamento global do sistema foi estudado através da simulação do ensaio do pórtico prescrito pelo RMI. Nestas análises foram empregados elementos de viga e elementos de casca, a fim de comparar a influência dos modos local e distorcional da coluna na resistência do rack como um todo. Determinou-se que parâmetros como a rigidez da ligação e, principalmente, a modelagem da base, influenciam sobremaneira o comportamento do rack.

Harris e Hancock (2002) apresentam um programa experimental visando o estudo da estabilidade de racks do tipo porta-paletes. O objetivo desta montagem é a verificação da influência da rigidez das ligações no comportamento destas estruturas,

uma vez que o ensaio da viga em balanço prescrito para a avaliação do comportamento das ligações tem seus resultados bastante controversos. A partir da montagem ensaiada, eles observaram a influência das ligações, que perde rigidez durante o carregamento, influenciando sobremaneira o comportamento da estrutura.

Beale e Godley (2002) desenvolveram um programa computacional para o projeto de racks do tipo porta-paletes, baseado nas prescrições da FEM. Este programa determina a carga de flambagem, os deslocamentos e esforços na estrutura, com consideração inclusive dos efeitos de segunda ordem. Os resultados do programa são validados, a partir da comparação com resultados analíticos e numéricos.

Teh et al (2004) fazem uma comparação entre as simulações 2D e 3D de racks do tipo porta paletes. Através destas análises, eles observaram que a simulação 2D, comum nos processos de dimensionamento, é inadequada na avaliação do comportamento do sistema, uma vez que existem interações entre diversos modos que apenas o modelo 3D é capaz de captar. Apresentam ainda uma avaliação dos elementos de viga existentes em softwares comerciais e que usualmente são utilizados na simulação dos racks e que, quando não captam o empenamento devido à torção, são inadequados para a simulação dos racks.

Abdel-Jaber (2005a) realizou um estudo numérico de um pórtico do sistema porta-pallets submetido a carga vertical e carga horizontal proporcional à vertical. A rigidez da ligação entre a viga e a coluna foi simulada através de modelos bi-lineares, como os correntemente utilizados, e através de outro multilinear, com a consideração de diferentes rigidezes para carregamento e descarregamento.

Abdel-Jaber (2005b) fez uma série de ensaios para a avaliação do comportamento das ligações das vigas e colunas do rack tipo porta-paletes sob a ação de cargas verticais e horizontais. Estes ensaios foram importantes para a validação do modelo multilinear de rigidez para as ligações. A adoção deste modelo implica em modificações nas equações atualmente utilizadas para o projeto destas ligações, o que é apresentado pelos autores.

1.3.3. Sistemas drive-in

Com relação ao comportamento global, o modelo drive-in possui maior complexidade do que o modelo porta-paletes, devido à inexistência de vigas na direção transversal. Oliveira (2000), utilizando os resultados experimentais da rigidez das ligações por ele obtidos, realizou uma análise preliminar do comportamento destes sistemas, utilizando para isto o método dos elementos finitos.

Godley (2002) realizou um estudo do comportamento de racks do tipo drive-in e drive-thru. Neste trabalho foram apresentados modelos bidimensionais para estudo do comportamento destas estruturas, e foram determinados os comprimentos e cargas de flambagem para as colunas. Observa-se a grande influência dos contraventamentos de fundo na resistência do rack, o que confere ao sistema drive-in maior estabilidade que o drive-thru, e também é discutido o efeito da distribuição de carga no sistema.

Freitas et al (2002) apresentam uma análise do comportamento do sistema Drive-in, considerando-se conjuntamente os aspectos referentes ao carregamento e montagem. Apresentam recomendações com relação à montagem do rack e com relação à disposição da carga no sistema parcialmente carregado.

Um amplo trabalho de análise do comportamento do sistema drive-in foi realizado por Campos (2003). Através do método dos elementos finitos, o sistema foi simulado e observou-se a influência dos efeitos de segunda ordem no comportamento da estrutura. Foi realizada a análise experimental da placa de base, com a determinação de sua rigidez e, com a introdução desde dado no modelo numérico, a avaliação de sua influência no comportamento global do sistema. Observou-se a diminuição da influência do contraventamento do plano de fundo no comportamento da coluna à medida em que se aumenta a profundidade do rack, e apresentaram-se alternativas para a representação da falta de prumo da estrutura a partir da introdução de carregamentos laterais no modelo.

1.4 Objetivo e descrição do trabalho

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo teórico-experimental do comportamento global de um rack do tipo drive-in.

Este estudo dá continuidade a uma série de pesquisas realizadas anteriormente, onde técnicas computacionais foram empregadas na avaliação do comportamento do sistema e também os componentes do rack foram avaliados através de análises teóricas e experimentais.

No capítulo 2 é feita a descrição do sistema de armazenagem em estudo, com a apresentação de cada um de seus componentes.

No capítulo 3 é apresentado o estudo da coluna curta, no qual este componente dos sistemas de armazenagem industrial teve seu comportamento estudado a partir da simulação numérica do ensaio prescrito pelo RMI (1997). A partir de dados experimentais obtidos por Oliveira (2000) esta análise foi validada e, a partir dos estudos numéricos, sugeriu-se a utilização da área líquida efetiva para fins de projeto.

No capítulo 4 é apresentado um estudo numérico do modelo a ser ensaiado, com vistas a avaliar os resultados experimentais. Esta simulação é feita utilizando elementos de barra e de casca, e o comportamento global do protótipo é avaliado.

No capítulo 5 é descrito o programa experimental realizado, com a apresentação do protótipo, dos sistemas de aplicação de carga e da instrumentação utilizada.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos por via numérica e experimental, e são feitas comparações entre eles.

Finalmente, no capítulo 7 tem-se as conclusões deste trabalho e sugestões para estudos futuros.

2. SISTEMA DRIVE-IN EM ESTUDO

O sistema estudado neste trabalho foi projetado e fornecido pela empresa Águia Sistemas de Armazenagem (Águia (2004)). Este projeto foi desenvolvido levando em consideração as condições de infra-estrutura disponíveis, sem deixar de lado o interesse principal que é a observação do comportamento da estrutura.

O projeto consiste em um modelo com dois níveis de carregamento com um palete na profundidade do túnel, apresentando uma altura máxima de 3840 mm a partir do piso. Os paletes ficam posicionados à metade desta altura, ou seja, a 1920 mm do piso.

Segue-se uma descrição detalhada dos componentes do sistema em estudo.

2.1. Vigas

No sistema “drive-in” são utilizados três tipos de vigas com finalidades distintas: braços, vigas do túnel e longarinas. Os braços são vigas curtas, de seção aberta, que se encaixam nas colunas, e não são contínuas de uma coluna a outra. A figura 2.1 (a) ilustra o braço que é utilizado para permitir a passagem das empilhadeiras de armazenagem no interior do sistema. Para armazenagem dos paletes ao longo da profundidade são instalados trilhos (vigas do túnel), figura 2.1 (b).

As vigas de túnel têm a finalidade de suportar o carregamento imposto pelos paletes e transmiti-los aos braços. São normalmente vigas contínuas, de seções abertas, e são susceptíveis a fenômenos de flexão e principalmente a flambagem lateral por torção. Os braços recebem os esforços dos trilhos e os transmitem para a ligação com a coluna.

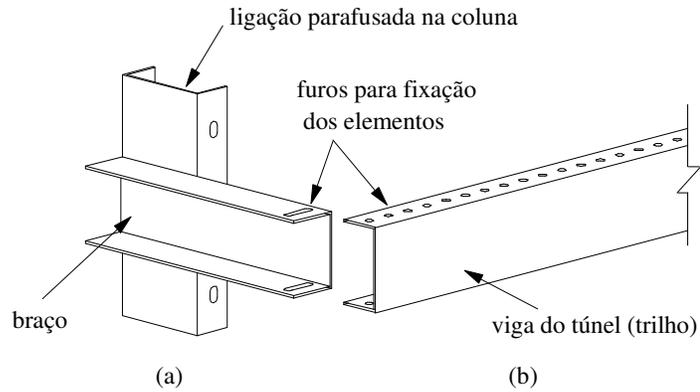


Figura 2.1. Configuração do braço e viga do túnel:

(a) Braço; (b) Viga do túnel.

Além desses dois elementos, para garantir a estabilidade da estrutura são instaladas vigas no topo do sistema, denominadas longarinas (figura 2.2), que fazem a amarração das colunas. O colapso desse elemento está associado à resistência da ligação dos mesmos.

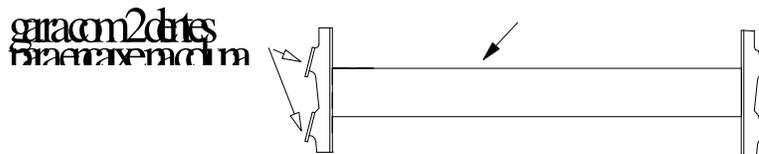


Figura 2.2. Longarina com ligação de garra com dois dentes.

A figura 2.3 apresenta as seções transversais das vigas utilizadas no sistema em estudo.

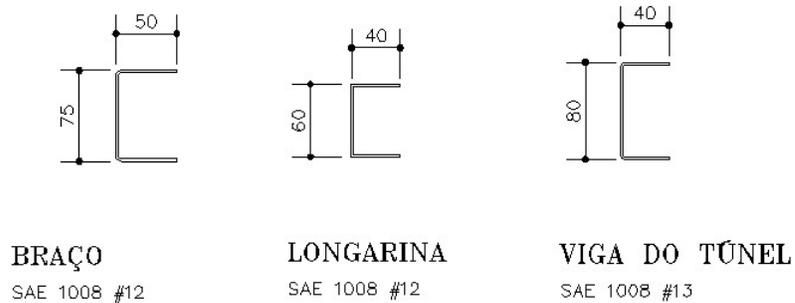


Figura 2.3. Seções transversais das vigas utilizadas no sistema (Águia (2004)).

2.2. Colunas

Existem diversos modelos de colunas utilizadas em sistemas de armazenagem industrial, com diferentes seções transversais e perfurações para fixação dos elementos, conforme apresenta a figura 2.4.

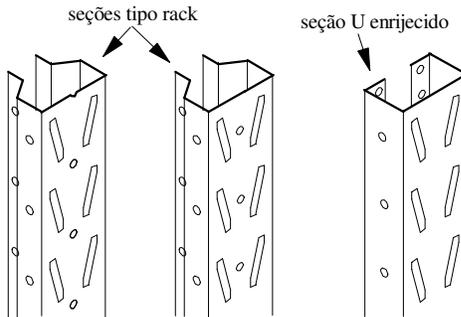
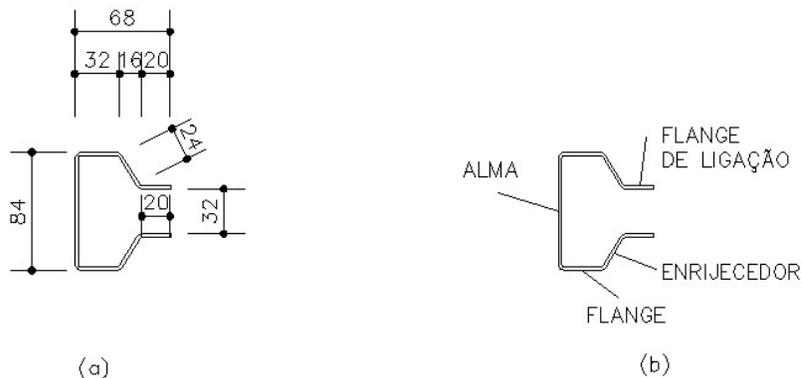


Figura 2.4. Tipos de colunas de sistemas industriais de armazenagem.

Os furos nas seções das colunas facilitam a montagem. Utilizam-se seqüências de perfurações, de geometria variada, que são responsáveis pelo encaixe da ligação das vigas. Em alguns modelos existem ainda furos circulares para a utilização de ligações parafusadas. No sistema estudado, as colunas utilizadas são do tipo rack, e sua seção é apresentada na figura 2.5.



COLUNA MAXI

ASTM A570 G36 #14

Figura 2.5. Seção transversal da coluna utilizada no sistema (Águia (2004))

(a) Dimensões em mm; (b) Nomenclatura da seção.

2.3. Contraventamentos

O contraventamento é um dos elementos utilizados para estabilização da estrutura e as seções mais comuns são tipo cantoneira e U enrijecido. No sistema Drive-in o contraventamento é posicionado na face lateral e para garantir a estabilidade, são ainda instalados no fundo do sistema e no plano horizontal superior.

No sistema em estudo são utilizados como contraventamento perfis tipo U enrijecido. O posicionamento dos contraventamentos e sua seção transversal são apresentados na figura 2.6. Ressalta-se que não foram utilizados contraventamentos no plano de fundo, ficando estes restritos aos planos laterais e superior.

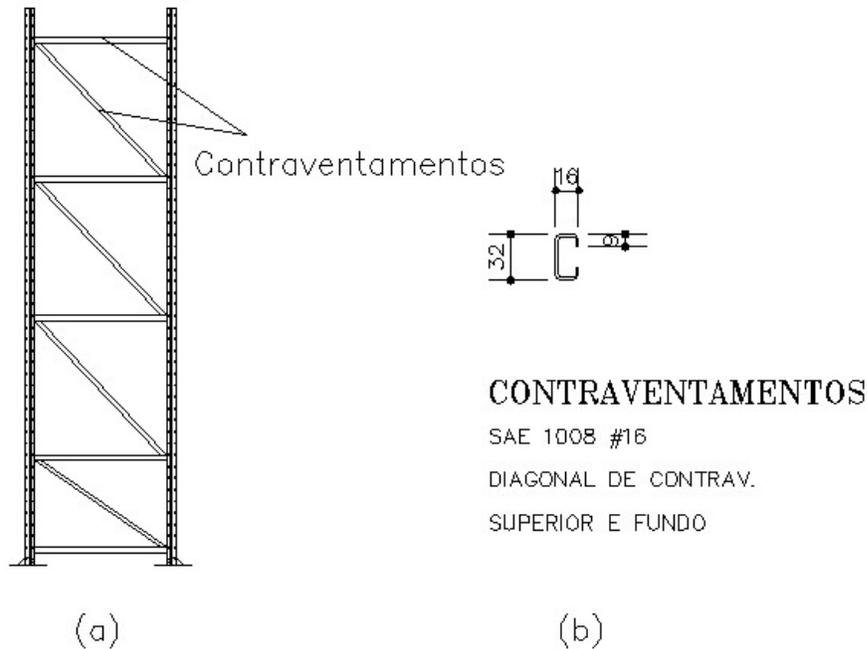


Figura 2.6. Detalhe da posição e seção transversal dos contraventamentos na face lateral do sistema:

(a) posicionamento (b) seção transversal.

2.4. Placas de base

Para a fixação das colunas do rack ao piso são utilizadas placas de base, conforme apresenta a figura 2.7. Estas placas de base possuem importante papel na

estabilidade do sistema na direção transversal, uma vez que não existem vigas que estabilizem o sistema nesta direção.

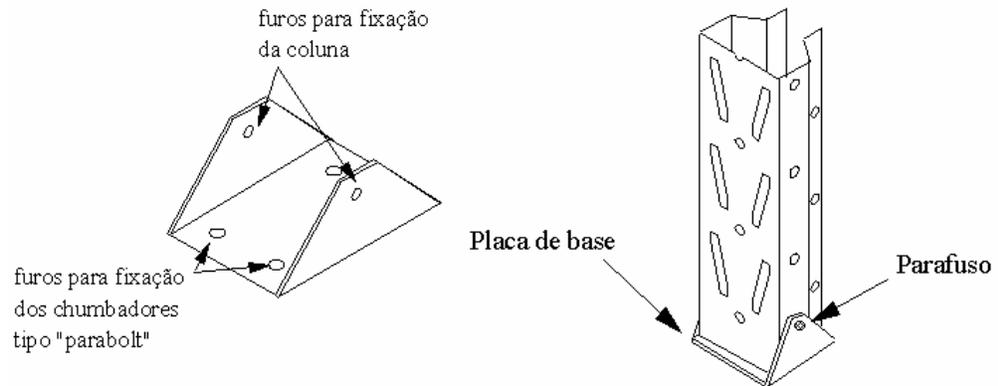


Figura 2.7. Placa de base

2.5. Ligações

Nos sistemas de armazenagem industrial as ligações podem ser classificadas em dois grupos. Alguns tipos utilizam conexão à coluna por meio de parafusos, e outros se conectam à coluna através de garras dentadas, que se encaixam a ela sem utilização de parafusos. Do primeiro grupo pode-se destacar que os parafusos se encaixam na alma ou flanges da coluna. Quanto ao grupo de não parafusadas, os dentes geralmente se encaixam na alma da coluna.

No sistema em estudo, as ligações das longarinas com as colunas são feitas através de encaixe das garras nos rasgos existentes na alma da mesma. É ainda instalado um parafuso de segurança, para impedir que haja um desencaixe da ligação devido a um choque ascendente. A figura 2.8 apresenta esta ligação.

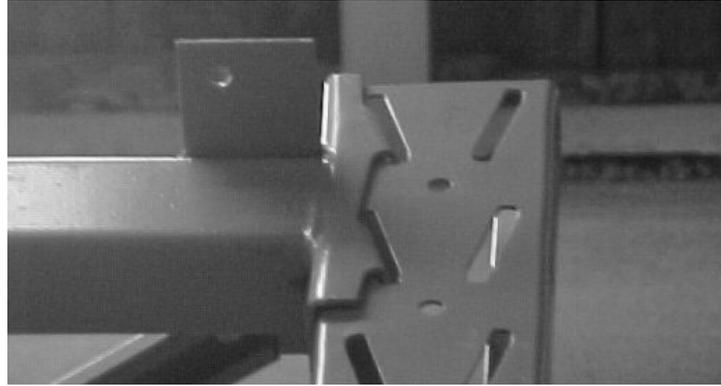


Figura 2.8. Ligação das colunas com a longarina.

A ligação dos braços com a coluna é feita através de parafusos, que são fixados nos flanges da mesma através de um suporte, no qual o braço é soldado, conforme apresenta a figura 2.9.

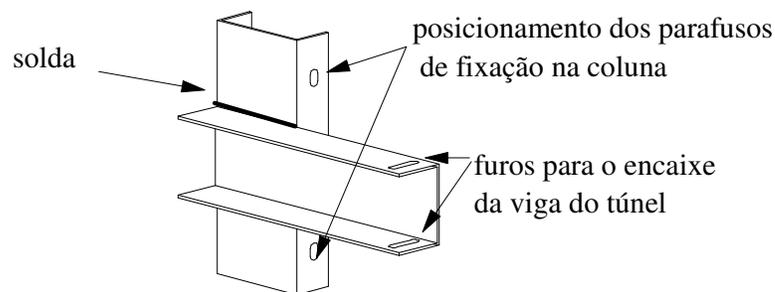


Figura 2.9. Ligação parafusada com fixação no flange da coluna.

Ressalta-se que no sistema Drive-in as ligações têm fundamental importância para a estabilidade do sistema, devido à ausência de vigas que o estabilizem na direção transversal. Assim, juntamente com a placa de base, a ligação da viga com a coluna é fundamental na estabilidade do sistema.

2.6. Propriedades geométricas dos elementos constituintes do sistema drive-in

As propriedades geométricas dos elementos constituintes do sistema drive-in são apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1. Propriedades geométricas dos componentes do sistema ‘Drive-in’.

SEÇÃO TRANSVERSAL		I_{yy} (cm ⁴)	I_{zz} (cm ⁴)	A (cm ²)	I_T (cm ⁴)	C_w (cm ⁶)
COLUNA		20,56	40,12	4,73	0,0986	707,85
VIGA DO TÚNEL		38,4	6,00	3,60	0,0608	67,20
BRAÇO		11,9	43,95	4,38	0,0911	117,19
LONGARINA		4,87	18,00	2,80	0,0373	30,72
CONTRAV.		0,56	2,01	1,23	0,0092	2,07

Obs.: As dimensões das seções transversais estão em mm.

3. ESTUDO DA COLUNA CURTA

A coluna empregada para a construção dos sistemas de armazenagem industrial possui características que visam facilitar a montagem, tais como a presença de perfurações ao longo de sua altura e seção transversal com flanges adicionais que visam a conexão dos contraventamentos, conforme apresenta a figura 2.5.

Estas características influenciam o comportamento deste elemento estrutural. Assim, a existência dos flanges adicionais faz com que a coluna seja mais susceptível ao modo de flambagem distorcional, enquanto a existência das perfurações impossibilita a determinação da resistência da coluna através dos procedimentos analíticos prescritos nas normas de projeto.

Considerando as particularidades deste elemento estrutural, os fabricantes de racks prescrevem procedimentos para a determinação desta resistência, geralmente baseados em testes experimentais. O RMI (1997) prescreve o teste da coluna curta com este fim.

Neste capítulo serão apresentados estudos numéricos em que este ensaio foi simulado através do software ANSYS (2001), e, a partir de resultados experimentais obtidos por Oliveira (2000), procurou-se uma alternativa aos ensaios para fins de projeto.

3.1. Prescrições do RMI para perfis formados a frio perfurados

As prescrições do RMI são baseadas nas especificações americanas do AISI, e utilizando o procedimento de dimensionamento para elementos não perfurados considerando, no cálculo da área efetiva, a influência dos furos existentes na coluna. Assim é utilizada a equação 3.1 na determinação da capacidade da coluna para a área líquida mínima da seção transversal (área com maior influência das perfurações).

$$P_n = A_e F_n \quad (3.1)$$

onde:

P_n = carga nominal axial considerando o modo de flambagem local;

A_e = área efetiva da seção transversal da coluna;

F_n = tensão nominal de flambagem, considerando-se as propriedades da seção transversal bruta da coluna.

Na equação 3.1 pode-se observar que o parâmetro de difícil determinação é a área efetiva. Para determinação da área efetiva de uma seção qualquer com furos, pode-se utilizar a equação 3.2 (Peköz (1987)), que está contida no RMI.

$$A_e = \left[1 - (1 - Q) \left(\frac{F_n}{f_{ya}} \right)^Q \right] A_{net\ min} \quad (3.2)$$

onde:

A_e = área efetiva da seção transversal;

F_n = tensão nominal, considerando-se as propriedades da área bruta e a tensão de escoamento especificada pelo fabricante do aço;

f_{ya} = tensão de escoamento, obtida pelo ensaio de caracterização do aço;

Q = fator redutor de forma, obtido através do ensaio de coluna curta;

$A_{net\ min}$ = área líquida mínima, considerando-se o plano da seção transversal com o maior número de furos.

O ensaio de coluna curta para elementos perfurados é utilizado na determinação do fator Q , que é definido como a razão entre a resistência última, obtida a partir da média das cargas últimas experimentais, (P_{ua}), e a tensão de escoamento (f_{ya}), multiplicada pela área líquida mínima média das colunas ensaiadas ($A_{anet\ min}$), igual a média dos valores medidos nos protótipos das seções ensaiadas.

$$Q = \frac{P_{ua}}{f_{ya} A_{anet\ min}} \quad (3.3)$$

onde:

P_{ua} = carga última média, obtida no ensaio da coluna curta;

$A_{anet\ min}$ = área líquida mínima média, obtida no plano que intercepta o maior número de furos da seção transversal da coluna.

3.2. Ensaio da coluna curta

Os ensaios das colunas curtas analisadas neste trabalho foram realizados em um trabalho anterior (Oliveira (2000)) para avaliação da área efetiva da seção transversal da coluna através da determinação do fator Q , como apresentado no item anterior. A seguir é apresentada uma síntese dos procedimentos e resultados dos ensaios realizados.

A escolha do comprimento das colunas curtas deve ser tal que os fenômenos de flambagem global e a influência das extremidades sejam evitados. Para os protótipos ensaiados, o comprimento das colunas deve ser definido como maior ou igual a $3W$, em função de W ser maior que L_p , conforme definidos na figura 3.1. Observa-se que $W = 84$ mm e $L_p = 80$ mm. Portanto, o comprimento mínimo adotado foi governado pela largura máxima da seção transversal W , sendo seu valor de 260 mm. Para evitar os efeitos da flambagem global, o comprimento da coluna deve ser menor do que vinte vezes o raio de giração mínimo. Além das exigências relativas às dimensões, é recomendado que não haja nenhuma influência de furos nas extremidades.

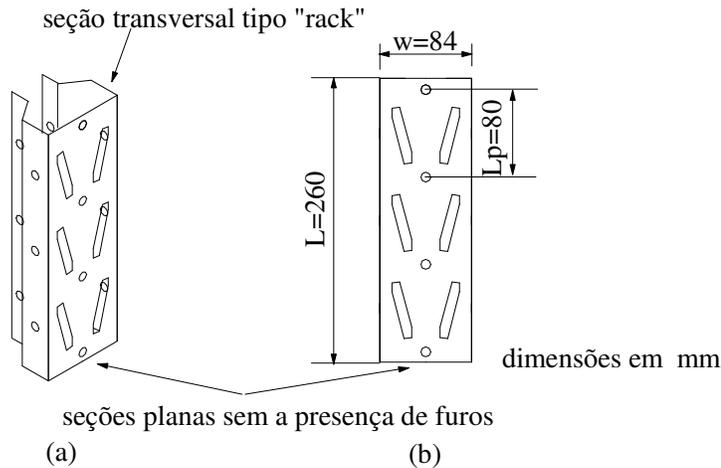


Figura 3.1. Vista geral dos protótipos ensaiados:

- (a) Vista em perspectiva dos protótipos ensaiados; (b) Vista com as dimensões da largura máxima da seção W , distância entre furos L_p e comprimento total L .

O esquema de montagem utilizado no ensaio está representado na figura 3.2, onde observa-se o posicionamento da coluna na prensa hidráulica. Na parte superior da máquina tem-se uma rótula e na inferior foram instaladas placas para diminuir a folga

entre as extremidades da coluna e a rótula. O carregamento foi aplicado no centro de gravidade da área mínima da seção transversal, CG_{\min} , conforme figura 3.3, fazendo-se coincidir o centro da placa com a posição do CG_{\min} da seção transversal. As dimensões e as nomenclaturas da seção transversal são apresentadas na figura 2.5.

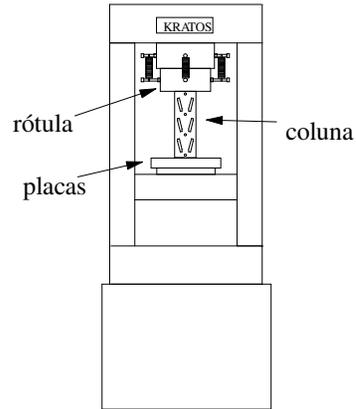


Figura 3.2. Esquema geral de montagem do ensaio de coluna curta, posicionada na prensa hidráulica KRATOS.

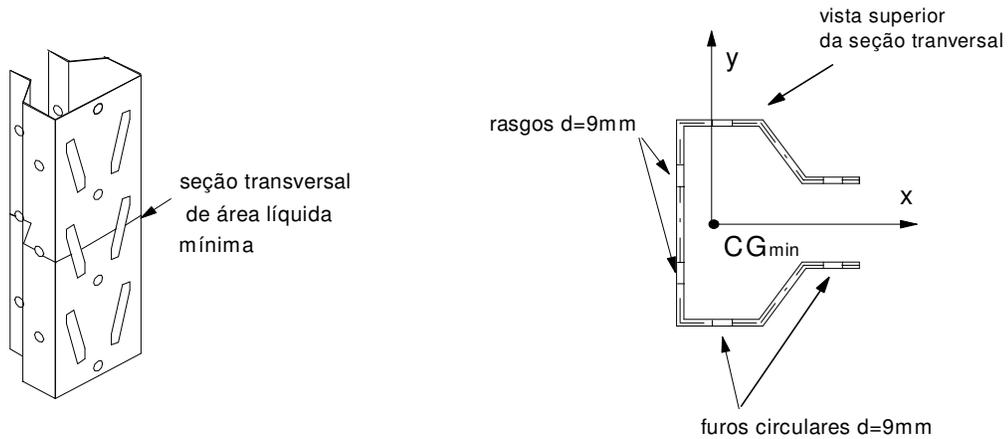


Figura 3.3. Seção transversal considerando a área líquida mínima com a indicação do centro de gravidade.

Os resultados experimentais obtidos nos ensaios realizados para as colunas curtas são apresentados na tabela 3.1 a seguir (Freitas et al (2001)).

Tabela 3.1 - Resultados da carga última experimental (P_{uexp}) dos ensaios realizados

Protótipo	P_{uexp} (kN)
CCMAX-1	144,207
CCMAX-2	136,604
CCMAX-3	140,773
CCMAX-4	137,340
P_{ua} (kN)	139,731

A partir destes resultados, utilizando-se as expressões anteriormente apresentadas, foi determinado $Q = 0,914$ (Oliveira (2000)).

3.3. Análise via elementos finitos

Conforme apresentado no capítulo anterior, a previsão do comportamento estrutural de elementos formados a frio perfurados exige a realização de ensaios experimentais. Porém, estes ensaios muitas vezes se tornam onerosos, pois exigem o material a ser ensaiado, mão de obra especializada e a mobilização de equipamentos para a sua realização. Por isto, têm-se buscado alternativas a estes ensaios.

Uma prática que tem sido difundida é o emprego da análise via elementos finitos, através de softwares comerciais, para a simulação do ensaio experimental. Este tipo de análise vem se tornando uma boa alternativa, embora ainda seja necessário um cuidadoso trabalho até que se obtenha a comprovação definitiva de sua validade.

Neste trabalho, procurou-se simular, através do software ANSYS (2001), o ensaio experimental da coluna curta, apresentado na figura 3.2. Assim, modelou-se a coluna, com as dimensões nominais do corpo de prova, conforme figura 3.1. A figura 3.4 ilustra a malha de elementos finitos utilizada nas análises.

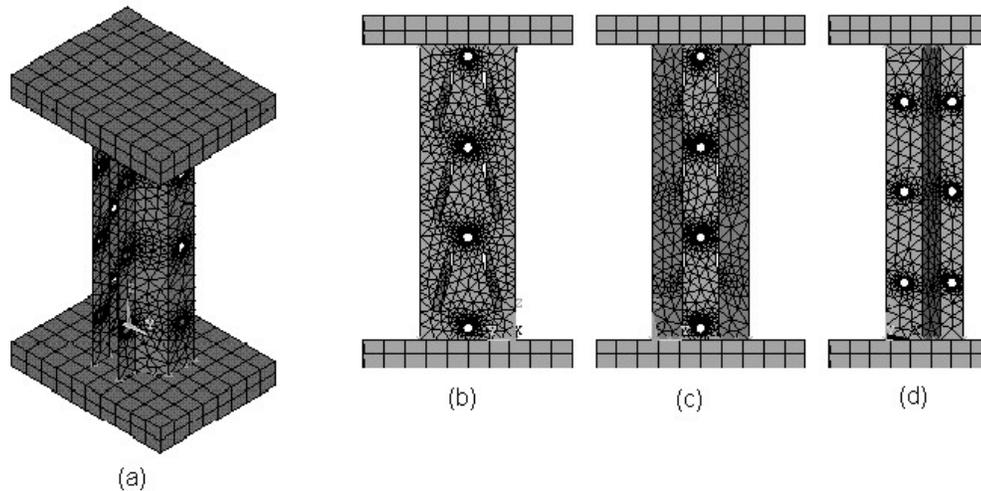


Figura 3.4. Malha de elementos finitos
a) vista isométrica; (b) alma; (c) garganta; (d) flanges.

Para a simulação da prensa, foram incluídas as placas de reação, conforme descritas no item 3.2. Estas placas têm o centro de gravidade coincidente com o centro de gravidade da área mínima da seção transversal, conforme acontece no ensaio experimental.

Na análise, todos os deslocamentos da placa inferior foram restringidos, e, na placa superior, o único deslocamento permitido foi a translação no sentido axial da coluna, que é o sentido de aplicação da carga. Estes procedimentos foram adotados buscando-se simular a atuação da prensa durante o ensaio.

3.4. Elementos utilizados na análise

Foram utilizados nesta análise três tipos de elementos, sendo um elemento de casca, para a simulação das paredes da coluna, um elemento de sólido, para a simulação das placas de reação e um elemento de contato para a simulação do atrito entre as placas e a coluna. A escolha destes elementos segue a recomendação de Davies (1997).

O elemento de casca, SHELL43 (figura 3.5), é um elemento de casca plástico, com 4 nós, e deslocamentos de translação e rotação nas três direções.

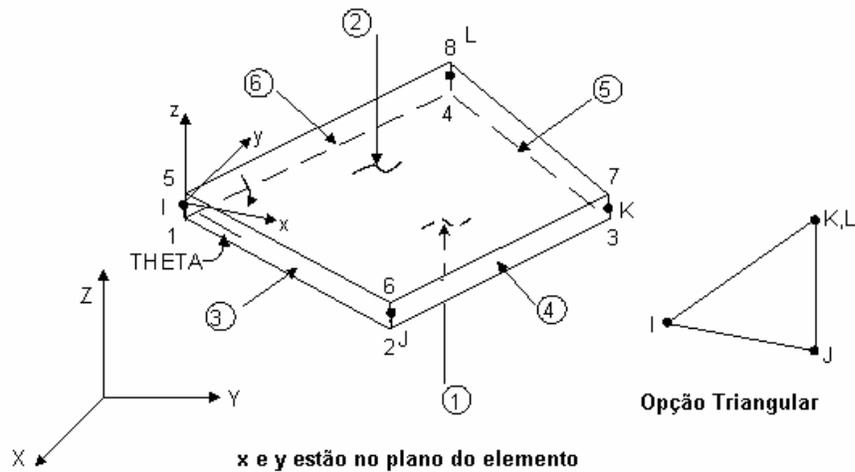


Figura 3.5. Elemento SHELL43

O elemento de sólido, SOLID45 (figura 3.6), é um elemento de sólido, com 8 nós, e deslocamentos de translação nas direções x, y e z.

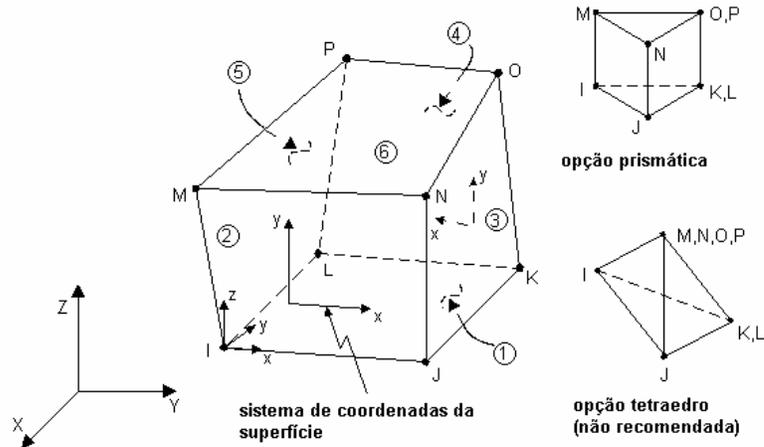


Figura 3.6. Elemento SOLID45

O elemento de contato, CONTAC49 (figura 3.7), é um elemento de sólido, com 5 nós, e deslocamentos de translação nas direções x, y e z. O coeficiente de atrito entre as colunas e as placas de reação foi adotado igual a 0,33.

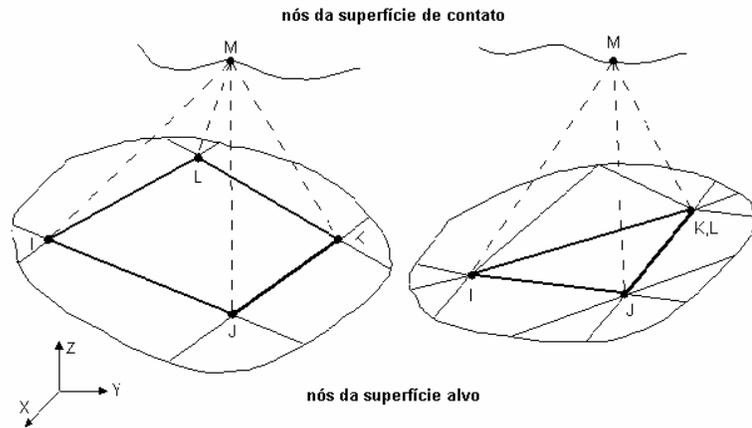


Figura 3.7. Elemento CONTAC49

Foram consideradas duas hipóteses para o material dos protótipos, sendo em ambas utilizada a aproximação bilinear do diagrama tensão-deformação. Na primeira delas, foram consideradas as propriedades nominais do aço, sendo o Módulo de Elasticidade igual a 205 GPa, Coeficiente de Poisson de 0,3, tensão de escoamento (f_y) igual a 250 MPa e tensão última (f_u) de 400 MPa. Na segunda hipótese, utilizaram-se as propriedades do aço obtidas através de ensaios de caracterização (Oliveira (2000)). Estes valores são de f_y e f_u iguais a 320,23 MPa e 432,5 MPa respectivamente.

3.6. Simulações realizadas

As simulações realizadas tiveram como objetivo o estudo do comportamento da coluna no ensaio de compressão, e a comparação de seus resultados com aqueles experimentais obtidos por Oliveira (2000). Além disto, procura-se avaliar a influência na coluna de fenômenos tais como a existência de imperfeições e das perfurações. Para isto foram modelados quatro protótipos:

- Coluna nominal: com furos e dimensões nominais da seção transversal;
- Coluna real: com furos e dimensões reais de um corpo de prova não ensaiado;
- Coluna bruta: sem furos e com as dimensões nominais da seção transversal;
- Coluna líquida: sem furos, e com a seção transversal de área igual à área líquida mínima.

3.6.1. Coluna nominal

Nesta etapa, foi simulado o corpo de prova com as suas dimensões nominais, ou seja, não foram consideradas as imperfeições geométricas. A figura 3.8 apresenta a seção com estas dimensões.

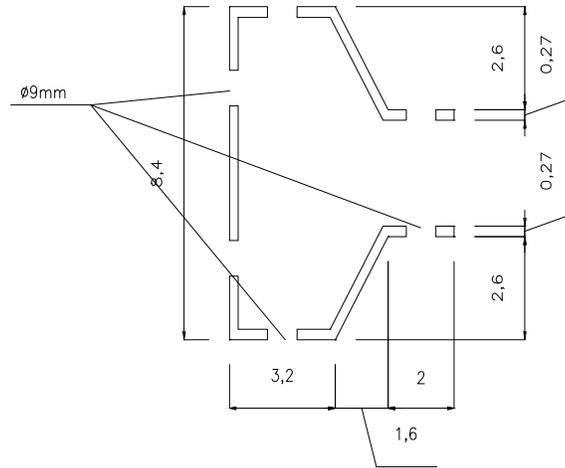


Figura 3.8. Seção nominal com suas dimensões em cm.

Nos flanges e nos flanges de ligação existem os furos circulares, enquanto na alma, além dos furos circulares, existem os rasgos destinados ao encaixe da ligação.

3.6.2. Coluna real

Neste caso, foi simulada a coluna com as dimensões reais de um corpo de prova, tomadas anteriormente ao ensaio. Estas medidas apontam imperfeições geométricas ao longo do comprimento da coluna, com alteração nas arestas e nos ângulos da seção transversal.

Ressalta-se que estas imperfeições são milimétricas, e, a despeito de sua ordem de grandeza, devem ser consideradas neste estudo, devido à sua influência no comportamento estrutural da coluna.

A figura 3.9 e a tabela 3.2 apresentam as seções consideradas e suas respectivas dimensões reais, bem como a nomenclatura utilizada para identificar as partes que compõem a seção transversal.

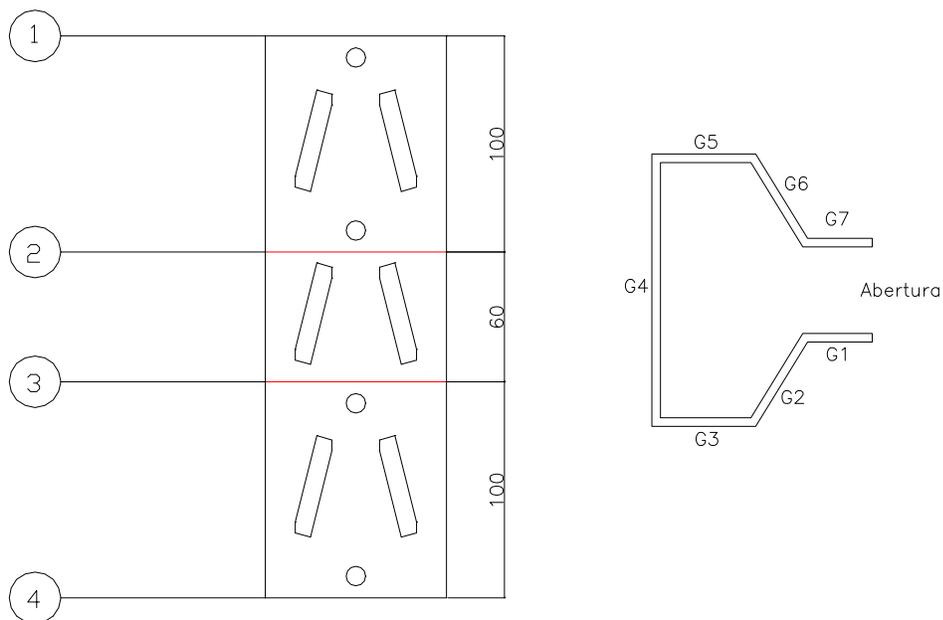


Figura 3.9 – Seções medidas e nomenclatura utilizada.

Tabela 3.2. Dimensões da coluna real

Seção	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	Abertura
1	19,10	23,30	32,70	80,45	31,85	22,85	22,60	40,00
2	18,70	24,55	31,30	80,55	31,15	23,35	22,65	37,70
3	18,70	24,10	31,85	80,60	30,50	23,80	23,05	36,75
4	19,95	23,00	33,75	80,90	31,25	23,05	22,40	36,65

3.6.3. Coluna bruta

Neste caso foi simulada a coluna considerando-se a a seção transversal cheia, sem a presença das perfurações. A figura 3.10 apresenta esta seção transversal e suas dimensões.

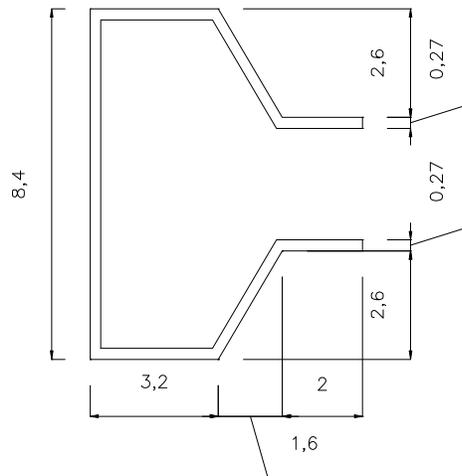


Figura 3.10. Seção bruta com suas dimensões em cm.

3.6.4. Coluna líquida

Nesta etapa, foi simulada uma coluna sem perfurações, porém com área da seção transversal igual à área líquida mínima do corpo de prova, ou seja, com área igual à área da seção transversal com maior presença de perfurações. Os ângulos e as proporções entre as dimensões dos elementos da seção, porém, foram mantidos na seção equivalente. A figura 3.11 apresenta esta seção equivalente com as suas dimensões.

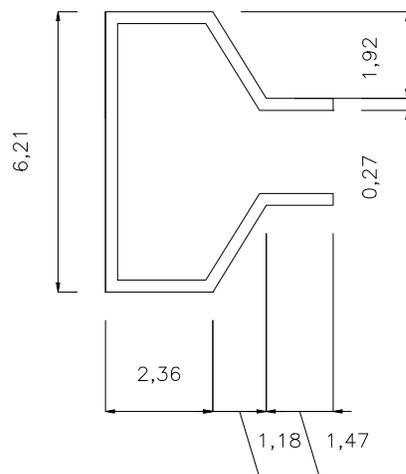


Figura 3.11. Seção líquida e suas dimensões em cm.

3.7. Apresentação e análise dos resultados

3.7.1. Capacidade de carga

Para avaliação da capacidade de carga das colunas foram realizadas oito simulações: cada uma das quatro apresentadas no item anterior com as propriedades reais e experimentais do aço. Os resultados destas simulações foram comparadas com a resistência experimental da coluna (P_{ua}), dados por Oliveira (2000) e também com resultados obtidos a partir das prescrições do RMI, utilizando-se as propriedades nominais (P_{RMI-n}) e experimentais (P_{RMI}) do aço.

As figuras 3.12 e 3.13 apresentam as curvas obtidas nas simulações numéricas e sua comparação com os resultados experimental e derivados das prescrições do RMI.

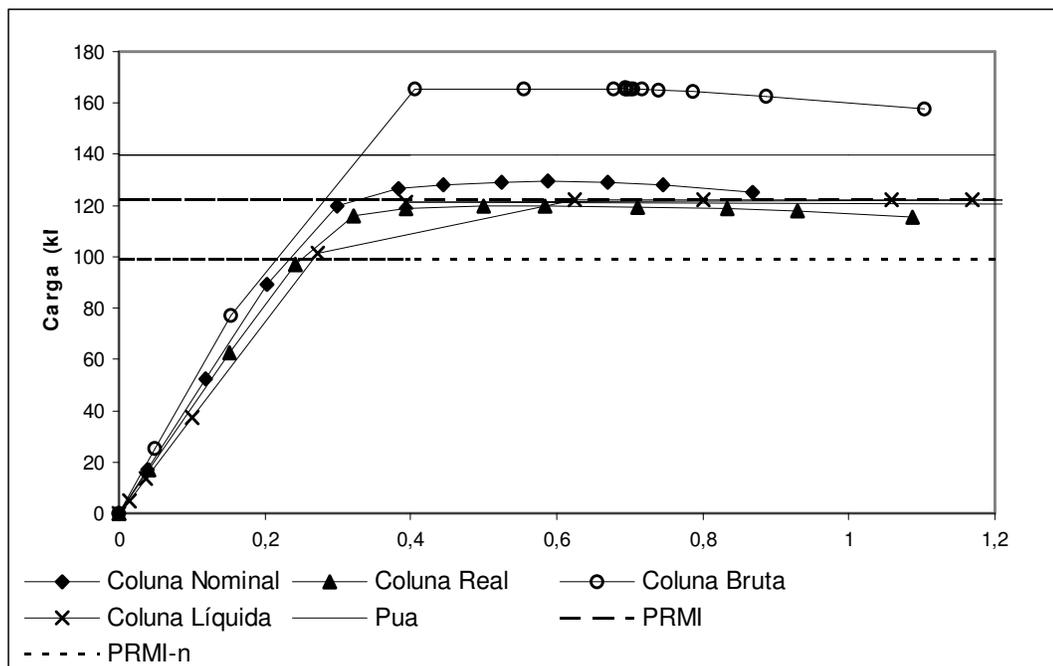


Figura 3.12. Curva Carga x deslocamento para as propriedades nominais ($f_y = 250$ MPa)

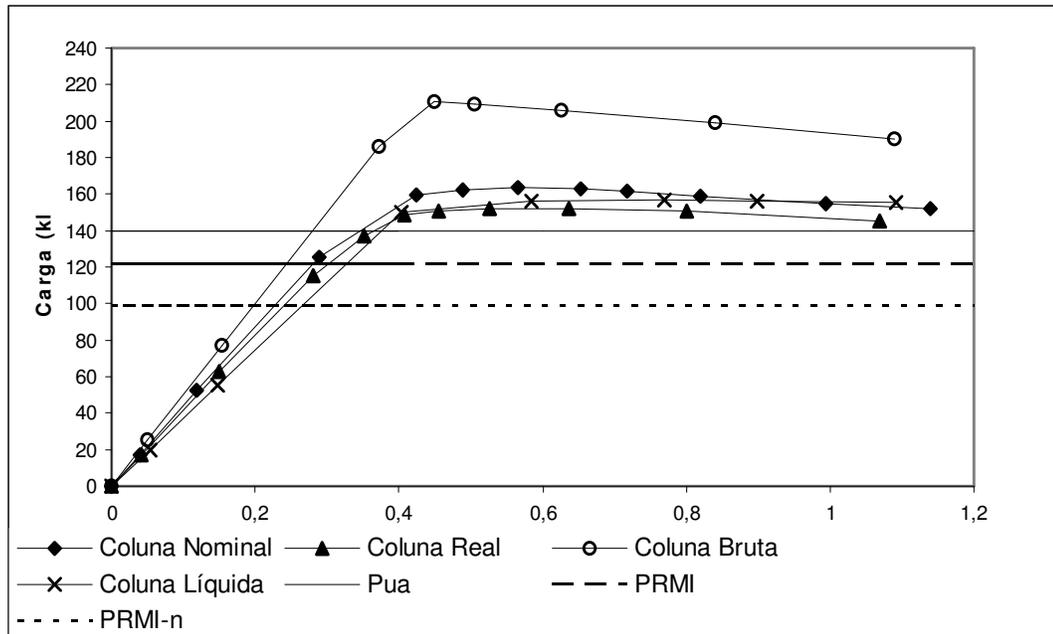


Figura 3.13. Curva carga x deslocamento para as propriedades experimentais ($f_y = 320,23 \text{ MPa}$)

A tabela 3.3 apresenta a comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais e obtidos através das prescrições do RMI.

Tabela 3.3. Comparação entre os valores obtidos

Protótipo	P_{ef} (kN)	P_{ef}/P_{ua}	P_{ef}/P_{RMI}	P_{ef-n}	P_{ef-n}/P_{RMI-n}
Coluna nominal	163,64	1,17	1,34	129,38	1,31
Coluna Real	150,78	1,08	1,23	119,92	1,21
Coluna Bruta	210,95	1,51	1,73	165,73	1,67
Coluna Líquida	156,57	1,12	1,28	122,48	1,24

P_{ef} - carga última obtida via elementos finitos com $f_y = 320,23 \text{ MPa}$
 P_{ef-n} - carga última obtida via elementos finitos com $f_y = 250 \text{ MPa}$
 P_{ua} - carga última experimental (139,73 kN)
 P_{RMI} - resistência obtida via prescrições do RMI com $f_y = 320,23 \text{ MPa}$ (122,14 kN)
 P_{RMI-n} - resistência obtida via prescrições do RMI com $f_y = 250 \text{ MPa}$ (98,98 kN)

Observa-se que, à exceção da coluna bruta, as demais apresentam boa correlação com o resultado experimental. Dos protótipos analisados, o que possui melhor

correlação com os resultados experimentais é a coluna real, onde se consideram as imperfeições geométricas e o encruamento do aço, o que comprova a influência destes parâmetros na resistência da coluna.

A comparação entre os resultados da coluna bruta e da nominal comprova a apreciável redução na resistência ocasionada pelas perfurações. E a boa correlação entre os resultados da coluna líquida e os dados experimentais indica a possibilidade do emprego área da seção líquida para a determinação da resistência da coluna para fins de pré-dimensionamento das estruturas.

3.7.2. Modo de Colapso

No ensaio da coluna curta, foi observado que o colapso se deu pela aproximação dos flanges de ligação à meia altura do corpo de prova, figura 3.14.



Figura 3.14. Vista das indicações das distorções nas extremidades da coluna pelo afastamento dos flanges de ligação e aproximação deste flanges na meia altura da coluna (Oliveira (2000)).

Para as situações simuladas, a figura 3.15 apresenta os modos de colapso obtidos, com ampliação de 10 vezes.

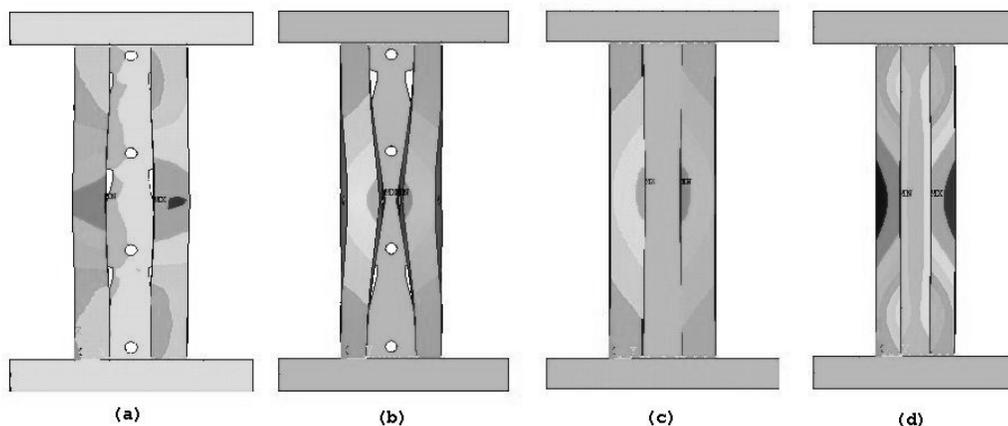


Figura 3.15- Deslocamentos obtidos com ampliação de 10 vezes
 (a) Coluna Nominal; (b) Coluna Real; (c) Coluna Bruta; (d) Coluna Líquida.

Para os protótipos em que são consideradas as imperfeições e perfurações (figura 3.15a e 3.15b), observam-se modos de colapso bastante pronunciados, com deslocamentos relativamente grandes. Já para os casos em que não foram considerados as imperfeições e furos, estes deslocamentos são consideravelmente menores, ficando praticamente indefinido o modo de colapso nestas situações (figura 3.16c e 3.16d). Observa-se, portanto, a grande influência das perfurações no modo de colapso.

Esta influência das perfurações é caracterizada pela presença de furo no flange de ligação à meia altura do corpo de prova. Este furo gera uma fragilização da coluna nesta seção, além de ser uma área de concentração de tensões, contribuindo então para a ocorrência acentuada de deslocamento provocando o modo de colapso representado na figura 3.16a e 3.16b.

Observa-se também que o encruamento do aço apresenta grande influência na resistência da coluna, proporcionando um ganho de resistência da mesma.

Os resultados obtidos mostram que as perfurações, imperfeições e encruamento do aço têm grande influência no comportamento estrutural da coluna. No caso das imperfeições, a simulação da coluna real comprova que sua existência induz ao modo de colapso experimental. Observa-se também que a fragilização provocada pelas perfurações e a concentração de tensões nas regiões dos furos são importantes no

comportamento da coluna, pois diminuem a resistência da coluna e amplificam os deslocamentos.

À exceção da coluna bruta, observam-se cargas últimas previstas pelas análises numéricas próximas à carga última experimental. Isto comprova que a simulação numérica é um recurso válido para a previsão da carga última, conforme evidenciam as simulações da coluna nominal e da coluna real. E ainda que na previsão do comportamento estrutural, pode-se utilizar a área líquida mínima no cálculo, constituindo este procedimento em uma alternativa de projeto para a eliminação dos ensaios experimentais requeridos em prescrição de norma.

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO SISTEMA DRIVE-IN

A análise via elementos finitos foi também utilizada para avaliar o comportamento estrutural do protótipo a ser ensaiado. Os objetivos desta simulação foram a avaliação preliminar do comportamento da estrutura e a definição dos procedimentos de ensaio, no tocante, principalmente, ao posicionamento do aparato de carga e da instrumentação do ensaio.

Na simulação foi utilizado o software ANSYS (2001), e foram empregados na simulação elementos finitos existentes na biblioteca deste programa. Foram feitos dois tipos de análise numérica. No primeiro deles, o sistema ensaiado foi simulado com o emprego de elementos reticulados. Em outra análise, a estrutura foi simulada com a utilização de elementos de casca, para a avaliação de seus efeitos localizados.

As propriedades geométricas dos elementos que foram utilizadas são as apresentadas na tabela 2.1. O material utilizado é o aço estrutural, com Módulo de Elasticidade (E) igual a 205 GPa, Coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,3 e densidade igual a 7,85 g/cm³. Suas tensões de escoamento (f_y) e de ruptura (f_u) foram determinadas por Oliveira (2000), e são, para a coluna, respectivamente 320,23 MPa e 331,33 MPa e para a viga 360,49 MPa e 417,07 MPa.

Neste capítulo serão apresentados os modelos de elementos finitos gerados para esta análise, com descrição dos elementos utilizados e das hipóteses assumidas.

4.1. Simulação do sistema drive-in com elementos de barra

4.1.1. Elementos utilizados

Os elementos empregados na análise foram escolhidos seguindo as indicações de Campos (2003). A escolha foi norteada visando utilizar elementos capazes de representar o comportamento da estrutura e ao mesmo tempo buscando-se eficiência computacional.

A seguir, são apresentados os elementos utilizados na análise.

- Elemento BEAM44

Este é um elemento unidimensional que capta esforços de tração, compressão, torção e flexão. Ele possui seis graus de liberdade por nó, e permite a liberação das restrições nas extremidades, ou seja, permite que sejam simuladas estruturas rotuladas.

Os dados de entrada para o tipo de análise realizada são a área, os momentos de inércia e as distâncias entre o centro de gravidade e as extremidades da seção.

Neste trabalho o elemento BEAM44 foi empregado para a simulação das colunas, das longarinas e das vigas de túnel. A figura 4.1 apresenta a configuração deste elemento.

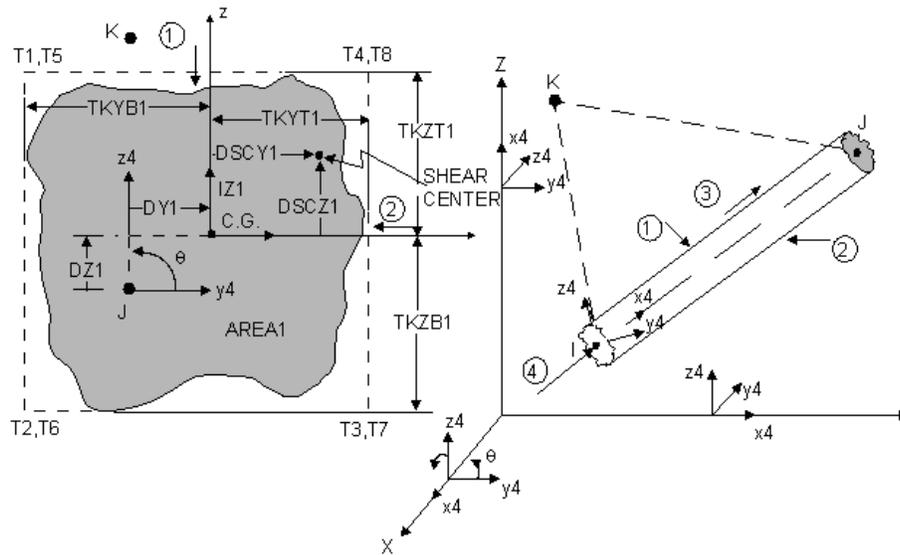


Figura 4.1. Elemento BEAM44.

- Elemento LINK180

Este elemento é unidimensional, e capta esforços de tração e compressão. Ele possui três graus de liberdade por nó, ou seja, as translações nas três direções. Ele é adequado para a simulação de treliças, sendo por isto escolhido para a simulação dos contraventamentos do rack.

Para a análise o único dado de entrada necessário é a área da seção transversal. A figura 4.2 apresenta o esquema deste elemento.

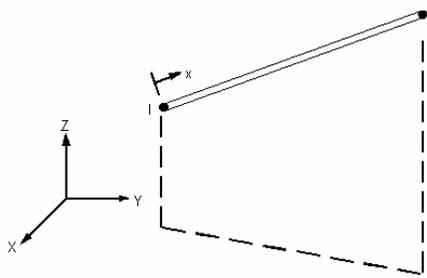


Figura 4.2. Elemento LINK180.

- Elemento BEAM4

Este elemento é semelhante ao elemento BEAM44, pois possui seis graus de liberdade por nó e capta tração, compressão, torção e flexão. Porém, ele não permite a liberação das restrições nas extremidades, e possui formulação que exige menos esforço computacional. Nesta análise este elemento foi utilizado para a simulação das vigas de túnel, por ser suficiente na simulação destes elementos estruturais.

Os dados de entrada necessários são a área, os momentos de inércia e as alturas da seção transversal. A figura 4.3 apresenta o elemento BEAM4.

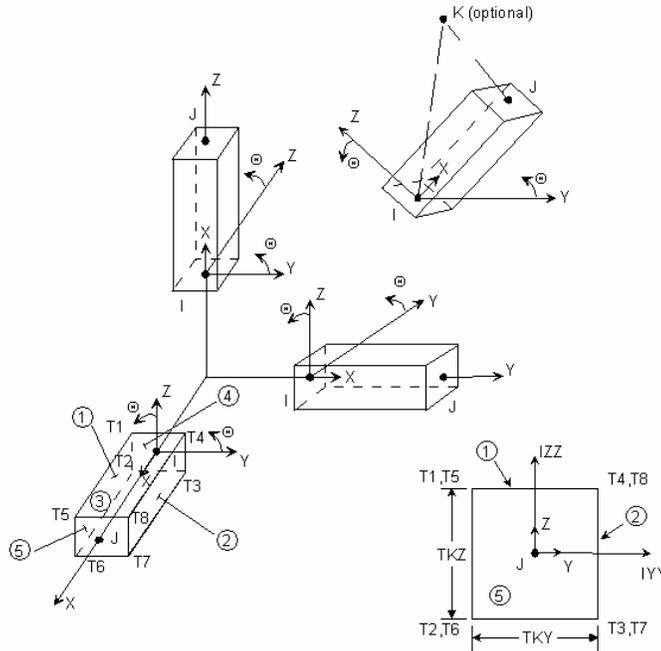


Figura 4.3. Elemento BEAM4.

- Elemento COMBIN14

Elemento de mola, que pode ter aplicações tanto torsionais quanto axiais, em problemas bi ou tridimensionais. Nesta análise, estes elementos foram utilizados como molas torsionais para simular a rigidez das ligações dos braços com as colunas e também das longarinas com as colunas.

No tipo de análise realizado, o único dado de entrada necessário para este elemento é a rigidez da mola. Estes valores são dados por Oliveira (2000), que fez estudo experimental destas ligações. Ele determinou, então, o valor de 75,193 kNm/rad para a ligação das longarinas e de 73,862 kNm/rad para a ligação dos braços, sendo estes valores empregados na análise. A figura 4.4 apresenta o elemento COMBIN14.

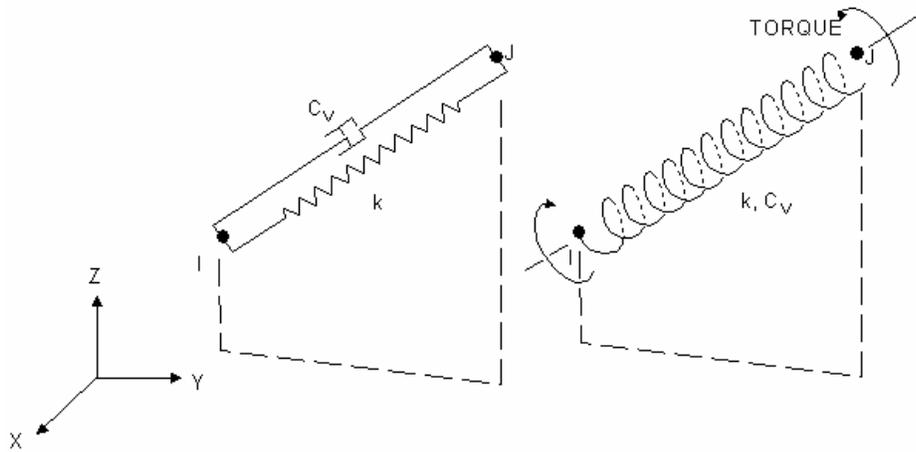


Figura 4.4. Elemento COMBIN14.

A figura 4.5 apresenta o modelo gerado com elementos de barra, com a identificação do posicionamento de cada tipo de elemento.

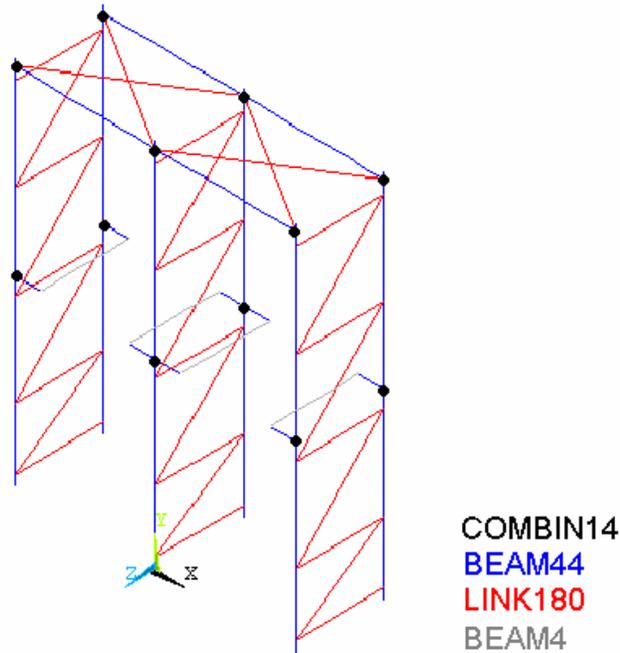


Figura 4.5. Posicionamento dos elementos utilizados na análise.

4.1.2. Condições de carregamento e de fixação da estrutura

Para a simulação das condições de ensaio, foram utilizadas cargas distribuídas nas vigas de túnel e cargas concentradas aplicadas no topo das colunas.

Para a definição da carga vertical a ser aplicada, foi realizada uma análise de autovalor, para determinar a carga crítica de flambagem da estrutura. Depois, a partir desta análise, foi determinada a carga por palete, que foi distribuída ao longo das vigas de túnel.

A carga horizontal aplicada no topo das colunas foi determinada como 1,5 % da carga total no sistema (RMI (1997)), e foi aplicada em dois pontos.

Foram feitas três considerações de fixação na base. No primeiro caso, foram adotadas rótulas na ligação das colunas com o piso. A segunda hipótese adotou esta ligação semi-rígida, com a rigidez experimental determinada por Campos (2003). Em outra situação considerou-se a ligação da base como engaste.

A figura 4.6 apresenta a estrutura, com as cargas aplicadas e a indicação da fixação da base.

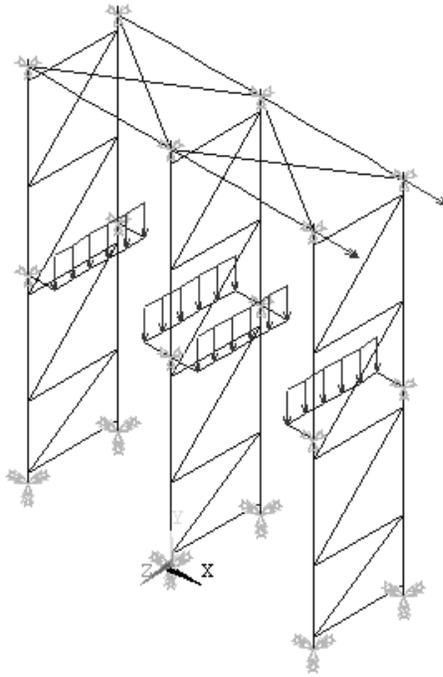


Figura 4.6. Carregamento utilizado e fixação da base.

4.1.3. Hipóteses assumidas na análise

A não linearidade física foi considerada no modelo com o emprego de um diagrama bilinear para representar a curva Carga x Deformação do aço, cujos valores de f_y e de f_u foram apresentados no início deste capítulo. Também foi considerada a não linearidade geométrica na análise.

Foi utilizado o controle de deslocamentos, e a carga foi dividida em 20 incrementos, e, ao final de cada subetapa os resultados foram registrados no arquivo de resultados.

4.2. Simulação do sistema drive-in utilizando elementos de casca

Para o estudo dos fenômenos localizados no sistema drive-in, foi feita a simulação de um conjunto das colunas e longarinas do mesmo, com a discretização feita através de elementos de casca. As figuras 4.7 e 4.8 apresentam aspectos do modelo gerado.

Foi utilizado para esta análise o elemento de casca SHELL181. Este elemento possui características semelhantes ao elemento SHELL43 utilizado no item anterior (figura 3.5), e é indicado para esta análise devido à estabilidade de sua formulação, que permite convergência mais rápida que o seu equivalente.

A malha foi gerada automaticamente, com limitações impostas pelo número de elementos suportado pela versão do programa. As ligações foram simuladas através do acoplamento das translações dos nós das regiões onde são empregados parafusos.

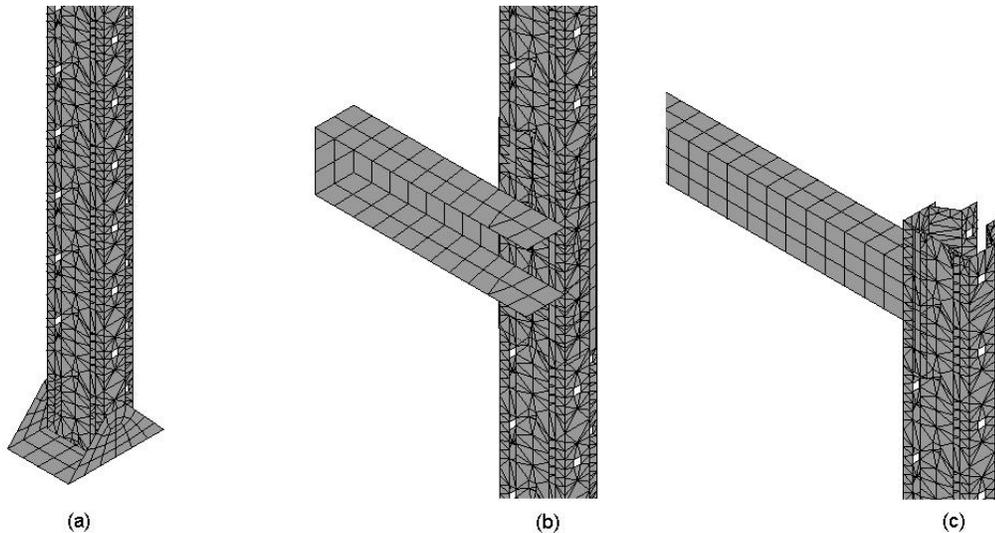


Figura 4.7. Detalhes do modelo de casca.

(a) Placa de base; (b) Braço; (c) Ligação das longarinas com as colunas



Figura 4.8. Vista global do modelo.

Este modelo foi utilizado para a avaliação de possíveis efeitos localizados nos componentes do rack. Observou-se então que as tensões mais elevadas acontecem na região dos braços, conforme ilustra a figura 4.9.

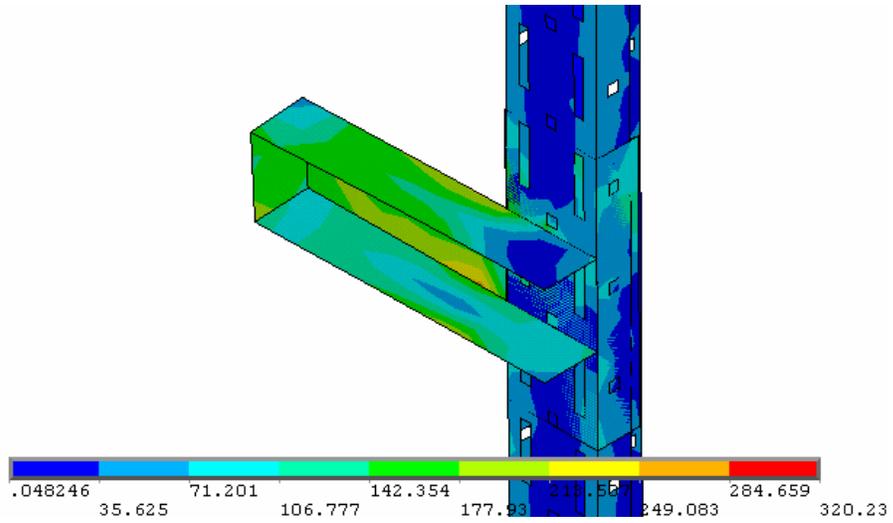


Figura 4.9. Tensões de Von Mises na região dos braços.

Nos demais componentes do sistema foram obtidos níveis de tensões bastante inferiores aos obtidos nas regiões dos braços. Não foram também observados efeitos localizados de flambagem nas colunas ou longarinas. Esta análise foi importante para a definição do posicionamento dos instrumentos de medição durante o ensaio.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Conforme apresentado no capítulo anterior, a partir do projeto elaborado pela empresa Águia Sistemas de Armazenagem, definiu-se que seria ensaiado um rack composto por dois corredores, com a profundidade de um palete e um nível de carregamento.

O RMI (1997) prescreve um procedimento de ensaio para avaliar o desempenho dos componentes do sistema porta-paletes, em que se utiliza um protótipo semelhante ao adotado neste trabalho, ou seja, dois corredores com a profundidade de um palete, sendo um nível de carregamento. Tendo em vista a inexistência da prescrição de um procedimento para o sistema drive-in em estudo, as prescrições do RMI foram adaptadas às condições exigidas por este tipo de sistema.

O objetivo do ensaio realizado é a observação do comportamento da estrutura quanto a parâmetros como a sua deslocabilidade, rigidez do conjunto e o comportamento e a interação entre os diversos componentes do sistema. Estes resultados servirão também para validar os procedimentos numéricos empregados para o estudo de sistemas de armazenagem industrial.

Foram realizados dois ensaios com a mesma geometria e com as mesmas condições de carga, chamados de RACK01 e RACK02. Neste capítulo serão descritas a montagem da estrutura, o sistema de carregamento adotado, a instrumentação realizada e a metodologia do ensaio.

5.1. Caracterização do material

Foram realizados ensaios de caracterização do aço dos braços, devido ao fato deste componente estar submetido a maiores tensões. Além disto, nestes componentes é utilizado o aço SAE1008, para o qual a NBR 14672 impõe restrições de uso. A tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.1. Resultados do ensaio de caracterização do aço

CP	fy (MPa)	fu (MPa)	Alongamento residual (%)
1	366,11	449,26	30
2	360,75	442,56	30
3	339,96	429,15	30
Média	353,04	439,21	30

5.2. Montagem da estrutura

Os protótipos ensaiados consistiram em um sistema drive-in projetado pela Água Sistemas de Armazenagem, e fornecido pela mesma empresa. A apresentação desta estrutura é feita nas figuras 5.1 a 5.3. Os componentes do sistema foram apresentados no capítulo 2.

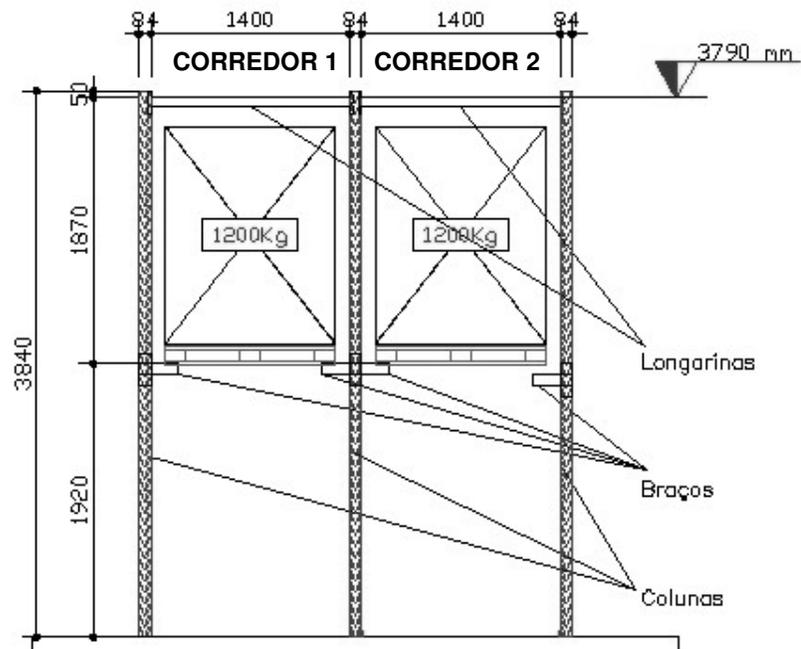


Figura 5.1. Vista frontal do protótipo ensaiado, com sua carga de projeto.

Observa-se na figura 5.1 a vista frontal do protótipo, com suas dimensões e com a identificação de seus componentes. Também é indicado o posicionamento dos paletes, e é indicada a carga de projeto.

Pode-se ver que existe um nível de carregamento, com os braços posicionados à meia altura da coluna. A definição da altura do protótipo foi feita levando-se em consideração a infraestrutura disponível para a montagem do ensaio.

A figura 5.2 apresenta a vista lateral do protótipo, com suas dimensões. Observa-se o posicionamento dos contraventamentos, com as distâncias entre eles e, em segundo plano, pode-se ver a viga de túnel na profundidade do rack.

A figura 5.3 apresenta a vista superior da estrutura. Nela pode-se ver em primeiro plano a disposição dos contraventamentos superiores, em forma de x, e as longarinas. Abaixo delas, à meia altura, estão as vigas de túnel também representadas na figura.

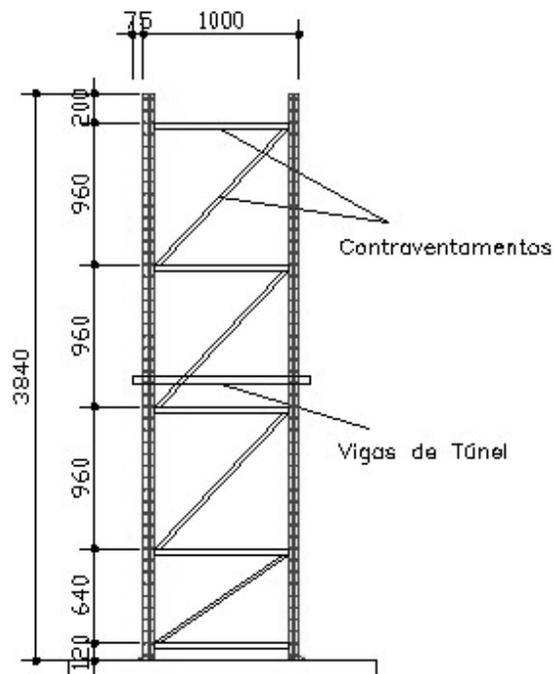


Figura 5.2. Vista lateral do protótipo ensaiado.

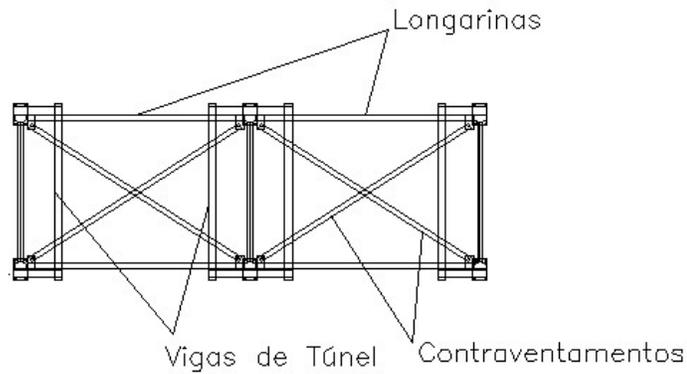


Figura 5.3. Vista superior do protótipo ensaiado.

A ligação das longarinas é feita utilizando-se garras dentadas, que se prendem aos rasgos existentes na alma da coluna, e um parafuso de fixação que se prende ao flange da mesma. Este parafuso é utilizado apenas como segurança contra o possível desencaixe da ligação durante a movimentação de cargas. Já a ligação dos braços é feita através de seis parafusos, que se prendem aos flanges da coluna. Na figura 5.4 observam-se as garras dentadas que prendem as duas longarinas à coluna central do rack, e na figura 5.5 pode-se ver a ligação dos braços.

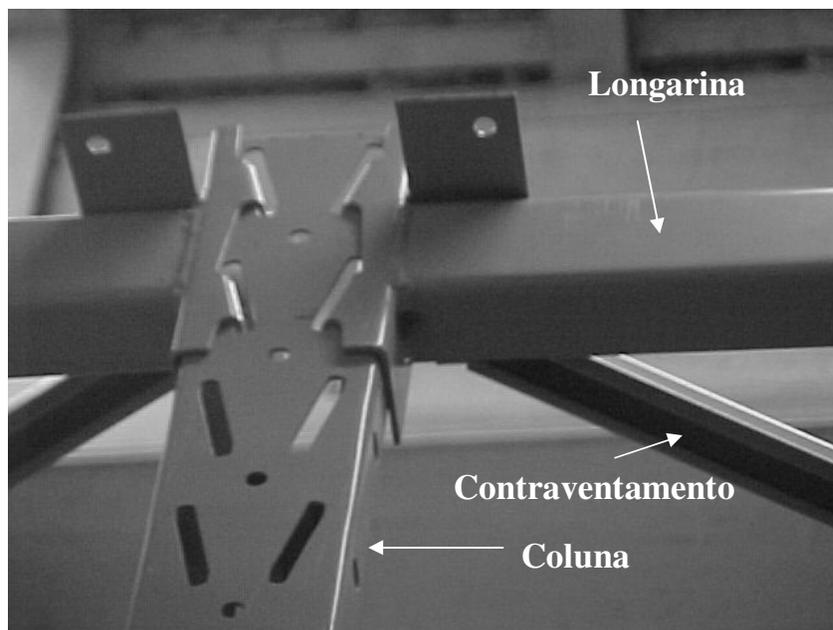


Figura 5.4. Ligação das longarinas com a coluna.

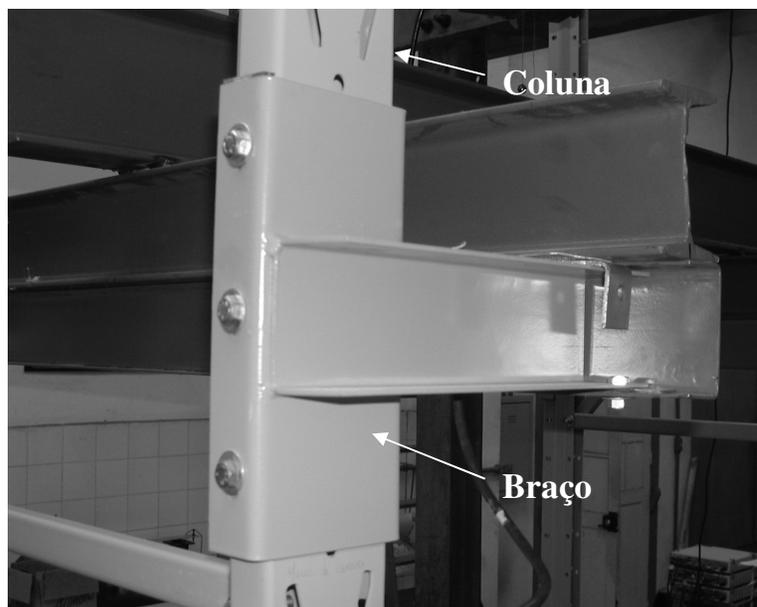


Figura 5.5. Ligação do braço com a coluna

A fixação do sistema se deu através das placas de base, que foram fixadas por meio de parabolts em blocos de concreto, que são presos através de parafusos à laje de reação. Os blocos de concreto foram armados para se evitar a fissuração, e o concreto empregado teve a resistência à compressão (f_{ck}) de 20 MPa. As dimensões dos blocos foram determinadas visando posicionar o protótipo de modo a possibilitar a fixação dos pórticos de reação nas posições necessárias para que as cargas verticais fossem aplicadas corretamente.

Para a fixação de cada placa ao bloco, foram utilizados quatro parabolts de 5/16". As figuras 5.6 e 5.7 apresentam o esquema de fixação do rack.

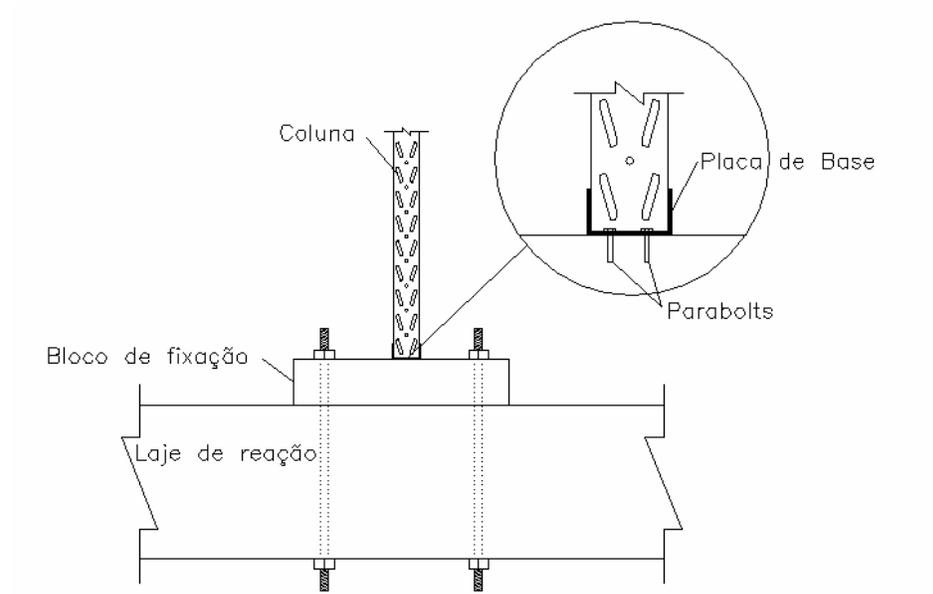


Figura 5.6. Esquema de ligação do protótipo à laje de reação.

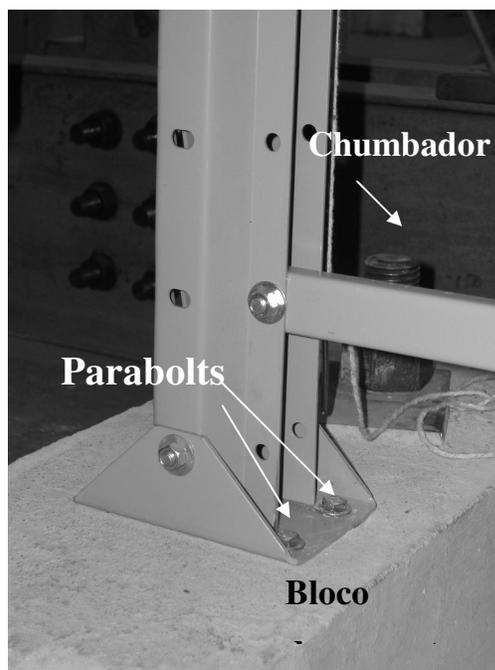


Figura 5.7. Fixação da base.

A montagem da estrutura foi iniciada com a montagem dos painéis laterais, compostos por duas colunas unidas por contraventamentos. A fixação dos contraventamentos se dá através de parafusos, conforme apresenta a figura 5.8.



Figura 5.8. Ligação dos contraventamentos à coluna.

Observa-se na foto que um único parafuso transpassa os dois perfis que compõem o contraventamento, fixando-os aos flanges de ligação das colunas.

Montados os painéis laterais, é feito o posicionamento das longarinas no topo. Estas longarinas são encaixadas e parafusadas, conforme apresentado na figura 5.4. Após o posicionamento das longarinas, são instalados os contraventamentos superiores, que são parafusados a abas existentes nas longarinas especialmente com esta finalidade, conforme visto na figura 5.9.

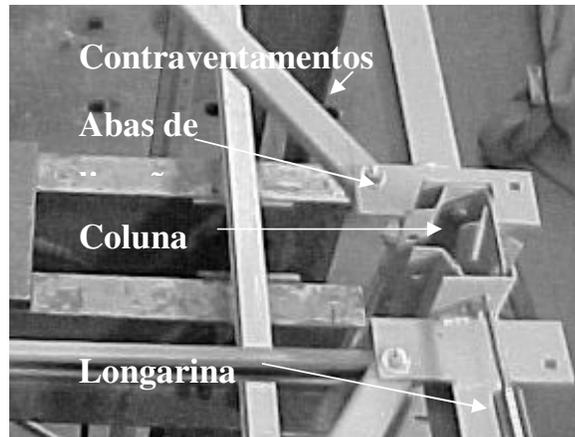


Figura 5.9. Abas para fixação dos contraventamentos superiores.

Apesar das duas barras de contraventamento serem idênticas, devido a imperfeições durante a montagem observou-se a impossibilidade de encaixe das mesmas à estrutura. Assim, foi necessário refazer a furação das barras, para viabilizar a montagem. Isto ocorreu na montagem dos dois protótipos ensaiados.

Observou-se na instalação dos braços a existência de uma folga entre o suporte do braço e a coluna, em virtude do primeiro apresentar largura superior à outra. Isto aconteceu devido a um erro de fabricação. Para minimizar os efeitos desta folga, foram utilizadas chapas com furação idêntica à do suporte do braço para o preenchimento do espaço entre a coluna e o mesmo, conforme apresenta a figura 5.10.

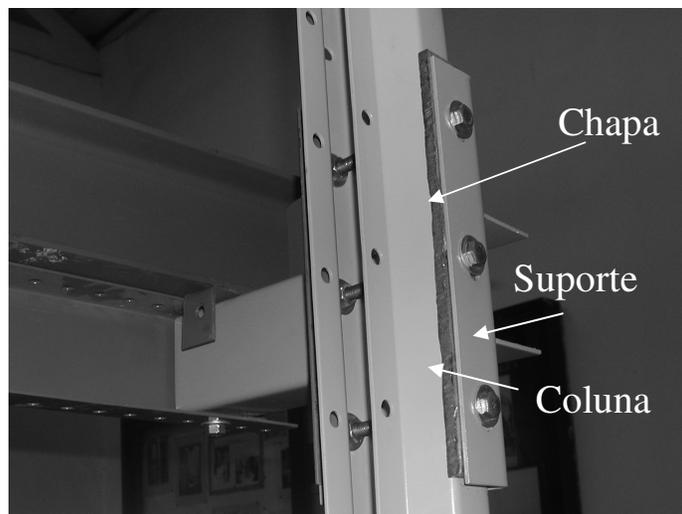


Figura 5.10. Ligação do braço à coluna.

Finalmente, foram instaladas as vigas de túnel que são parafusadas ao flange inferior dos braços, conforme mostrado na figura 5.11. As vigas de túnel possuem as funções de receber as cargas distribuídas e transmiti-las aos braços, além de serem importantes na contenção lateral dos mesmos.

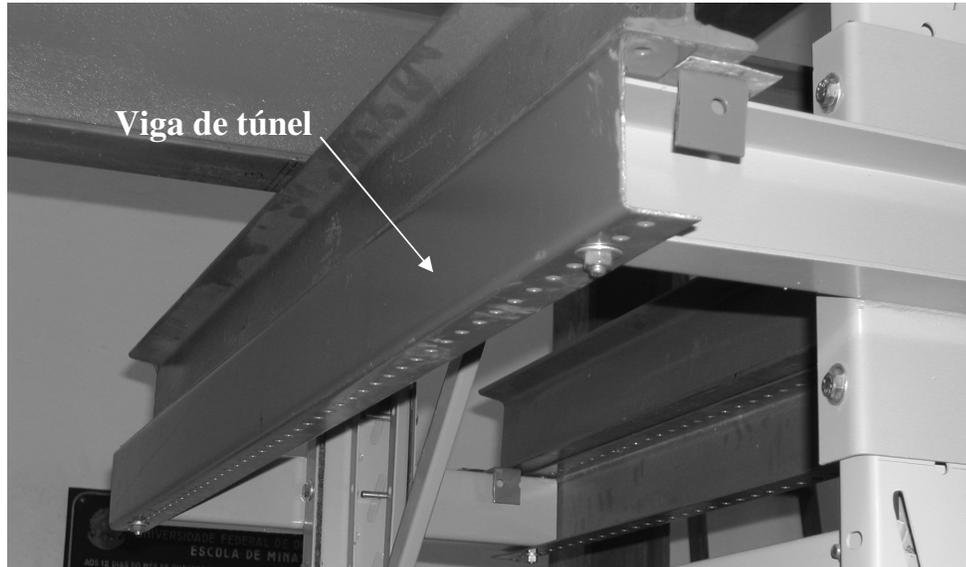


Figura 5.11. Vigas de túnel.

5.3. Sistemas de aplicação de cargas

Para a realização do ensaio, foi necessária a aplicação de cargas verticais e horizontais. Foi então instalado o aparato para a aplicação destes carregamentos, utilizando-se pórticos de reação e diversos equipamentos e acessórios.

A partir das simulações numéricas preliminarmente realizadas, observou-se que seria suficiente a utilização de cilindros hidráulicos com a capacidade de 100 kN, sendo portanto todo o sistema de aplicação de cargas projetado tendo como referência este valor.

Além dos cilindros hidráulicos, foi montado ainda um sistema de corda e roldana, visando a aplicação das cargas horizontais no topo da estrutura.

5.3.1. Sistema de aplicação de cargas verticais

Para a aplicação das cargas verticais, foram utilizados dois cilindros hidráulicos, chamados Cilindro Hidráulico 1 e Cilindro Hidráulico 2, da marca ENERPAC, com a capacidade de 100 kN. Estes cilindros foram instalados em dois pórticos de reação.

A altura das vigas de túnel é de 1,92 m. Assim, é importante que a altura dos pórticos permita a instalação do aparato de carregamento (cilindro hidráulico, célula de carga, rótula e vigas de transmissão) nesta altura.

A figura 5.12 apresenta o esquema de carregamento vertical adotado. Observa-se o posicionamento dos pórticos e dos atuadores em relação ao sistema ensaiado.

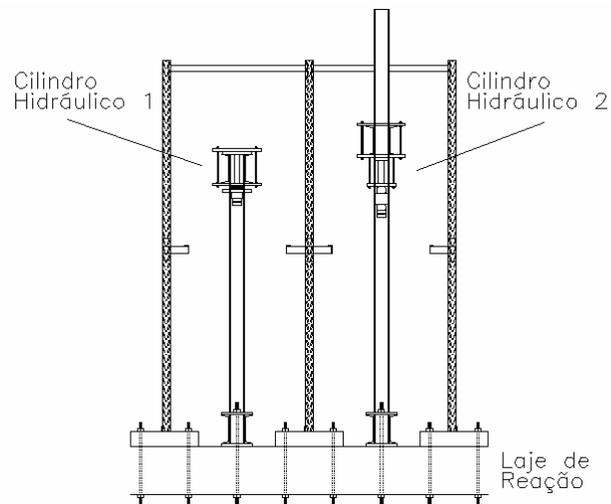


Figura 5.12. Carregamento vertical

O pórtico adotado para a montagem do Cilindro Hidráulico 1 possui altura de serviço máxima de 2,70 m. Para a fixação do atuador neste pórtico, foi executado um sistema de fixação em que a viga do pórtico foi fixada entre duas chapas, num esquema chamado ‘sanduíche’, ficando o cilindro posicionado entre as vigas C componentes do pórtico, conforme apresentado nas figura 5.13 e 5.14.

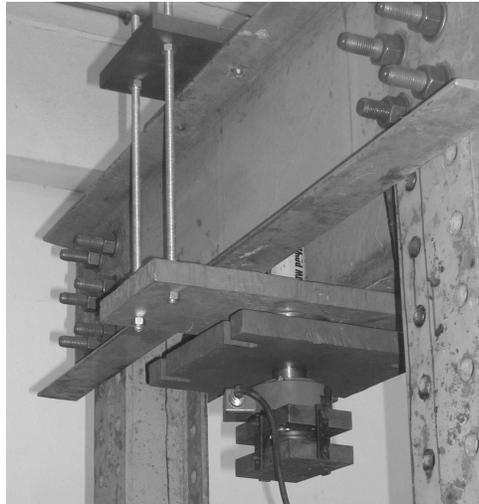


Figura 5.13. Montagem do Cilindro Hidráulico 1

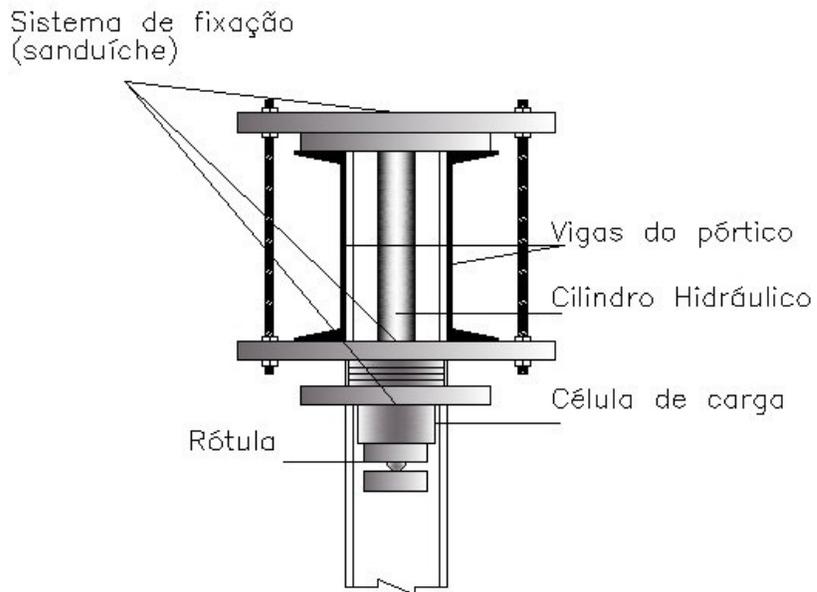


Figura 5.14. Esquema de montagem do Cilindro Hidráulico 1

Para o Cilindro Hidráulico 2, foi utilizado um pórtico cuja altura máxima de serviço é de 4,20 m. Neste caso, o sistema de fixação do atuador é apresentado nas figuras 5.15 e 5.16, onde são também indicados os componentes da montagem do Cilindro Hidráulico 2.



Figura 5.15. Montagem do Cilindro Hidráulico 2

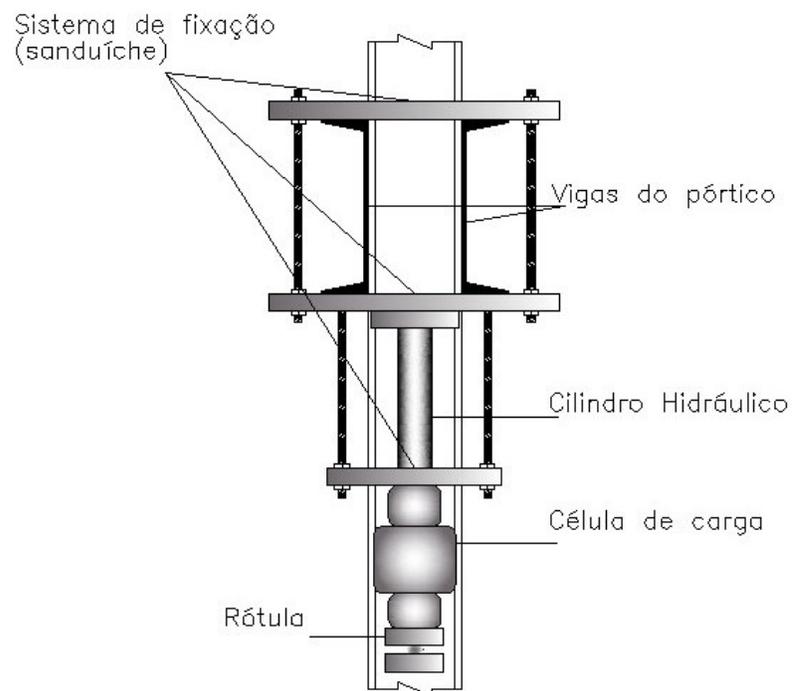


Figura 5.16. Esquema de montagem do Cilindro Hidráulico 2

A transmissão das cargas para a estrutura procurou simular o carregamento distribuído transmitido pelos paletes para as vigas de túnel. Foi então montado um sistema de vigas de transmissão de cargas, conforme apresentado na figura 5.17, onde se

vê o sistema montado para o corredor 2 do protótipo. Sistema de aplicação de cargas semelhante foi construído no corredor 1.

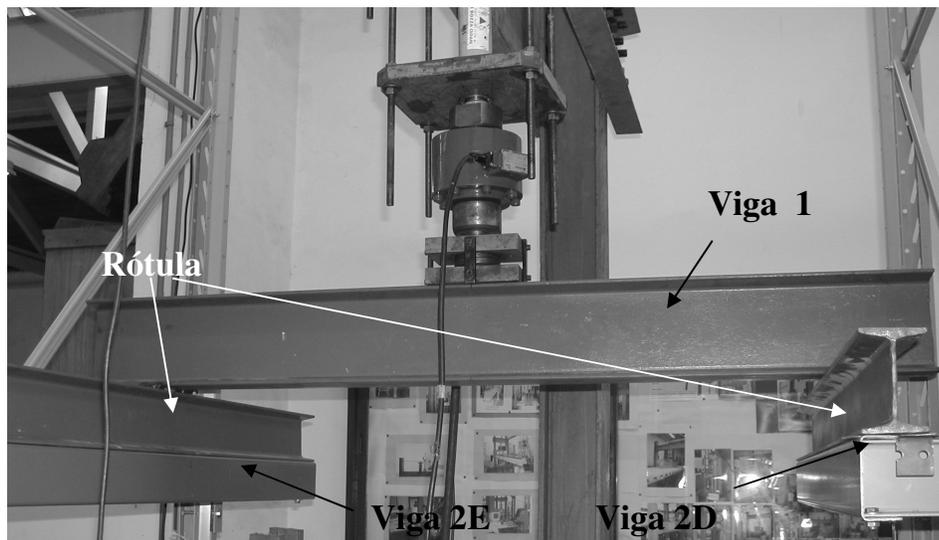


Figura 5.17. Vigas de transmissão de carga.

O sistema é composto por três vigas. A carga do atuador hidráulico é aplicada em uma viga colocada perpendicularmente às vigas de túnel chamada Viga 1, identificada na figura 5.17, que por sua vez descarrega em duas vigas colocadas sob ela, vigas 2E e 2D. A determinação das dimensões destas vigas foi feita considerando-se a carga atuante de 10 kN, e além da verificação ao estado limite último, foi verificado também o estado limite de utilização.

5.3.2. Sistema de aplicação de cargas horizontais

Conforme apresentado anteriormente, na realização de ensaios de sistemas de armazenagem industrial é necessária a aplicação de cargas horizontais, que simulam efeitos como impactos, cargas de vento, e, principalmente, a falta de prumo da estrutura.

O RMI (1997) indica para sistemas porta-paletes a aplicação, em cada nível de carregamento, de uma carga horizontal igual a 1,5 % da carga total até este nível. No sistema drive-in, a aplicação de cargas ao longo de toda a sua altura não se justifica, uma vez que não existem vigas na direção transversal para transmitir esta carga (Campos (2003)).

Assim, optou-se pela aplicação de uma carga horizontal igual a 1,5 % da carga total do sistema no topo da estrutura. A aplicação desta carga se deu ao longo de todo o ensaio, com seu aumento gradual, mantendo os 1,5% do passo de carga vertical.

Na escolha do método de aplicação desta carga buscou-se uma solução prática, economicamente viável e eficiente para os interesses do ensaio. Decidiu-se, então, que um sistema de corda e roldanas, com a carga dada por intermédio da adição controlada de água, seria o mais adequado.

A escolha deste sistema baseou-se na análise da viabilidade de posicionamento da carga a 3,99 m de altura e na ordem de grandeza das cargas aplicadas. Sendo a carga máxima prevista no sistema igual a 200 kN, observa-se que a carga máxima a ser atingida é de 3 kN. Sendo esta carga aplicada em dois pontos, resulta em 1,5 kN por ponto de aplicação. A figura 5.18 apresenta o sistema de aplicação de cargas verticais, e a figura 5.19 apresenta o esquema de carregamento horizontal.

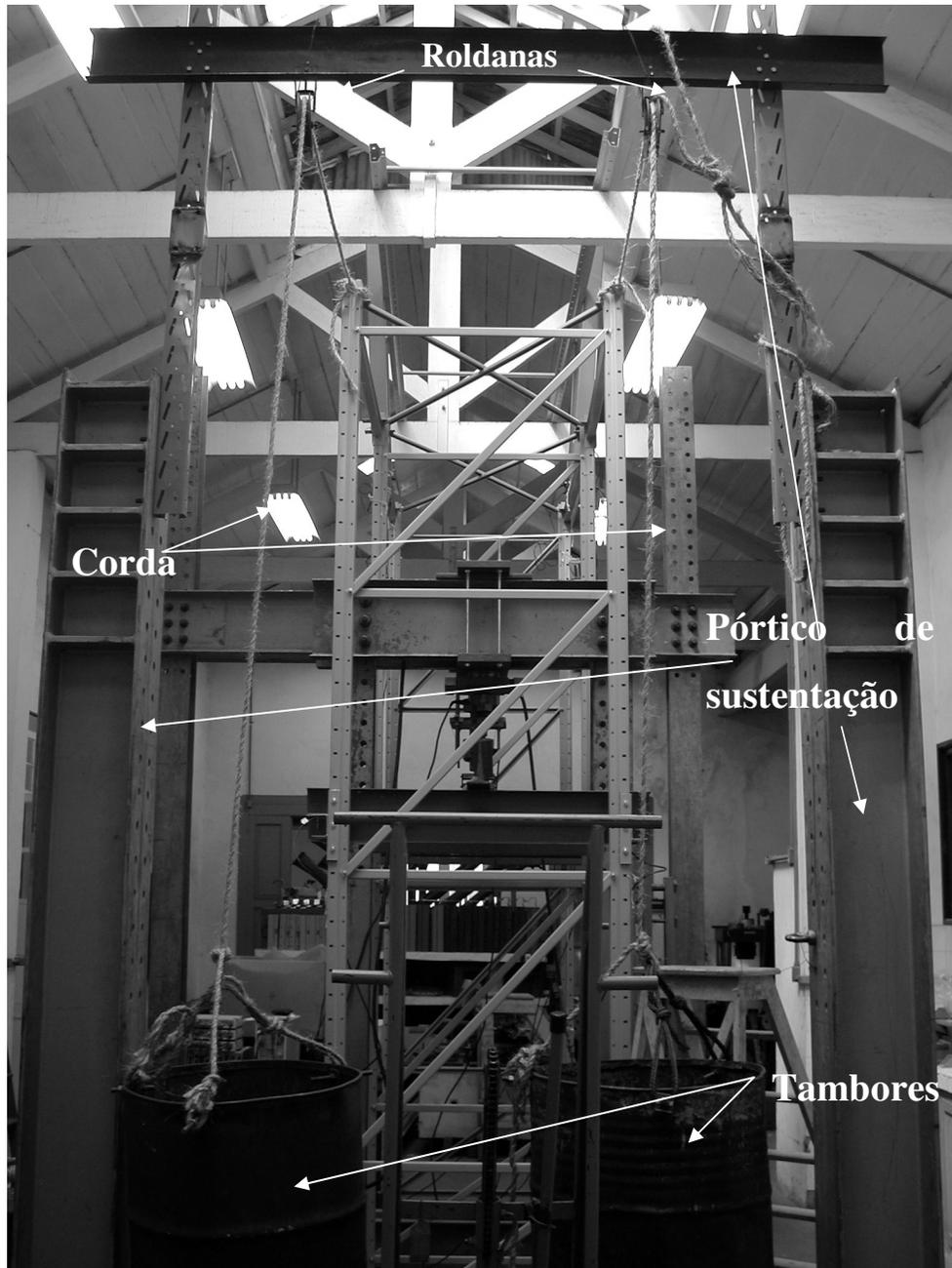


Figura 5.18. Sistema de aplicação de cargas horizontais.

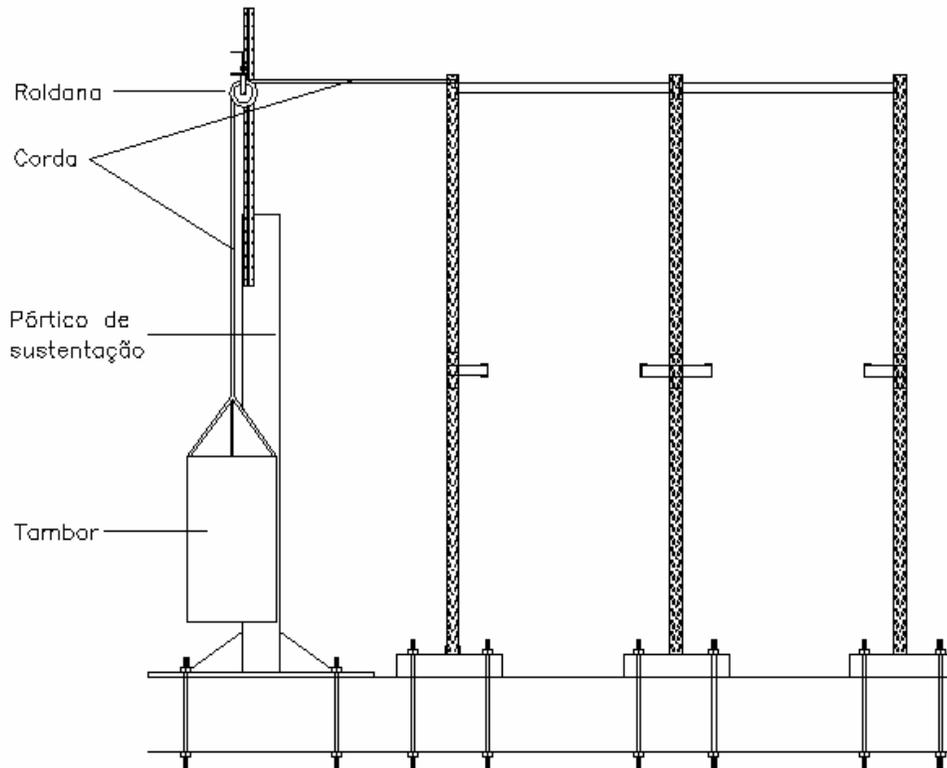


Figura 5.19. Esquema de carregamento horizontal.

Para a fixação das roldanas na altura necessária foi utilizado um pórtico de reação com sua altura prolongada pela utilização de duas colunas do tipo rack presos a ele. Foi utilizado um perfil C de 150 mm de altura como viga. A fixação da roldana à viga se deu através da soldagem da mesma na alma do perfil e no flange inferior do mesmo.

Foram utilizados na aplicação da carga dois tambores metálicos, com capacidade para 200 litros. Estes tambores foram presos à estrutura através de cordas de sisal, que foram amarradas à extremidade superior do rack. Foram colocados nas regiões onde a corda foi presa calços de madeira para evitar que a ação da carga horizontal desencadeasse um efeito localizado na coluna, conforme mostra a figura 5.20.



Figura 5.20. Fixação da corda à estrutura.

A forma de controle da massa de água a ser adicionada nos tambores a cada passo de carga foi a adição controlada de volumes conhecidos a cada etapa. Porém, por motivos de segurança, procurou-se uma forma de que esta adição de água fosse feita à distância, apesar de todo o sistema de aplicação de cargas horizontais (corda, roldana e tambores) terem sido testados anteriormente ao ensaio. Assim, a adição da água se deu através do sistema de tubos apresentado na figura 5.21.



Figura 5.21. Sistema de tubos para adição de água.

5.4. Instrumentação e aquisição de dados

Para a instrumentação deste ensaio, foram utilizados transdutores de deslocamentos (LVDT), células de carga, defletômetros mecânicos e digitais e também extensômetros elétricos de resistência. Para a aquisição de dados foi montado um sistema envolvendo três aparelhos Spider8, sendo dois de 4,8 kHz, nos quais foram ligados os LVDT e um de 600 Hz, na qual foram ligados os extensômetros e células de carga.

5.4.1 – Transdutores de deslocamentos (LVDT)

De acordo com as análises numéricas realizadas, uma importante grandeza na determinação do comportamento da estrutura é o deslocamento das extremidades superiores das colunas. Foram utilizados quatro LVDT fabricados pela SENSOTEC, com precisão de 0,001 mm e com curso de 25 mm para medir este deslocamento.

Desta maneira, foram posicionados quatro LVDT no topo das quatro colunas do rack, conforme apresentado nas figuras 5.22 e 5.23.

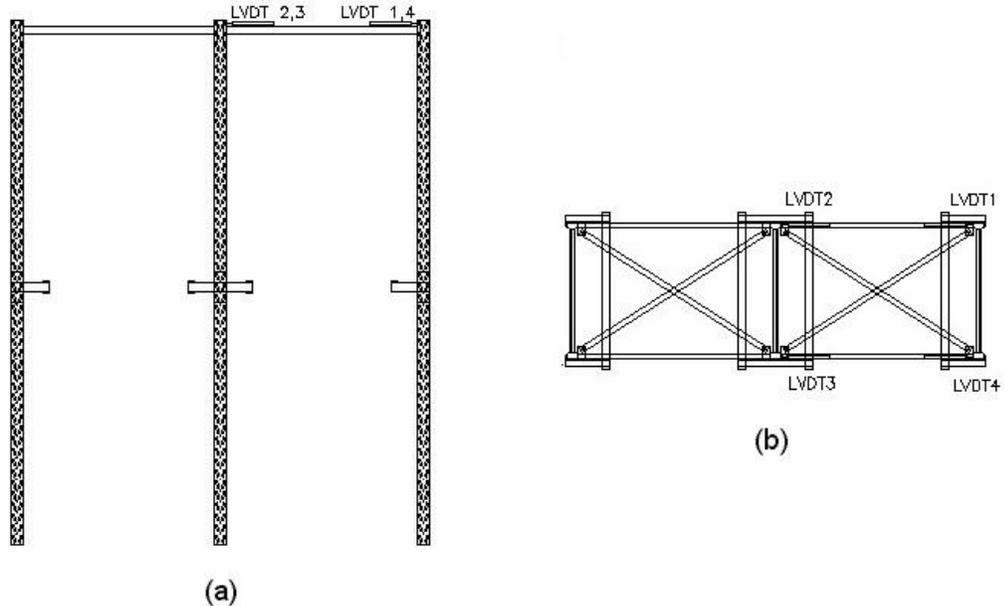


Figura 5.22. Posicionamento dos LVDT:

(a) Vista Frontal; (b) Vista Superior.

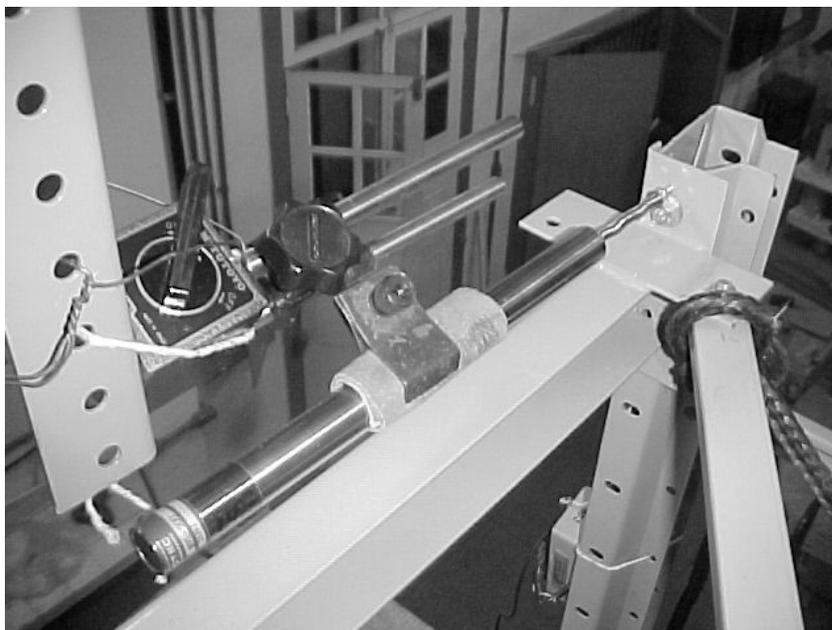


Figura 5.23. Posicionamento dos LVDT no topo da coluna.

Para fixação dos LVDT, foi construída uma estrutura auxiliar, utilizando como suporte as terças do telhado do laboratório.

5.4.2. Defletômetros

Foram posicionados defletômetros mecânicos e digitais para a verificação dos deslocamentos na estrutura. Foram realizados dois arranjos diferentes.

No primeiro ensaio (RACK01) foram posicionados seis defletômetros, segundo mostrado na figura 5.24. Os defletômetros D1 a D3 posicionados na coluna externa e os defletômetros D4 a D6 localizados na coluna central.

Os defletômetros D3 e D6 foram posicionados próximos à base das colunas, com o objetivo de monitorar os deslocamentos da coluna em sua região próxima à base. Já os pares de defletômetros D1-D2 e D4-D5 têm a finalidade de monitorar efeitos localizados na coluna, uma vez que estão posicionados nos flanges de ligação em uma altura em que eles não são contidos pelos contraventamentos.

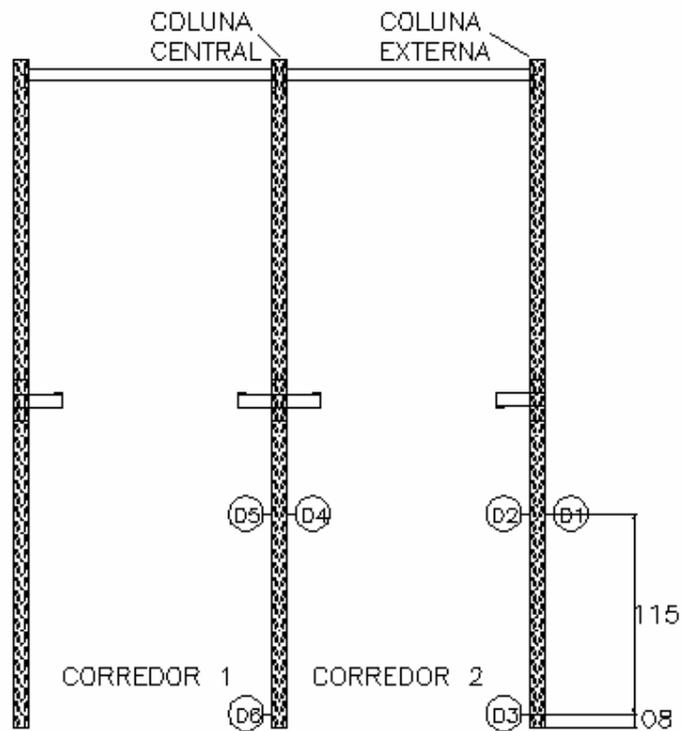


Figura 5.24. Defletômetros no ensaio RACK01

A partir de observações no ensaio RACK01, foram posicionados no ensaio RACK02 dois defletômetros adicionais, D7 e D8 nos braços das colunas externa e central, respectivamente. Estes defletômetros têm o objetivo de monitorar a deflexão dos braços, conforme mostra a figura 5.25.

Para a instalação dos defletômetros foram usadas colunas, conforme mostrado na figura 5.26.

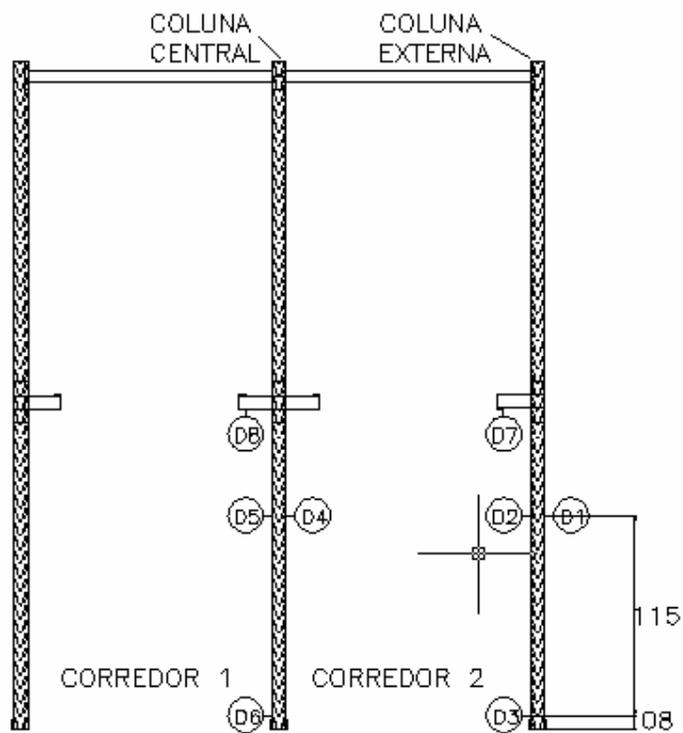


Figura 5.25. Defletômetros no ensaio RACK02

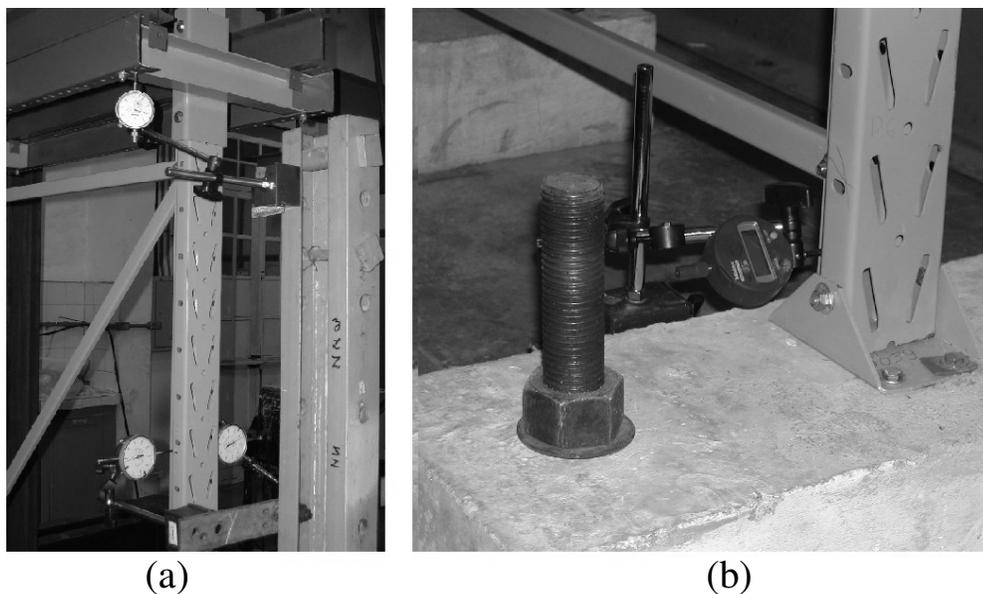


Figura 5.26. Posicionamento dos defletômetros do ensaio RACK02
 (a) Defletômetros analógicos na coluna externa (b) Defletômetro digital próximo à base da coluna externa.

5.4.3. Extensômetros

A partir da simulação numérica do sistema com a utilização de elementos de casca, observou-se que a maior concentração de tensões acontece nos braços. Além disto, conforme mostrado nos itens anteriores, a aplicação das cargas verticais se deu de maneira independente, ou seja, cada Atuador Hidráulico é acionado a partir de uma bomba.

Decidiu-se portanto que deveriam ser instalados quatro extensômetros elétricos de resistência nos braços. Os objetivos destes extensômetros são a validação do sistema de aplicação de cargas, demonstrando que apesar do acionamento independente existe uma simetria no carregamento vertical e verificar o comportamento do aço dos braços durante a aplicação das cargas.

Foram utilizados extensômetros para aço da marca KYOWA, com resistência elétrica de $122 \pm 0,2 \Omega$, comprimento do gage de 5mm e sensibilidade de 0,4%. O posicionamento destes extensômetros é apresentado na figura 5.27.

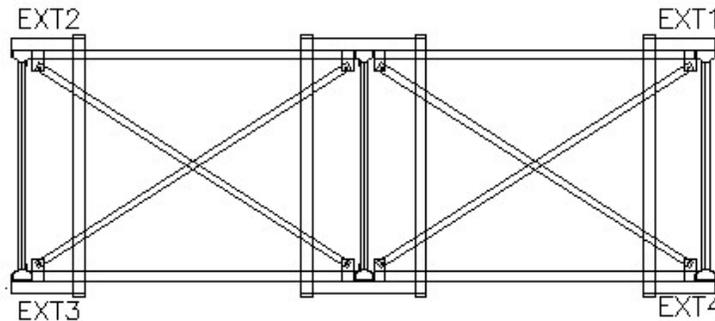


Figura 5.27 –Posicionamento dos extensômetros.

Os extensômetros foram instalados na face superior do braço, próxima à ligação entre o braço e o suporte. Nesta região, a análise numérica indicou uma grande concentração de tensões. A figura 5.28 apresenta o extensômetro instalado.



Figura 5.28. Extensômetro instalado no braço.

5.4.4. Células de carga

Foram utilizadas duas células de carga para medição dos carregamentos, ambas com capacidade nominal de 0-100 kN. As montagens das células de carga 1 (posicionada no corredor 1) e 2 (posicionada no corredor 2) são apresentadas nas figuras 5.14 e 5.16. A célula 1 é da marca TRANSTEC, com sensibilidade de 1,9 mV/V. Já a célula 2, é da marca SODMEX, com sensibilidade de 1,963 mV/V.

5.4.5. Sistemas de aquisição de dados

Para a aquisição de cargas, foi utilizado um microcomputador Pentium III e três módulos Spider8 (Hottinger Baldwin Messtechnik (2003a)).

O Spider8 é um sistema eletrônico de medição para PCs e se destina à medição elétrica de variáveis mecânicas tais como tensão, força, pressão, percurso, aceleração e temperaturas. Todo o condicionamento de sinais – excitação para transdutores passivos e amplificação, digitalização, interface com computador e tecnologia de conexão para um máximo de 8 canais – está combinado em uma caixa.

Todos os ajustes necessários são feitos através de computador por meio de comandos. A figura 5.29 apresenta as vistas da Spider8. Na vista posterior, pode-se observar os canais do aparelho.

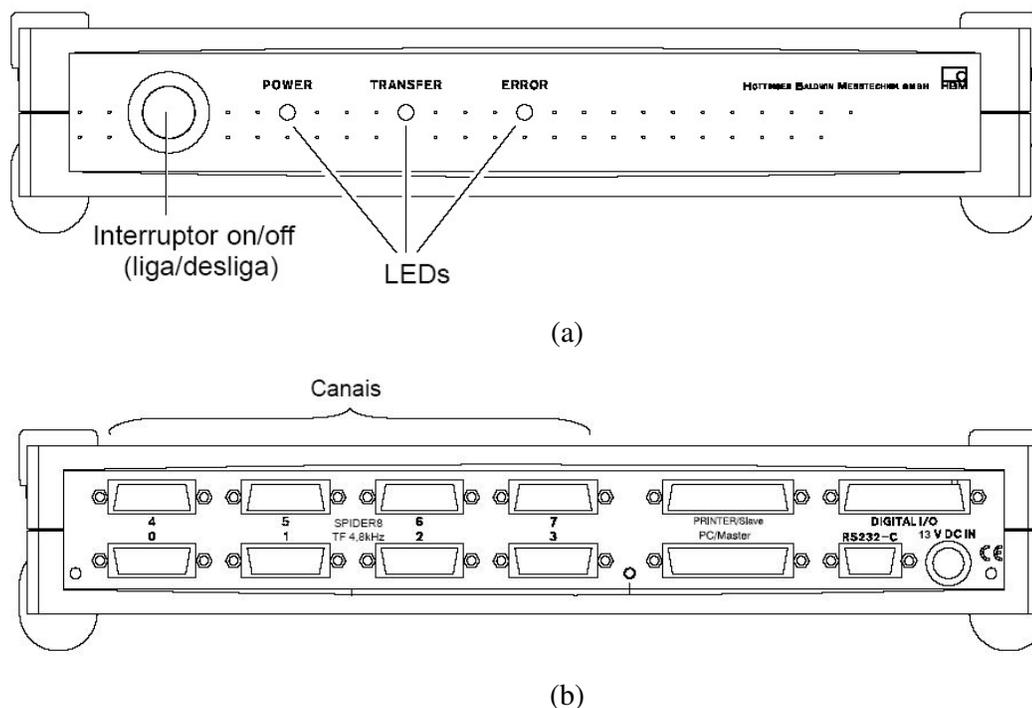


Figura 5.29. Vistas da Spider8. (a) Vista frontal (b) Vista posterior.

Foram utilizados no ensaio dois tipos de Spider8. Dois deles são módulos de frequência portadora de 4,8 kHz, onde os canais de 4 a 6 possuem a entrada necessária para a conexão dos transdutores indutivos, sendo portanto estes módulos utilizados para a conexão dos LVDT. O outro módulo utilizado possui frequência portadora de 600 Hz, e nele foram conectados os extensômetros e células de carga.

Para a conexão dos LVDT ao Spider8, foi feita a ligação de adaptadores e de um amplificador de sinal, da marca Measurements Group. As funções destes equipamentos são a conversão e a amplificação do sinal, de modo que o Spider8 consiga captá-lo de forma adequada. A figura 5.30 apresenta a montagem do sistema de aquisição de dados.



Figura 5.30. Montagem do sistema de aquisição de dados.

O software utilizado na aquisição foi o Catman 4.5 (Hottinger Baldwin Messtechnik (2003b)). Neste software foram criadas as saídas numéricas e gráficas necessárias para o acompanhamento dos ensaios e posterior análise dos resultados.

5.5. Metodologia de ensaio

Na realização do ensaio, foram aplicados incrementalmente as cargas verticais e horizontais, sendo estas 1,5% daquelas.

Para a aplicação das cargas horizontais, foram utilizados dois tambores, conforme apresentado no item 3.2. Estes tambores tiveram o seu peso determinado, e foi observada uma diferença entre eles. Assim, antes do início do ensaio foi adicionada água no tambor mais leve a fim de equilibrar o peso.

Observou-se também que a soma do peso dos dois tambores vazios é de 274 N. Assim, esta carga deve começar a atuar quando a carga total no sistema for de 18,26 kN, ou seja, 9,13 kN por Atuador Hidráulico.

Foi realizado então um pré-ensaio para tirar as folgas de montagem e testar os equipamentos. Nesta etapa, foram aplicados apenas três passos de carga vertical, ou seja, não houve a aplicação das cargas horizontais.

Após o pré-ensaio foi feita a aplicação de cargas, sendo dado em cada atuador, através de acionamento independente, passos de carga até atingir 9,13 kN. Neste nível

de carregamento, foram soltos os tambores, sem impacto, e a carga horizontal começou a atuar. A aplicação das cargas verticais foi feita de modo a garantir a simetria do carregamento, ou seja, a aplicação de cargas iguais pelos atuadores.

A partir deste momento, foram dados passos de carga vertical de 1 kN em cada Atuador. Simultaneamente, eram adicionados 1,5 litros de água a cada tambor, resultando no acréscimo de carga horizontal de 30 N a cada incremento de carga.

Ao final de cada passo, eram lidos os defletômetros e aquisitados os dados por meio do sistema automático de aquisição de dados.

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram realizados dois ensaios de protótipos idênticos, conforme apresentado no item anterior. Estes ensaios foram denominados RACK01 e RACK02. Durante a realização do ensaio, foram coletados os deslocamentos no topo das colunas e as deformações nos braços. Além disto, através dos defletômetros, foi observado o comportamento da coluna à meia altura e próximo à base da mesma.

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios, e eles serão comparados com resultados numéricos obtidos conforme apresentado no capítulo 4.

6.1 Protótipo RACK01

As cargas aplicadas pelos Cilindros Hidráulicos 1 e 2 foram simétricas, conforme mostra a figura 6.1 onde se tem uma reta inclinada a 45° , na qual se tem os valores medidos pelas células. Isto comprova que, apesar do acionamento independente, houve sincronia na aplicação de cargas.

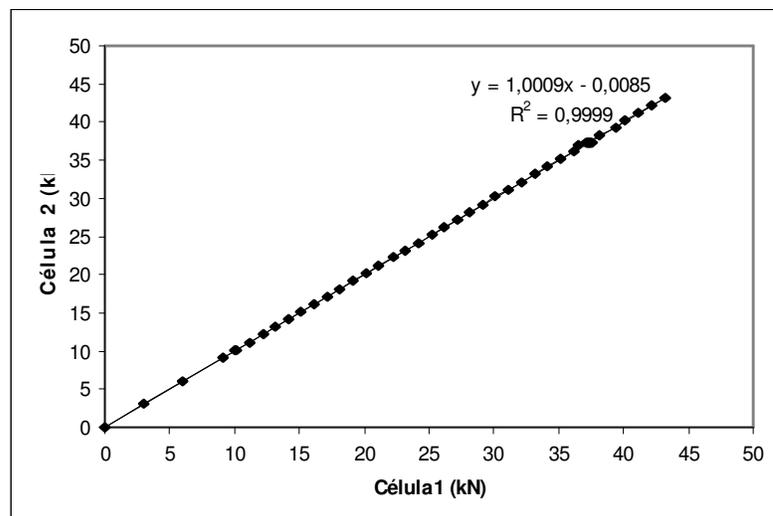


Figura 6.1. Leituras das células de carga durante a realização do ensaio RACK01.

Foram observadas, no protótipo RACK01, as deformações específicas nos braços, conforme apresentado na figura 6.2.

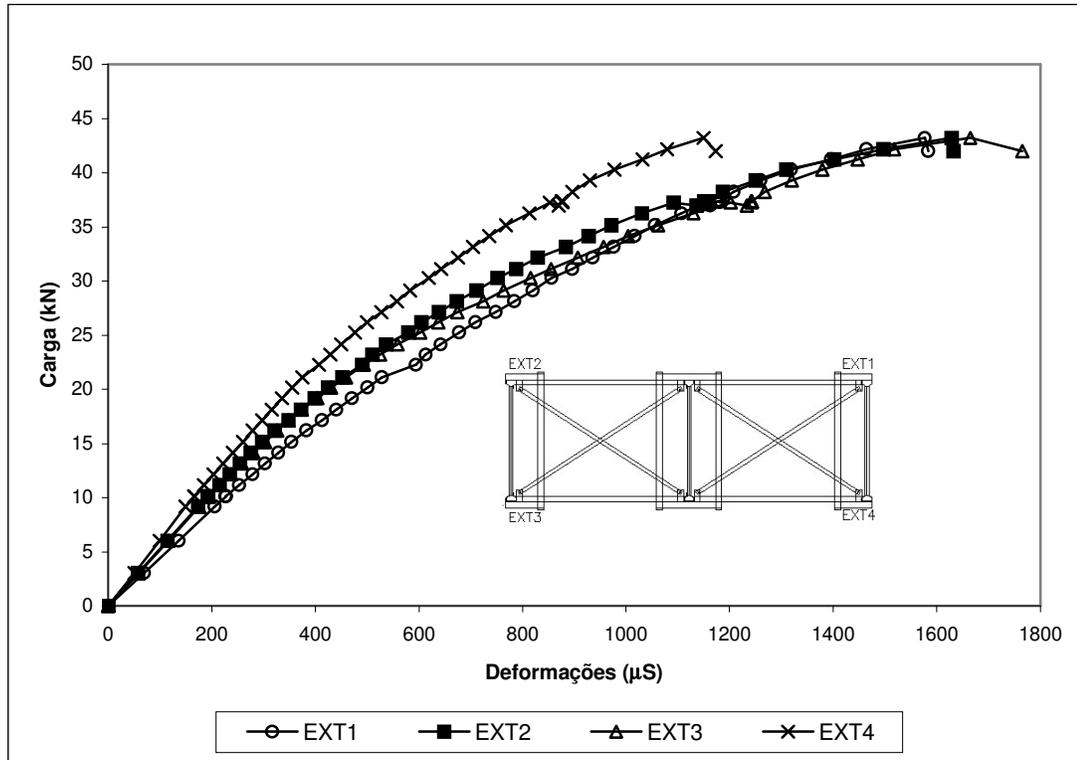


Figura 6.2. Deformações específicas nos braços

A partir do gráfico, pôde-se observar uma boa correlação entre os resultados apontados pelos extensômetros. Este fato evidencia que, a despeito da aplicação de cargas ser feito de maneira independente, existe um bom funcionamento do mesmo, sendo válido o procedimento adotado.

Observa-se ainda que para o nível de carga de 45 kN os extensômetros saem de serviço simultaneamente. Durante o ensaio foi observada uma grande deflexão dos braços, e, a partir da carga de 40 kN, verificou-se a deformação da alma dos mesmos, conforme mostra a figura 6.3.

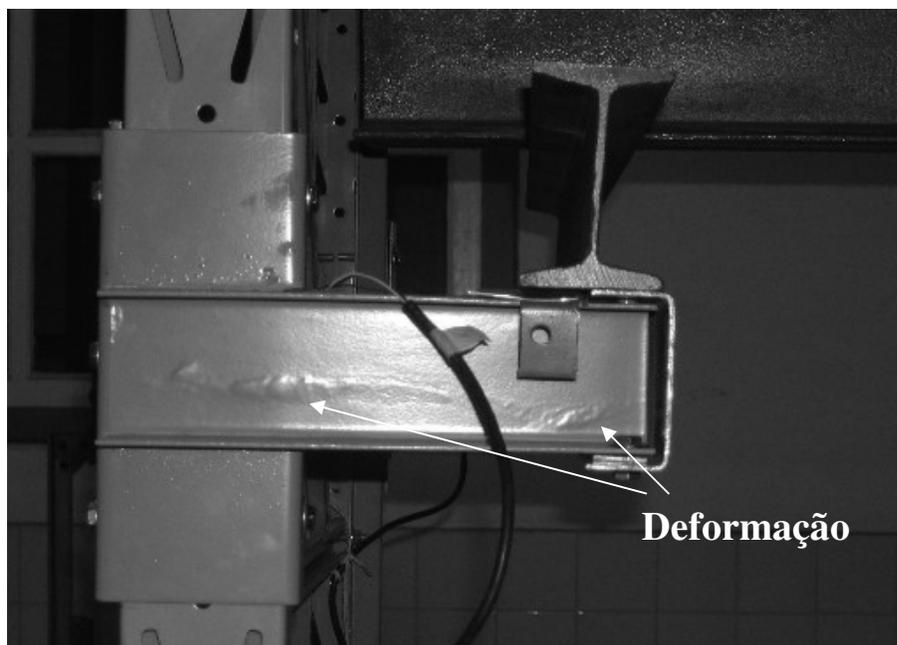


Figura 6.3. Flambagem da alma dos braços.

Este comportamento se explica devido à concentração das tensões de cisalhamento existentes nesta região, o que provoca o enrugamento da alma. Observa-se ainda a rotação entre o braço e a coluna, o que indicou a necessidade do posicionamento de defletômetros para medir este deslocamento no ensaio RACK02.

Os defletômetros posicionados conforme apresentado na figura 5.21 monitoram a movimentação da coluna. Seus resultados são apresentado nas figura 6.4 e 6.5.

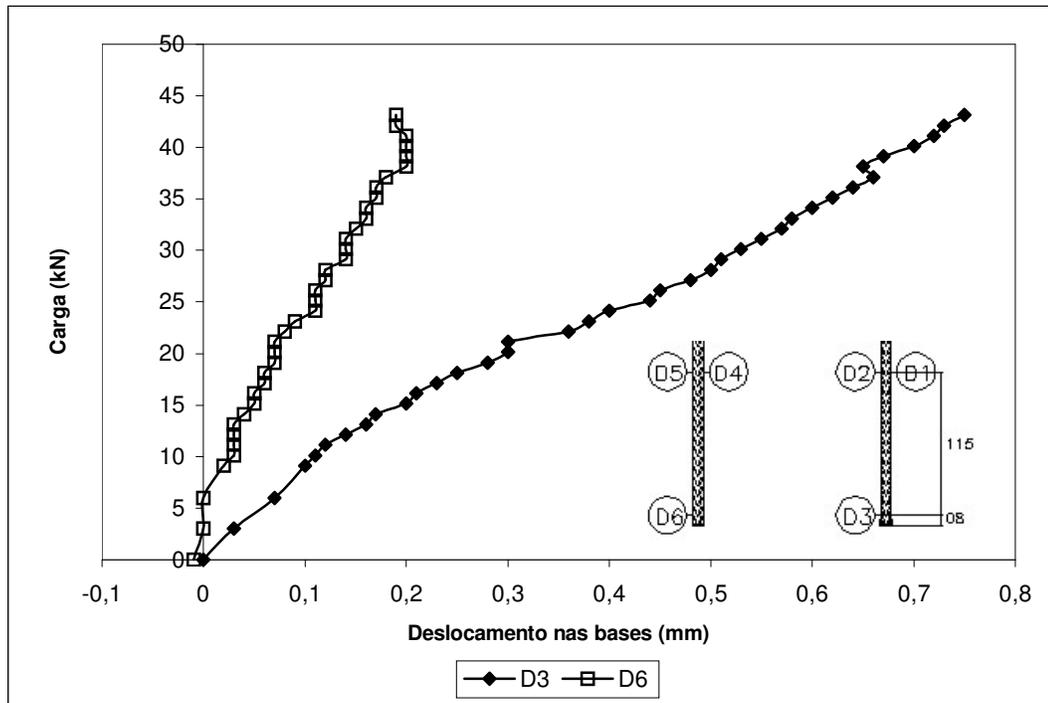


Figura 6.4. Deslocamentos observados nos defletômetros posicionados próximos às bases das colunas.

A partir dos resultados dos defletômetros D3 e D6 (figura 6.4), pôde-se comprovar que as bases das colunas se encontram bem fixadas, devido à pequena magnitude dos deslocamentos observados. Observam-se maiores deslocamentos para a base da coluna externa, o que se justifica pela magnitude do momento atuante nesta coluna ser superior à do momento na coluna central, onde as cargas se auto-equilibram.

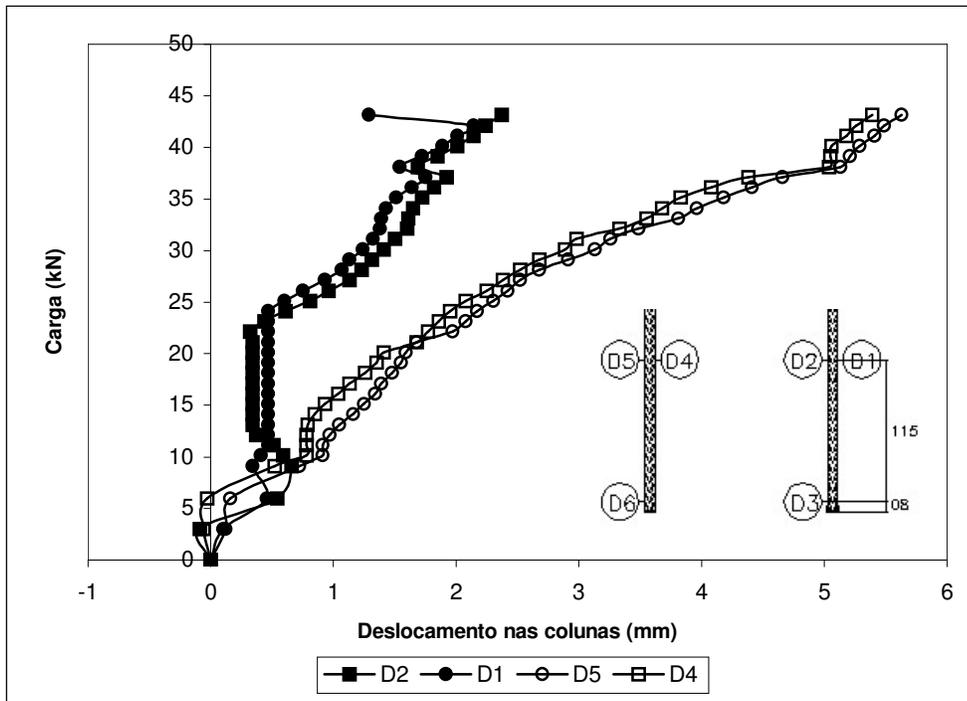


Figura 6.5. Deslocamentos observados nos defletômetros posicionados nas colunas.

Os pares de defletômetros D1-D2 e D4-D5 foram posicionados com a finalidade de observar o comportamento da coluna na primeira metade de sua altura. Para o par de defletômetros D1-D2 houve a perda do curso no intervalo de carga compreendido entre 13 e 23 kN.

A figura 6.6 apresenta a comparação dos resultados numéricos e experimentais para os defletômetros posicionados na coluna externa. Nesta figura pode-se observar que, de forma geral, existe uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais.

Ressalta-se que nos modelos numéricos foram tomados os deslocamentos horizontais observados em nós existentes à mesma altura em que foram posicionados os defletômetros no ensaio. Foram tomados os deslocamentos nas duas colunas, e os resultados foram assim denominados:

- ANSYS1 – Coluna central
- ANSYS2 – Coluna externa sem carga horizontal.

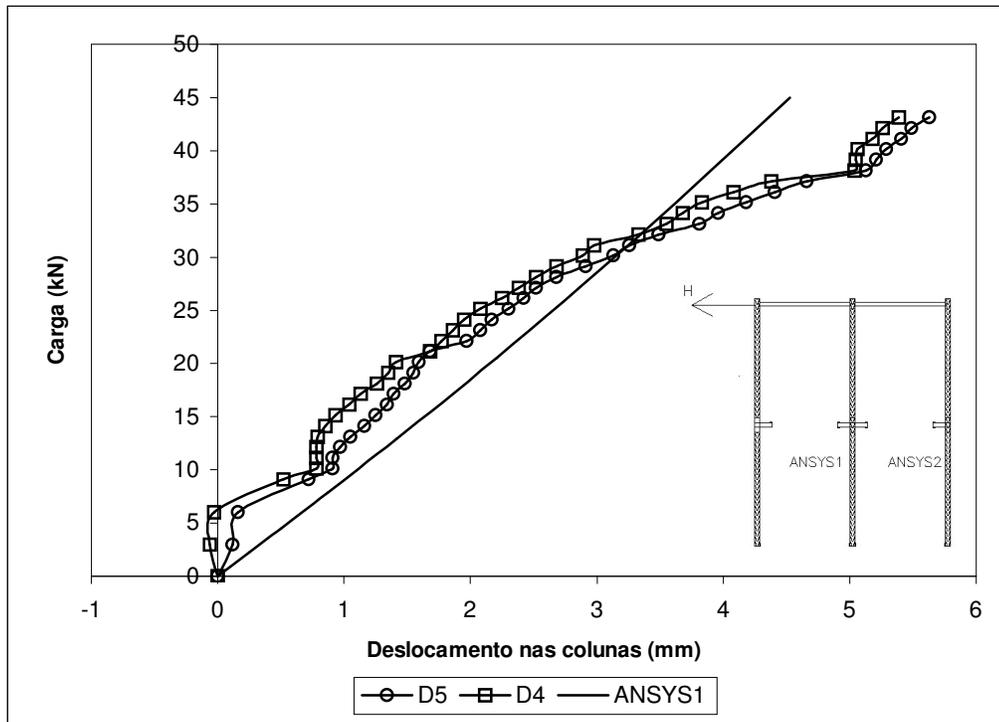


Figura 6.6. Deslocamentos observados nos defletômetros e resultados das análises numéricas.

Os deslocamentos no topo das colunas foi medido com a utilização dos LVDT, conforme mostrado na figura 5.22. Os resultados dos transdutores de deslocamentos são apresentados na figura 6.7. Observa-se neste gráfico que apenas o LVDT 1 apresenta valores divergentes dos demais.

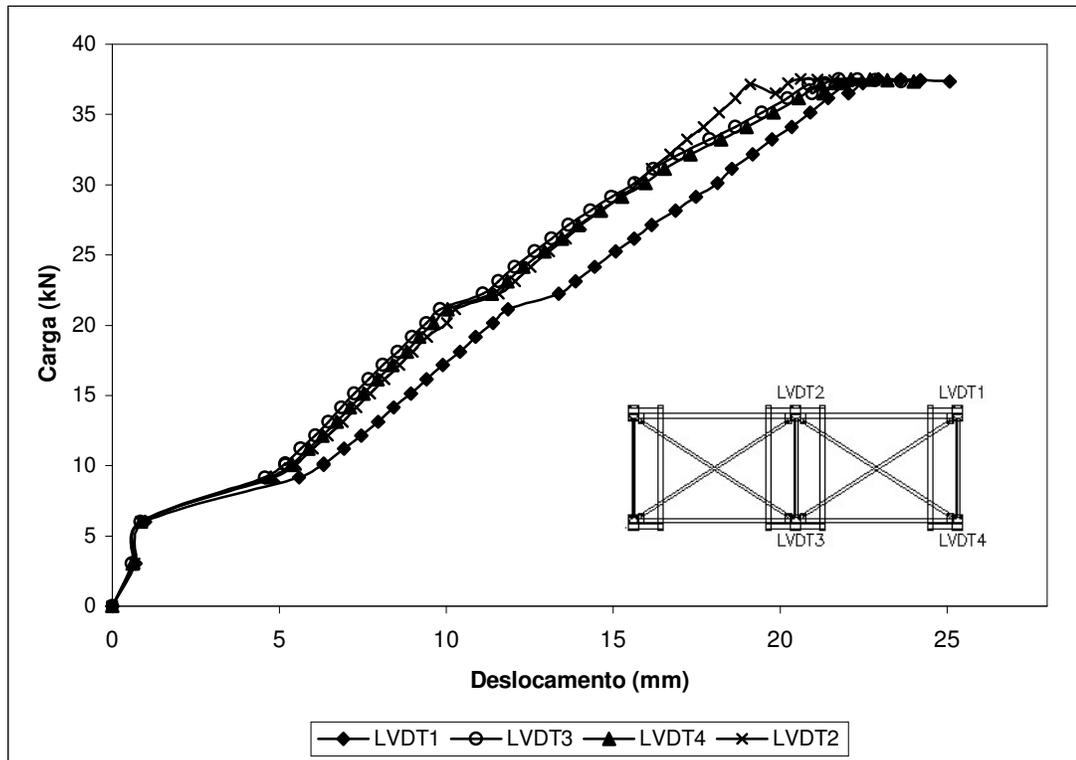


Figura 6.7. Deslocamento no topo das colunas medidos pelos LVDT.

Observa-se na figura que, antes da introdução do carregamento vertical, o que acontece quando a carga por palete é de 9,13 kN, o comportamento da estrutura tende a ser linear, porém é bastante rígido. A partir da introdução da carga horizontal, a rigidez cai, mas o comportamento da estrutura para o carregamento aplicado é linear.

Na carga de 21 kN, acontece um deslocamento brusco da estrutura. Este deslocamento, provavelmente, se deu devido a alguma folga na montagem. Durante a realização do ensaio, percebeu-se nesse momento um ruído.

Os resultados experimentais foram então comparados com os resultados dos estudos numéricos apresentados no capítulo 4. Nesta análise utilizaram-se os resultados obtidos com a utilização dos elementos de barra. Foram feitas comparações com a hipótese do funcionamento das bases como rótulas (ANSYS ROTULADO), o modelo com a ligação da base semi-rígida (ANSYS SEMI-RÍGIDO) e também como engastes (ANSYS ENGASTADO). A comparação dos resultados numéricos e experimentais é apresentada na figura 6.8.

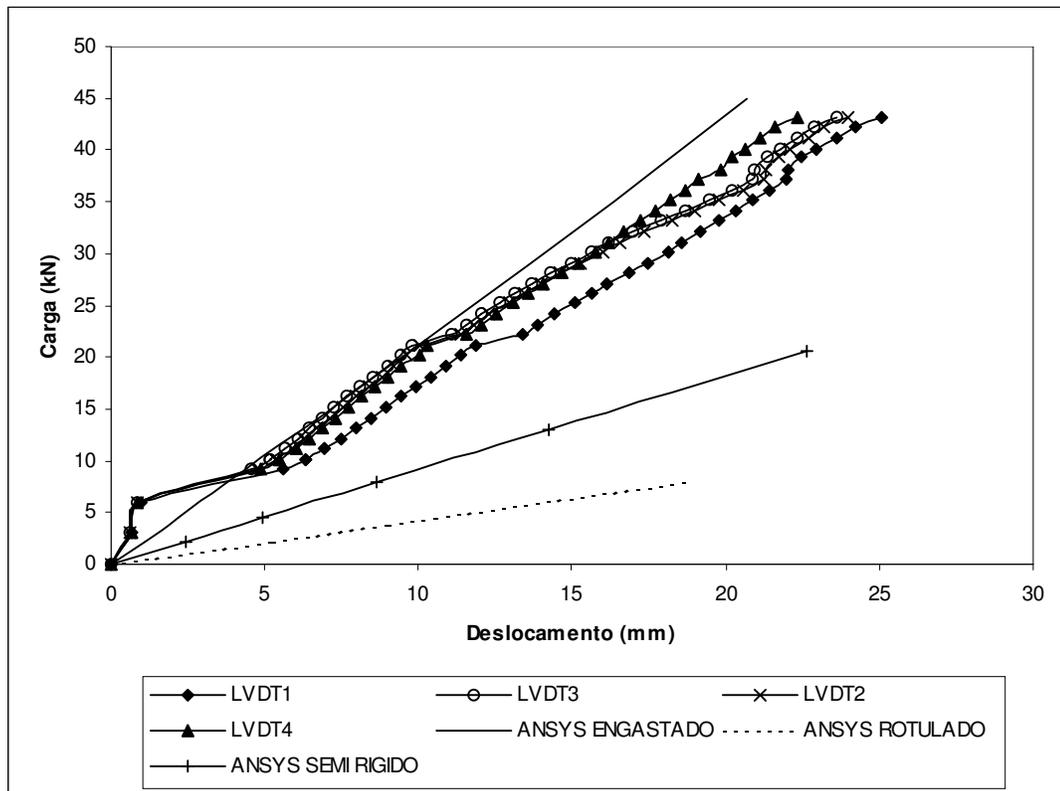


Figura 6.8. Comparação dos resultados teóricos e experimentais.

Observa-se na figura 6.8 que a consideração do modelo com bases rotuladas faz com que a estrutura tenha uma rigidez muito inferior à rigidez observada para o protótipo ensaiado. Quando se considera, porém, as bases funcionando como engaste, o modelo numérico representa bem os resultados experimentais.

6.2 Protótipo RACK02

O protótipo RACK02 possui as mesmas características geométricas e de carregamento que o protótipo RACK01. As cargas foram aplicadas de forma sincronizada, conforme mostra a figura 6.9.

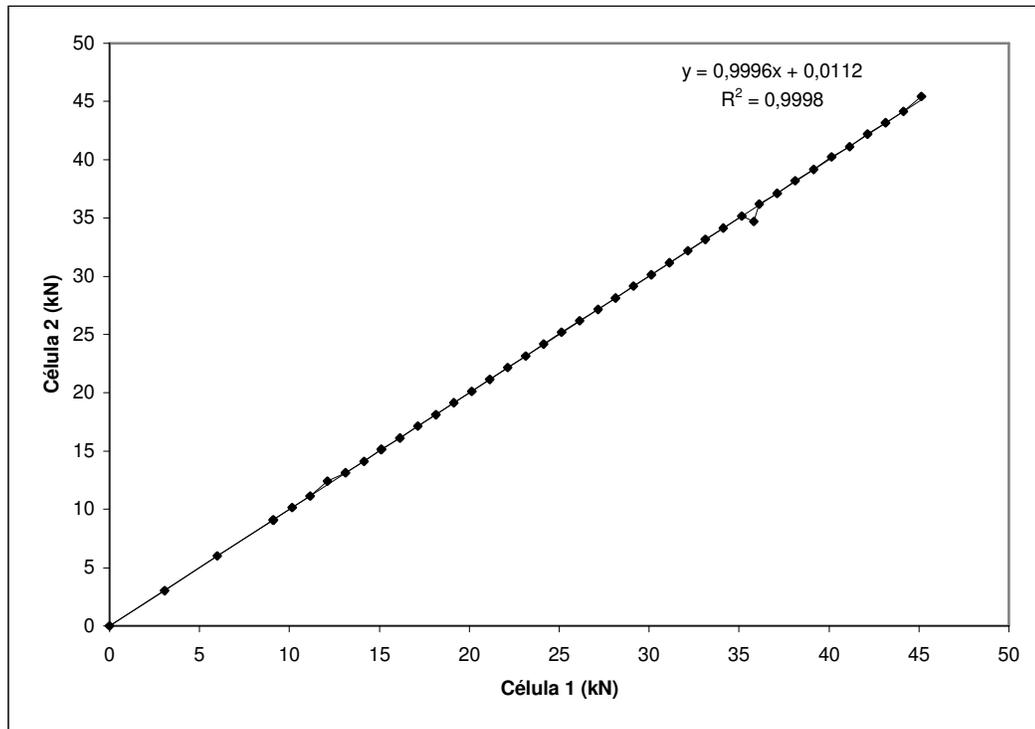


Figura 6.9. Leituras das células de carga durante o ensaio RACK02.

Neste ensaio foram posicionados extensômetros nos braços, da mesma forma do ensaio anterior, com os mesmos objetivos. A figura 6.10 apresenta os resultados observados para os extensômetros.

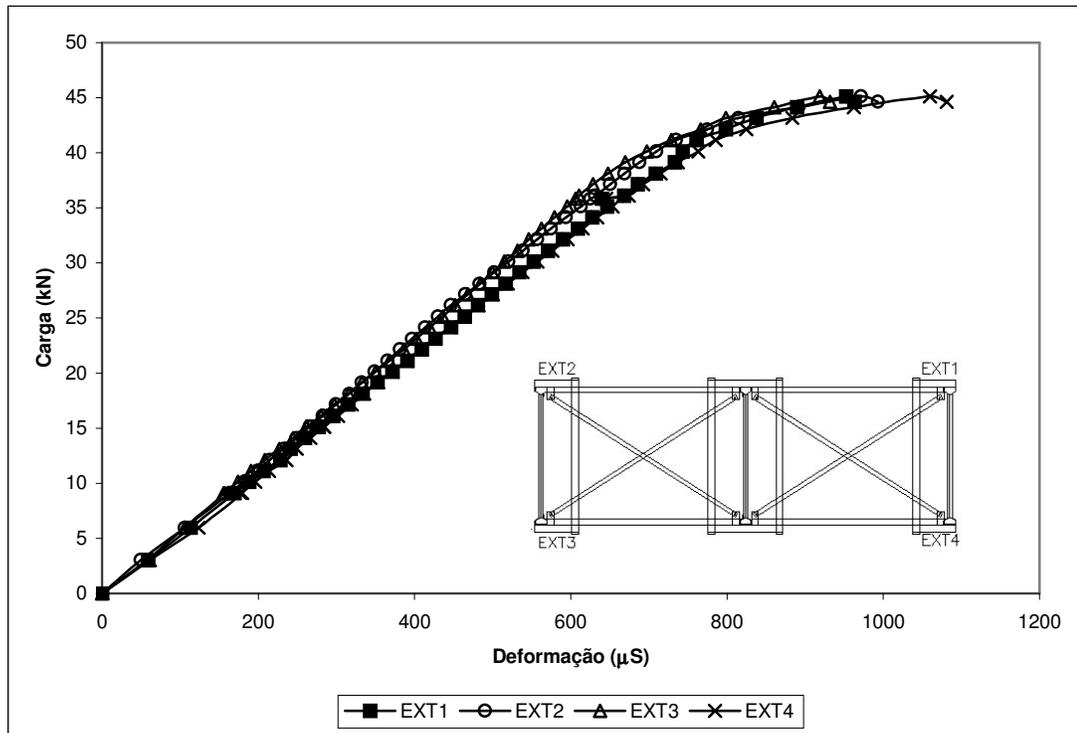


Figura 6.10. Deformações específicas observadas nos extensômetros.

Nesta figura pode-se observar que os extensômetros possuem comportamentos semelhantes. Neste ensaio, assim como no anterior, foram observadas deformações na alma do braço, a partir da carga de 40 kN, conforme mostra a figura 6.11.

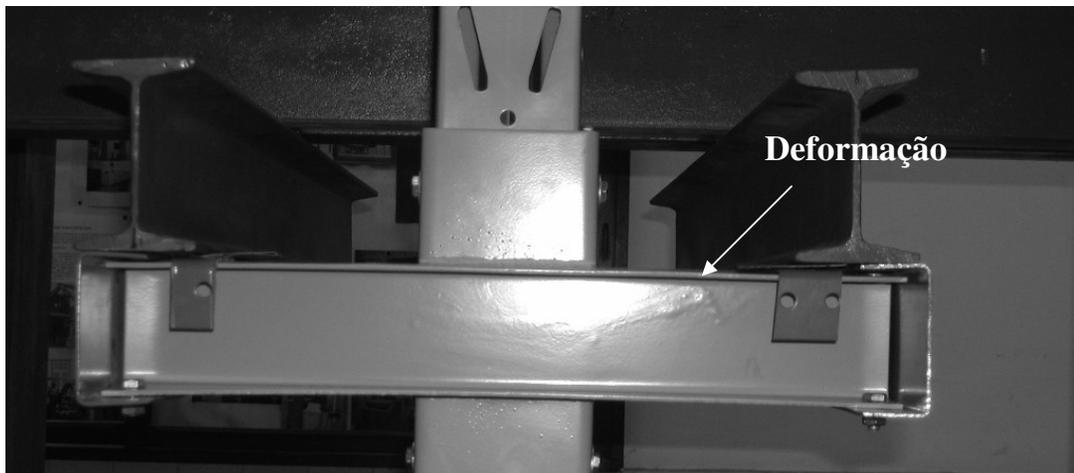


Figura 6.11. Flambagem da alma dos braços.

Mais uma vez, portanto, observa-se o colapso dos braços como fator determinante no comportamento estrutural do rack. Além da flambagem, observam-se ainda grandes deslocamentos neste componente estrutural. Por isto, neste ensaio, foram posicionados defletômetros para a quantificação destas deflexões. A figura 6.12 apresenta a evolução das deflexões dos braços central e externo com o aumento das cargas.

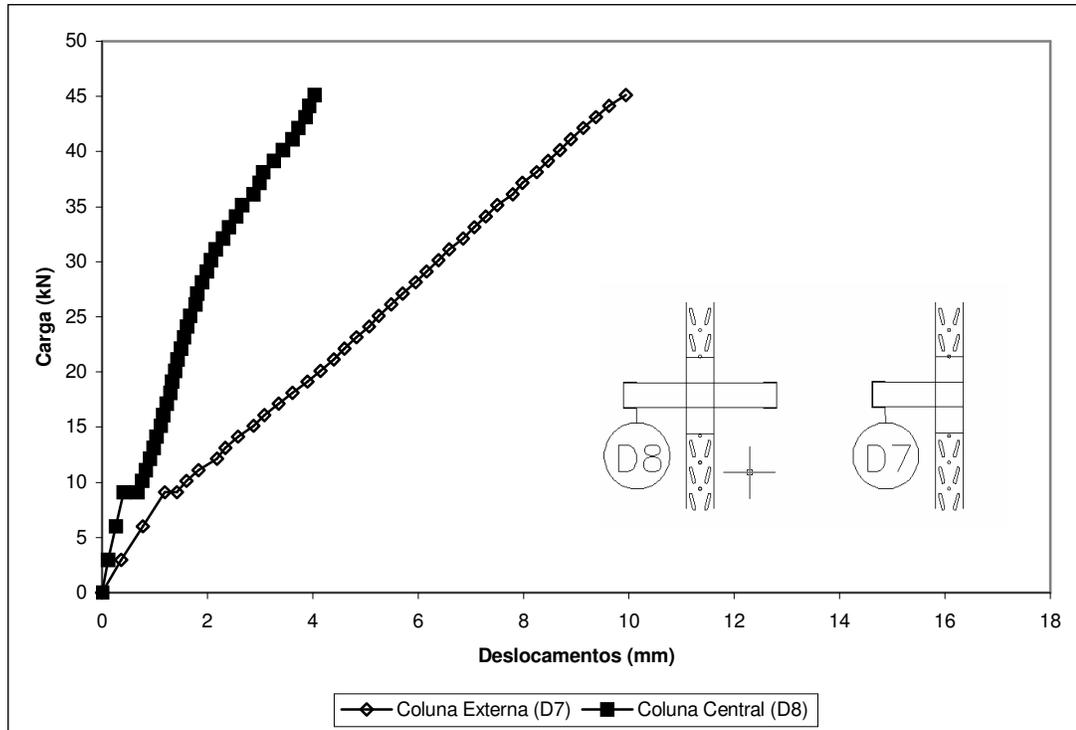


Figura 6.12. Deslocamentos da extremidade do braço.

Observam-se no braço da coluna central, D8, menores deslocamentos do que no braço da coluna externa, D7. Este efeito se dá pela compensação de momentos no braço central.

Os dados experimentais foram comparados a resultados numéricos obtidos pelo modelo de elementos finitos construído com a utilização de elementos de barra. Primeiramente, a rigidez da ligação entre o braço e as colunas foi simulada com o emprego de um elemento de mola, conforme apresentado no capítulo 4. A este elemento foi atribuída a rigidez determinada por Oliveira (2000). Este modelo foi denominado ANSYS MOLA. Foi ainda construído um outro modelo de elementos finitos com a

ligação entre a coluna e o braço considerada como um engaste. Este modelo foi denominado ANSYS ENGASTE.

A comparação entre os resultados das simulações numéricas e os dados experimentais é apresentada na figura 6.13.

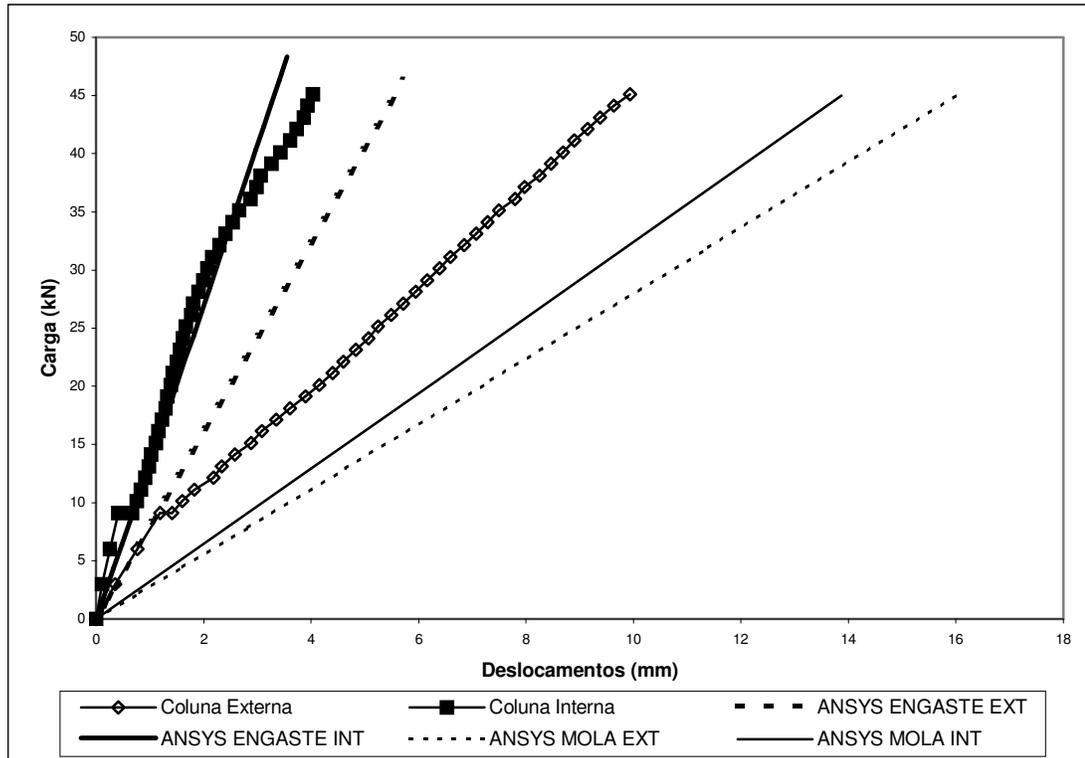


Figura 6.13. Comparação entre os deslocamentos na extremidade dos braços e os resultados numéricos.

Observa-se que os valores obtidos no modelo em que foi utilizada a rigidez experimental dada por Oliveira (2000) (ANSYS MOLA), os deslocamentos obtidos são maiores do que aqueles observados no ensaio.

Já no modelo em que a ligação é simulada como engaste (ANSYS ENGASTE), existe uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais.

No teste realizado por Oliveira (2000) para a determinação da rigidez da ligação, a deflexão medida é unicamente o deslocamento do braço, uma vez que a coluna é fixada de modo a não contribuir no deslocamento. Já os deslocamentos medidos pelos defletômetros no ensaio incluem os deslocamentos da coluna.

Por isto, na situação engastada, principalmente quando se analisa a coluna externa, existe uma divergência entre os valores dos deslocamentos quando se comparam os resultados teóricos e experimentais. No entanto, nos casos em que consideram as ligações entre os braços e as colunas rígidas no modelo numérico, existe uma boa correlação entre os resultados.

Os demais defletômetros, posicionados na coluna conforme mostra a figura 5.22, tiveram os resultados apresentados na figura 6.14 e 6.15

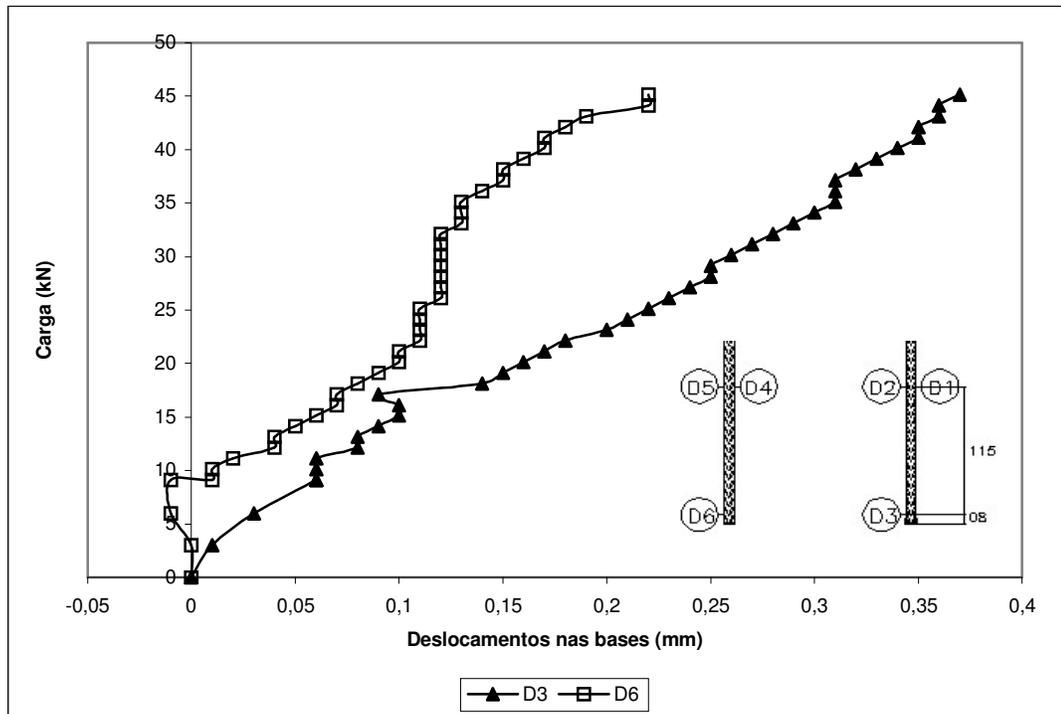


Figura 6.14. Deslocamentos observados nos defletômetros posicionados próximos à base da coluna.

Observa-se que os defletômetros próximos às bases das colunas apresentam deslocamentos muito pequenos, o que mais uma vez mostra o funcionamento da base como fixa. Mais uma vez são observados maiores deslocamentos para a base da coluna externa.

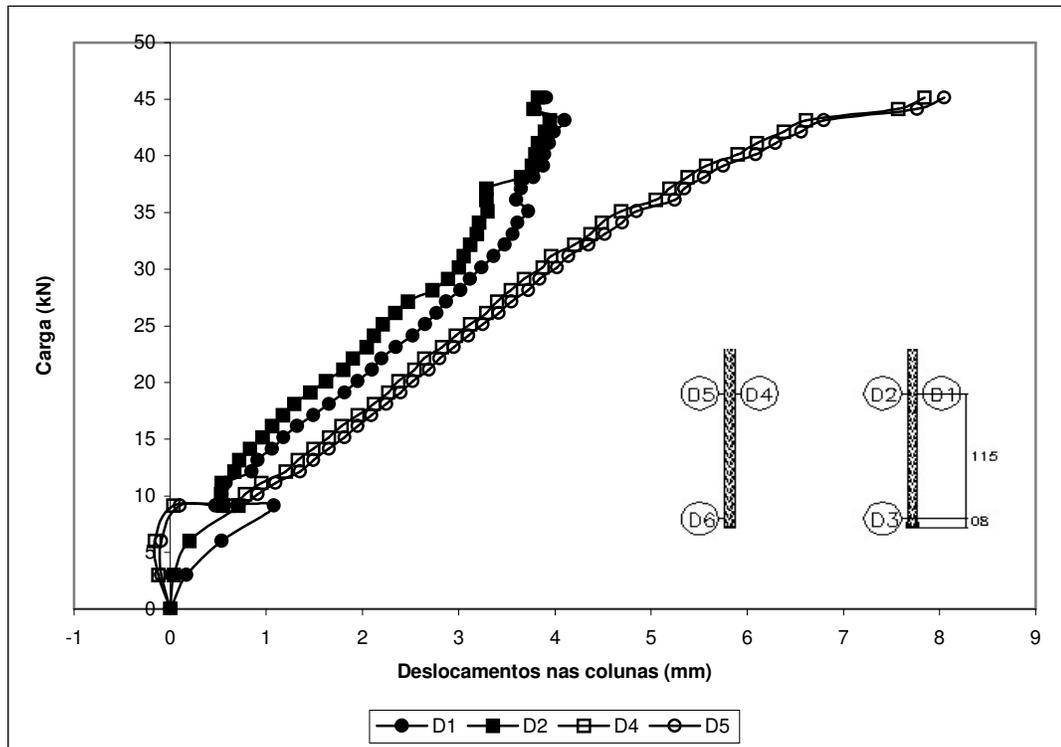


Figura 6.15. Deslocamentos nos defletômetros posicionados à meia altura das colunas.

Assim como no protótipo RACK01, não houve a ocorrência de distorção da seção transversal. Porém, observou-se que a coluna mais afastada do lado em que foram aplicadas as cargas horizontais, onde foi instalado o par de defletômetros D1-D2, apresenta menor deslocamento do que a outra. A comparação das deflexões das colunas com as deflexões observadas no modelo numérico é feita na figura 6.16.

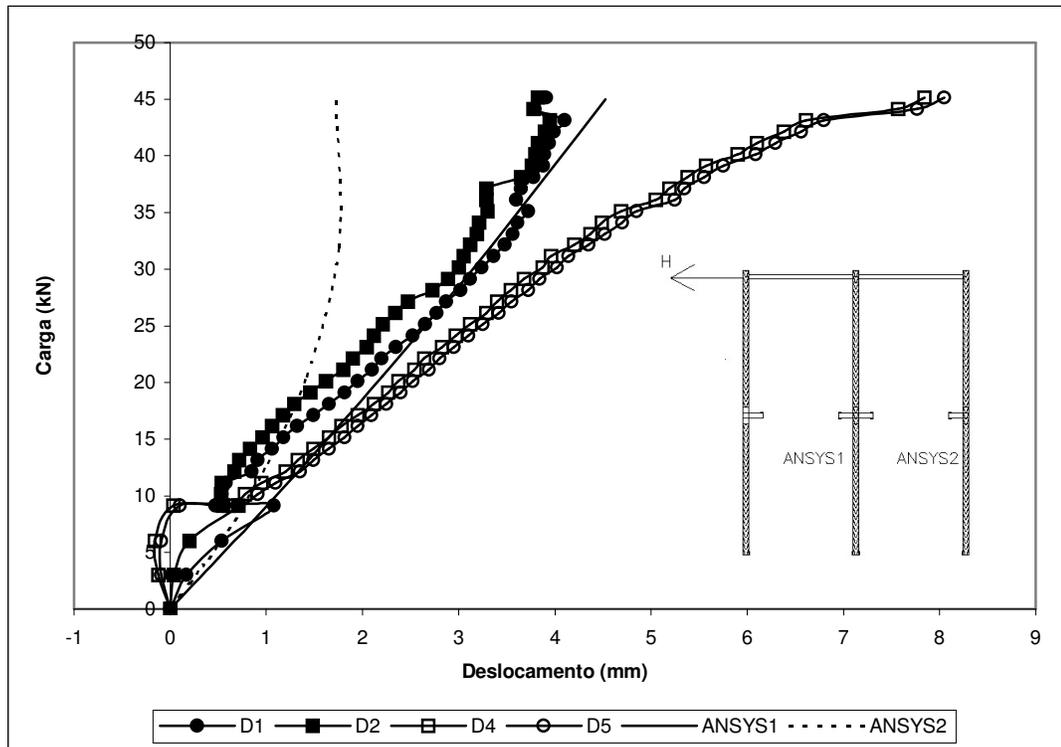


Figura 6.16. Deslocamentos observados nos defletômetros e resultados das análises numéricas.

Observa-se que no ensaio foram medidos deslocamentos maiores do que os deslocamentos obtidos pela análise numérica. Porém, o comportamento da estrutura segue a tendência apontada pela análise via elementos finitos.

De forma similar ao realizado no ensaio RACK01, o deslocamento do topo das colunas foi avaliado com o posicionamento de transdutores de deslocamento. Percebe-se que a partir do instante em que o carregamento horizontal é introduzido (Carga vertical de 9,13 kN), os deslocamentos crescem de forma linear, conforme mostra a figura 6.17.

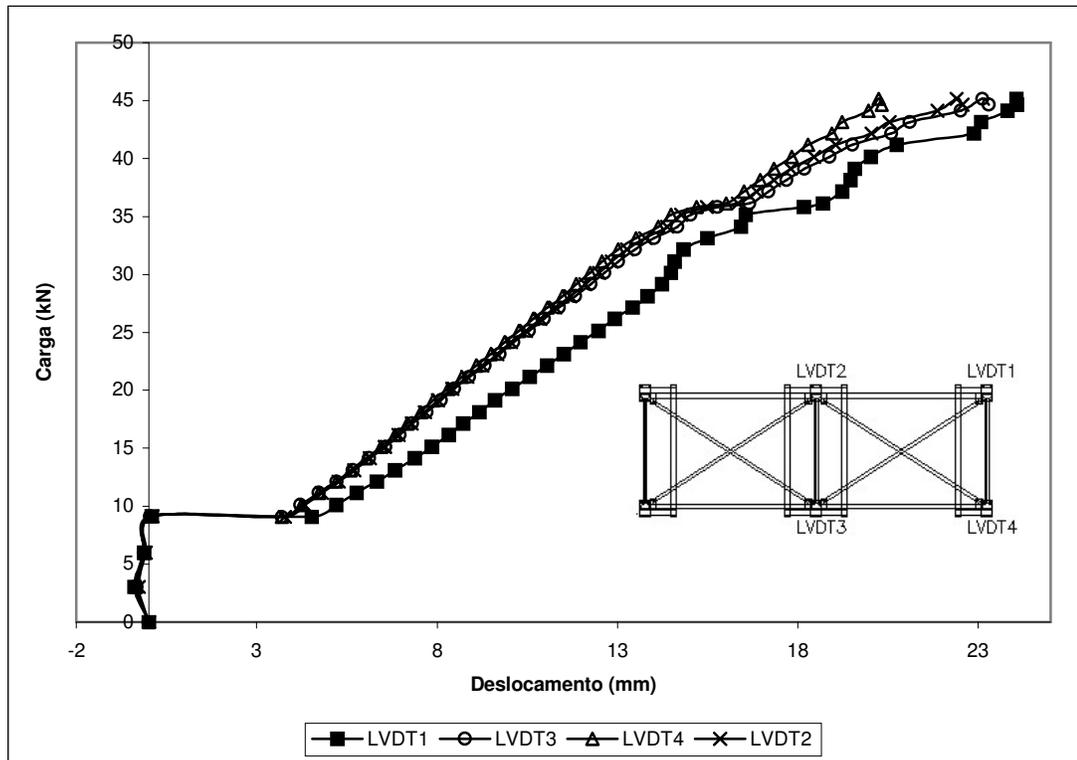


Figura 6.17. Deslocamentos no topo das colunas.

Observa-se mais uma vez que os deslocamentos medidos no LVDT1 são discrepantes dos demais. Este fato se deu devido a falha na calibração do instrumento, uma vez que o deslocamento do conjunto é uniforme, como apontam os outros três transdutores.

Observa-se que a estrutura teve um deslocamento brusco para o nível de carga de 36 kN. No momento da realização do ensaio percebeu-se a ocorrência de um ruído nesta etapa, o que indica que alguma folga existente na montagem ocasionou o deslocamento.

Os resultados experimentais foram também comparados com os resultados numéricos. Mais uma vez foram considerados três modelos: um em que as bases são consideradas rotuladas, um em que as mesmas foram consideradas engastadas, e ainda outro em que as bases são consideradas semi-rígidas. A comparação entre os resultados numéricos e experimentais é apresentada na figura 6.18.

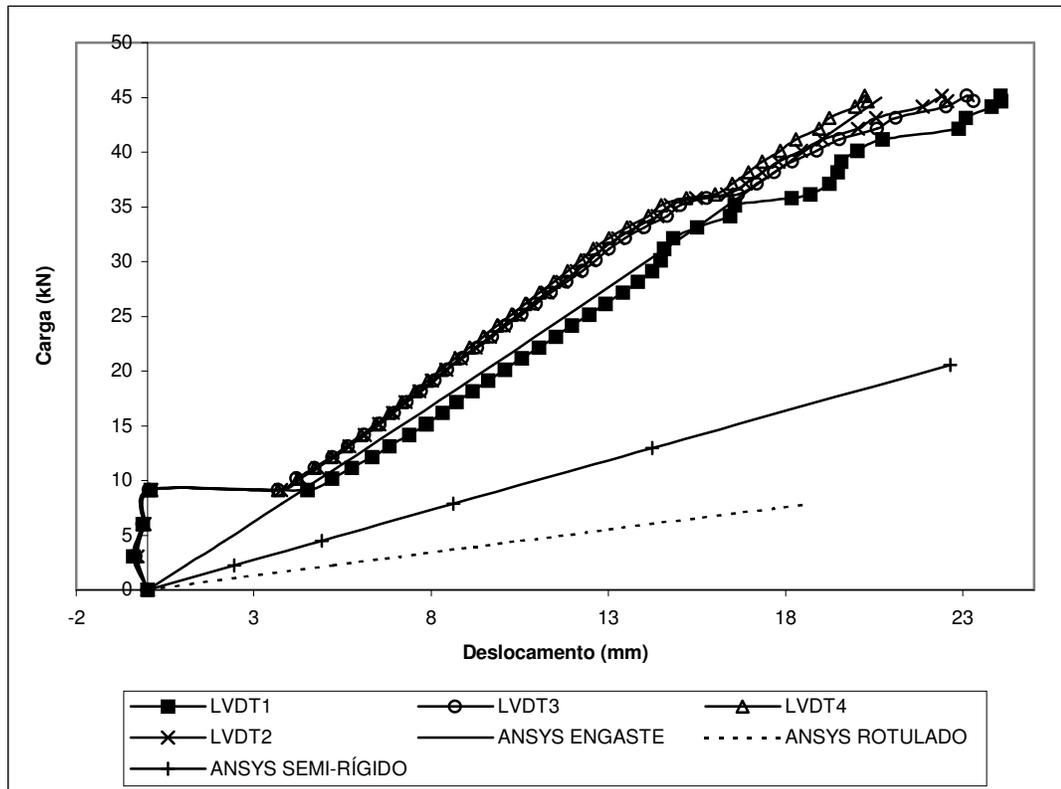


Figura 6.18. Comparação dos resultados teóricos e experimentais.

Assim como os resultados do protótipo RACK01, apresentados na figura 6.8, observa-se que os resultados experimentais apresentam boa correlação com os resultados do modelo em que as bases são consideradas engastadas.

Isto demonstra que a rigidez determinada experimentalmente é inferior ao valor da mesma rigidez quando a estrutura está em serviço. Tal fato demonstra que o ensaio realizado precisa ser modificado aplicando-se a carga axial atuando simultaneamente à aplicação do momento.

Assim, conclui-se que nas condições de serviço as bases do sistema se comportam praticamente como engastes, e possuem fundamental importância para o comportamento da estrutura.

6.3. Avaliação da influência da rigidez das ligações e placas de base no comportamento do sistema

Conforme observado nos itens anteriores, a rigidez da placa de base tem fundamental importância no comportamento da estrutura. Assim, foram feitas simulações numéricas para quantificar a influência da rigidez, não somente da placa de base, mas também da ligação da longarina com a coluna na resistência da estrutura.

Foram simuladas as seguintes situações:

- 01: longarina e base engastadas;
- 02: longarina semi rígida e base engastada;
- 03: longarina semi rígida e base rotulada;
- 04: longarina rotulada e base engastada;

A comparação dos resultados teóricos com os dados experimentais é feita na figura 6.19. Os resultados numéricos se referem ao deslocamento do topo da coluna, na posição correspondente à em que foram posicionados os LVDT.

Observa-se que os resultados experimentais são melhor representados pelos resultados que se obtém no modelo em que a base é engastada e a ligação da longarina com a coluna é semi-rígida.

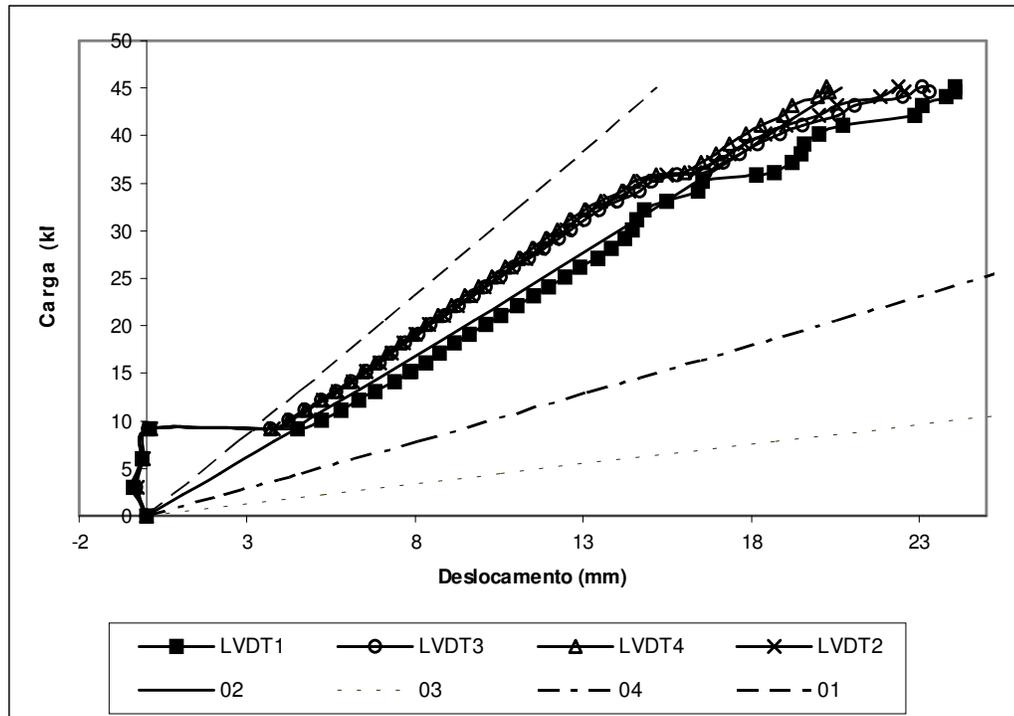


Figura 6.19. Comparação dos resultados teóricos com os dados experimentais.

7 - CONCLUSÕES

O comportamento estrutural dos sistemas de armazenagem industrial tem sido objeto de diversos estudos, devido à complexidade desta estrutura no que se refere à sua geometria estrutural e também pelo comportamento característico de seus componentes. Nestes, destaca-se a influência das perfurações existentes na resistência dos elementos e também a complexidade das ligações, que podem ser parafusadas e/ou encaixadas.

A complexidade do comportamento destes sistemas em alguns casos leva à avaliação experimental de seus componentes, como no caso das colunas, quando se quer avaliar a influência das perfurações nos modos de flambagem. Ressalta-se que não há prescrições nacionais específicas para racks e que as normas internacionais geralmente tratam do dimensionamento de sistemas do tipo porta-pallets.

Neste trabalho, o objetivo principal foi o estudo de sistemas do tipo drive-in, avaliando o comportamento global do sistema e de alguns de seus componentes, visando a validação de ferramentas e procedimentos para a análise destas estruturas.

Inicialmente foi realizado um estudo numérico utilizando o software ANSYS para avaliação dos furos existentes ao longo do comprimento dos elementos comprimidos de seção transversal tipo rack. Os resultados numéricos foram comparados com resultados experimentais obtidos anteriormente que foram baseados nas prescrições do ensaio da coluna curta do RMI (Rack Manufacturers Institute). Este ensaio avalia a influência das perfurações no modo local e conseqüentemente na resistência da coluna.

A comparação dos resultados numéricos com os experimentais em relação à carga última mostrou uma boa concordância, o que indicou ser o procedimento numérico adequado para a avaliação da influência das perfurações. As análises numéricas realizadas consistiram em modelos que considerassem as imperfeições geométricas, o encruamento do aço e as perfurações no comportamento da coluna.

A partir destas análises, pode-se concluir o seguinte:

- as perfurações possuem grande influência na resistência da coluna, bem como nos modos de flambagem, uma vez que a concentração de tensões nas áreas

perfuradas interfere nos modos locais. Isto foi observado a partir da comparação entre o modelo sem furos (Coluna bruta) e a coluna ensaiada;

- as imperfeições iniciais têm grande influência no comportamento da coluna, o que foi constatado através dos resultados da simulação da coluna nominal, ou seja, com as dimensões fornecidas pelo fabricante e a coluna real, ou seja, a que tem as dimensões medidas previamente aos ensaios;
- o encruamento do material também afeta o comportamento da coluna curta, existindo um ganho de resistência devido a este fenômeno. Isto se comprova pela proximidade entre a carga última experimental e as cargas últimas dos modelos simulados com a tensão de escoamento obtida através de ensaios de caracterização do aço;

Para a avaliação dos elementos constituintes de um rack do tipo porta-pallets, e da interação entre eles, o RMI prescreve o ensaio de uma parte do sistema, submetida a condições de carga que representem o sistema em operação. Considerando a inexistência de prescrições semelhantes para o sistema drive-in, a partir destas prescrições para sistemas porta-pallets foi definido o programa teórico-experimental para avaliação do pórtico que foi estudado neste trabalho.

Inicialmente, o sistema a ser ensaiado foi analisado via elementos finitos, com o objetivo de pré-avaliar o protótipo quanto a deslocamentos, distribuição de tensões, níveis de carga e, posteriormente, comparar os resultados numéricos e experimentais. Estes resultados indicaram que os deslocamentos no topo das colunas deveriam ser monitorados, e que os braços possuem concentração de tensões elevadas, o que definiu a instrumentação por extensometria nesta região.

Foram realizados dois ensaios de um rack composto de dois corredores, sem contraventamento de fundo. O carregamento vertical simula a ação imposta pelos pallets, enquanto a carga horizontal induz o efeito da falta de prumo da estrutura.

Os resultados experimentais indicaram um comportamento linear da estrutura, para os níveis de carga atingidos no ensaio, conforme observado pelos resultados dos transdutores de deslocamento posicionados na parte superior do rack. Observou-se ainda:

- o protótipo ensaiado atendeu aos objetivos iniciais do ensaio, que eram a avaliação do comportamento do rack no que se refere à interação entre seus diversos componentes;
- o sistema de aplicação de cargas verticais, com o posicionamento de dois atuadores hidráulicos independentes atendeu à necessidade do ensaio, com a aplicação sincronizada das cargas;
- o sistema de aplicação de cargas horizontais, a partir da adição controlada de água em tambores metálicos, atendeu à necessidade de se ter uma carga horizontal proporcional à vertical;
- o sistema de fixação do sistema adotado, com o emprego de blocos e parabolts, foi eficiente, uma vez que os deslocamentos observados próximo à base foram pequenos, inferiores a 1 mm;
- a carga horizontal apresenta forte influência no comportamento do sistema no que se refere a deslocamentos. Esta observação se faz pela comparação das etapas iniciais de carga, antes da introdução do carregamento horizontal com as demais etapas, quando a carga horizontal está atuando;
- os braços apresentam grandes deslocamentos verticais, na ordem de 10 mm para o braço na coluna externa ($\delta/L = 0,05$) e de 4 mm para o braço na coluna central ($d/L = 0,02$). Os deslocamentos lidos incluem a deflexão do braço e a rotação da coluna, devido à ausência das vigas transversais. Na coluna central, o auto-equilíbrio das cargas faz com que estas deflexões sejam menores;
- os deslocamento máximos observados na parte superior do rack são da ordem de 25 mm (aproximadamente 1/150 da altura do rack), e os valores medidos são próximos. Isto indica a simetria da carga da estrutura, e que acontece a flexão da mesma na direção transversal;
- a carga de projeto fornecida pelo fabricante é bastante conservadora. Para este nível de carga, observam-se deflexões no topo na ordem de 5 mm e deformações específicas no braço na ordem de 200×10^{-6} m/m;
- para os níveis de carga atingidos, não foram observados os modos local e distorcional nas colunas;

- a simulação numérica preliminar indicou o componente que determinaria o colapso da estrutura seria o braço, uma vez que existe uma grande concentração de tensões nesta região.

Os braços, pequenas vigas em balanço submetidas a uma carga concentrada alta em sua extremidade, são vigas do tipo U simples. Assim, os efeitos elevados do cisalhamento e da flexão, além do efeito da carga concentrada, levaram ao enrugamento da alma.

A partir das análises numéricas realizadas no sistema ensaiado, e pela comparação de seus resultados com os dados experimentais, observou-se o seguinte:

- foram simuladas as situações em que ligação da placa de base com o bloco de concreto é considerada como rótula, como engaste e outra em que a mesma é considerada semi-rígida. Para as demais ligações, ou seja, longarinas e braços, foram utilizados os valores obtidos anteriormente. A comparação com os resultados experimentais apontou que o comportamento real da estrutura se aproxima da situação em que a ligação da base é engastada;
- foram ainda simuladas as ligações das longarinas com as colunas considerando três situações. Na primeira delas, considerou-se a rigidez experimental (semi-rígida) anteriormente obtida. Nas outras, esta ligação foi considerada como rótula e como engaste. Estas três situações foram analisadas com a ligação da placa de base com o apoio de concreto como engaste. Foi observada uma grande proximidade entre os resultados experimentais e os resultados numéricos da situação em que são consideradas a longarina semi-rígida e a base engastada. Isto mostra que a semi-rigidez da ligação das longarinas com as colunas deve ser considerada na avaliação estrutural, uma vez que a consideração desta ligação como engastada conduz a valores não conservadores;
- a ligação dos braços com as colunas foi simulada com duas situações: considerando a rigidez experimental e também a situação engastada. A comparação das deflexões do braço mostrou que existe uma aproximação entre a simulação como engaste e os dados experimentais. No entanto, estes resultados experimentais estão influenciados pela rotação da coluna;

- ressalta-se que o modelo numérico construído com elementos de barra representa bem o comportamento do sistema. Existe porém forte influência das condições de apoio e das ligações no comportamento do modelo.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- ensaio da estrutura em escala maior, com maior profundidade nos corredores e com a instalação de contraventamentos no fundo, uma vez que estes componentes influenciam sobremaneira o comportamento da estrutura;
- projeto e construção de um outro modelo de braço, mais resistente do que o empregado neste trabalho. Sugere-se a adoção de um perfil de seção transversal que aumente a resistência deste componente;
- determinação experimental da rigidez da placa de base da estrutura. Este ensaio apresenta a dificuldade da manutenção do carregamento axial, a despeito da rotação exigida para a determinação da rigidez. Porém, é de extrema importância a quantificação desta rigidez, uma vez que a placa de base é fundamental na estabilidade do sistema.
- sugere-se também que seja simulado numericamente o sistema completo, de maneira similar ao realizado por Campos (2003), porém com a modificação das condições de fixação da estrutura. Assim, sugere-se, primeiramente, a utilização de engaste e também, após o ensaio da placa de base sugerido anteriormente, a simulação com o valor de rigidez determinado;
- estudo numérico do sistema completo com a utilização de elementos de casca, buscando avaliar a estrutura com relação ao comportamento localizado de seus componentes, buscando aferir os resultados experimentais;
- realização de um estudo sistemático da influência da distribuição de cargas no sistema, com a concentração desta em regiões específicas do mesmo, a fim de se recomendar uma forma ideal desta distribuição.

REFERÊNCIAS

Abdel-Jaber, M., Beale, R. G., Godley, M. H. R. (2005a). Numerical study on semi-rigid racking frames under sway. *Computers and Structures*, article in press.

Abdel-Jaber, M., Beale, R. G., Godley, M. H. R. (2005b). A theoretical and experimental investigation of pallet rack structures under sway. *Journal of Constructional Steel Research*, article in press.

Abdel-Rahman, N., Sivakumaran, K.S. (1997). Material properties models for analysis of cold-formed steel members. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 123, nº 9, pag 1135-1143.

Águia (1999). *Águia Sistemas de Armazenagem*, catálogo, Ponta Grossa – PR.

Águia (2004). *Projeto de Sistema de Armazenagem Industrial do Tipo “Drive-in”*.

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.

ANSYS (2001). *User’s Manual for revision 5.6*. Swanson Analysis Systems Inc. Inc., Houston, PA.

AS/NZS 4600 (1996). *Australian/New Zealand standard for cold formed steel structures*, Sydney.

Bakker, M. C. M., Pekoz, T. (2003). The finite element method for thin-walled members-basic principles. *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, p. 179-189.

Baldassino, N., Bernuzzi, C. (2000). Analysis and behaviour of steel storage pallet racks. *Thin-Walled Structures*, Vol. 37, p. 277-304.

Batista, E. M.; Vazquez, E. G.; Nagahama, K. J.; Camotim, D. (2000). Estudo dos Modos de Instabilidade Local de Placa e Distorcional em Perfis de Chapa Dobrada de Aço. XXIX Jornadas sul-americanas de Engenharia Estrutural, Punta Del Este, v. cd-rom.

Beale, R. G., Godley, M. H. R. (2002). The Design of the Pallet Program. Sixteenth International Specialty Conference in Cold Formed Steel Structures proceedings, Missouri-Rolla.

Bernuzzi, C., Castiglioni, C. A. (2001). Experimental analysis on the cyclic behaviour of beam-to-column joints in steel storage pallet racks. *Thin-Walled Structures*, Vol. 39, p. 841-859.

Brownbuilt (2004). Catálogo de produtos on line. www.brownbuilt.com.au. Consulta em 05/02/2004.

Campos, S. R. (2003). Estudo Teórico-Experimental de Sistemas Estruturais de Armazenagem Industrial Tipo Drive-in. Dissertação de mestrado, UFOP.

Chai, G.B.; Chou, S.M. e Ling, L. (2000). Finite element technique for design of stub columns. *Thin Walled Structures*, v. 37, p. 97-112.

Chan, S. L., (2001). Non-linear behavior and design of steel structures. *Thin Walled Structures*, v. 57, p. 1217-1231.

Cheung, Y. K. (1976). Finite Strip Method in Structural Analysis. Pergamon Press, New York, apud Hancock, G. J, Murray, T. M., Ellifrit, D. S. (2001). Cold Formed Steel Structures to the AISI Specification. Marcel Dekker Inc. New York.

Davies, J. M.; Leach, P. (1994). First Order Generalized Beam Theory. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 31, p. 187-220.

Davies, J. M.; Leach, P.; Heinz, D. (1994). Second Order Generalized Beam Theory. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 31, p. 221-241.

Davies J. M.; Leach, P. e Taylor A. (1997). The Design of Perforated Cold-Formed Steel Sections Subject to Axial Load and Bending. Thin Waled Structures, v. 29 (1-4), p. 141-157.

Davies, J.M. (2000) Recent research advances in cold-formed steel structures. Journal of Constructional Steel Research 55 p. 267-288.

Dexion (2004). Catálogo de produtos on line. www.dexion.co.uk. Consulta em 05/02/2004.

Eurocode 3 (1992). Design of Steel Structures. Draft issue 2, Nov.

FEM (1996). Recommendations for the Design of Steel Static Palete Racking and Shelving., Federation Europeéne de la Manutention, pre-norm FEM 10.2.02.

Freitas, A. M. S, Freitas, M.S.R, Oliveira, A. M, Cabral, J.B., Souza, F.T. (2001). Análise Teórica Experimental de Colunas Metálicas Perfuradas de Perfis Formados a Frio. IV Seminário Internacional O Uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil / I Congresso Internacional da Construção Metálica (I CICOM), São Paulo, SP, v. cd-rom 12 pag.

Freitas, A. M. S., Freitas, M.S.R, Souza, F.T (2002). Análise de sistemas de armazenamento industriais do tipo Drive-in. XXX Jornadas sul-americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, DF, v. cd-rom, 12 pag.

Freitas, M.S.R., Freitas, A.M.S., Souza, F.T. (2003). Analysis and Behaviour of Steel Storage Racks Columns. ASSCCA'03 Conference proceedings, Ed. Balkema, Amsterdam.

Freitas, M.S.R., Freitas, A.M.S., Souza, F.T. (2004). Análise teórico-experimental de elementos formados a frio perfurados submetidos à compressão. Revista da Escola de Minas, Vol. 57, p. 59 – 63.

Freitas, A. M. S., Freitas, M. S. R., Souza, F. T. (2005). Analysis of steel storage rack columns. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61, p. 1135 –1146.

Godley, M. H. R., Beale, R.G., Feng, X. (2000). Analysis and design of down-aisle pallet rack structures. Computers and Structures, Vol. 77, p. 391-401.

Godley, M. H. R. (2002). The Behaviour of Drive-in Storage Structures. Sixteenth International Specialty Conference in Cold Formed Steel Structures proceedings, Missouri-Rolla.

Godley, M. H. R., Beale, R. G., Lau, H. H. (2003). The influence of base connectivity on the ultimate load of columns. Computers and Structures, Vol. 81, p.1827-1849.

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.

Hancock, G. J. (1997). Design for distortional buckling of flexural members. Thin Walled Structures, Vol. 27, p 3-12.

Hancock, G. J, Murray, T. M., Ellifrit, D. S. (2001). Cold Formed Steel Structures to the AISI Specification. Marcel Dekker Inc. New York.

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.

Hottinger Baldwin Messtechnik (2003a). Manual de operação Spider8 e Spider8-30.

Hottinger Baldwin Messtechnik (2003b). Catman 4.5 Operating Manual.

Lewis, G. M. (1991). Stability of Rack Structures. Thin-Walled Structures, Vol. 12, p.163-174.

Nagahama, K. J. (2003). Análise de estabilidade local em perfis de seção aberta em aço e em resina reforçada com fibra de vidro. Tese de Doutorado, UFRJ.

NBR 14672:01(2001) – Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio.

Oliveira, A. M., (2000). Análise Teórico-Experimental de Sistemas Estruturais de Armazenamento (Rack's). Dissertação de Mestrado, UFOP.

Pérez, S. V. S (2003). Análise da Instabilidade Distorcional em Perfis de Paredes Finas e Seção Aberta, sob Carga de Compressão Excêntrica. Tese de Doutorado, UFRJ.

RMI (1997). Specification for Design, Testing, and Utilization of Industrial Steel Storage Racks, Rack Manufacturers Institute, Charlotte, NC.

Rodrigues, F. C. (1993). Estudo Teorico-Experimental de Perfis de Chapa Dobrada Submetidos à Compressão. Tese de Doutorado, UFRJ.

Sarawit, A. T. Pekoz, T. (2002). Design of Industrial Storage Racks. Sixteenth International Specialty Conference in Cold Formed Steel Structures proceedings, Missouri-Rolla.

Sarawit, A. T. Pekoz, T. (2003). Cold-Formed Steel Frame and Beam-Column Design. Final Report, Cornell University.

Sarawit, A. T., Kim, Y., Bakker, M.C.M., Pekoz, T. (2003). The finite element method for thin-waled members-applications. Thin-Waled Structures, Vol. 41, p. 191-206.

Sarmanho, A. M. C. (1991). Estudo do Comportamento Pos-Critico de Paredes Esbeltas de Perfis Metalicos. Dissertação de Mestrado, UFRJ.

Schafer, B. W.; Pekoz, T. (1998). Direct Strength Prediction of Cold-formed Steel Members Using Numerical Elastic Buckling Solutions. Thin Walled Structures, Research and Development, Elsevier apud Hancock, G. J, Murray, T. M., Ellifrit, D. S. (2001). Cold Formed Steel Structures to the AISI Specification. Marcel Dekker Inc. New York.

Schafer, B. W. (2002) Local, Distortional and Euler Buckling of Thin-Waled Columns. Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No.3, p. 289-299.

Schardt, R. (1989). Verallgemeinert Technische Biegetheorie. Springer Verlag, Berlin.

Schardt, R. (1994). Generalized Beam Theory – An Adequate method for Coupled Stability Problems. Thin-Walled Structures, Vol. 19, p. 161-180.

SEMA (1980). Code of Practice for the Design of Static Racking, The Storage Equipment Manufacturers Association.

Silvestre, N., Camotim, D. (2002). First Order Generalized Beam Theory – An adequate Method for Coupled Stability Problems. *Thin-Walled Structures*. V. 40, 755-789.

Silvestre, N., Camotim, D. (2002). Second Order Generalized Beam Theory – An adequate Method for Coupled Stability Problems. *Thin-Walled Structures*. V. 40, 791-820.

Teh, L. H., Hancock, G. J., Clarke, M. J. (2004). Analysis and Design of Double-Sided High-Rise Steel Palet Rack Frames. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 130, No. 7, p. 1011-1021.

Vazquez, E. G. (2002). Análise Teórica e Experimental da Instabilidade Torcional de Perfis Formados a Frio sob Compressão Centrada. Tese de Doutorado, UFRJ.

Yu, W. (2000). *Cold Formed Steel Design*. 3rd edition. John Wiley & Sons, inc. New York.