

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

## **ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL TIPO *DRIVE-IN***

**SIMONE RODRIGUES CAMPOS**

ORIENTADORES: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. 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: Estruturas Metálicas.

Ouro Preto, abril de 2003.

*A minha família;  
Ao Renato.*

## **Agradecimentos**

- A Deus por ter me dado condições de concluir este trabalho;
- Aos meus pais pela presença constante e aos meus irmãos: Márcia, Flávia e Rafael pelo apoio;
- Ao Renato pela compreensão, carinho e incentivo em todos os momentos;
- Aos professores Arlene e Marcílio pela orientação na realização deste trabalho;
- A Adriana pelo companheirismo e alegria;
- A Fabíola e Tatianna pela amizade e por tornarem a estadia em Ouro Preto mais calorosa;
- A todos os colegas de mestrado pelos momentos de descontração;
- Aos professores do Propec, em especial aos professores Ricardo e Christianne pela atenção e carisma;
- A secretária do Propec, Róvia e ao professor Walter Dornelas pela disponibilidade em ajudar;
- Ao CNPq pelo apoio financeiro;
- A empresa Águia Sistemas de Armazenagem pelo fornecimento do projeto e das peças utilizadas nos ensaios experimentais.

## Resumo

Neste trabalho apresenta-se um estudo do comportamento de sistemas de armazenagem industrial do tipo *Drive-in*. Apesar de ser uma estrutura composta de perfis formados a frio, o seu projeto não pode ser baseado nas normas tradicionais de dimensionamento. Isto porque os sistemas de armazenagem industrial possuem como característica própria perfurações ao longo dos perfis que compõem as colunas e que são utilizados para facilitar o encaixe das vigas. Para o presente estudo foram utilizadas as prescrições de norma do RMI - *Rack Manufacturers Institute* com algumas modificações para abranger o sistema *Drive-in*.

Por ser uma estrutura esbelta e composta por perfis formados a frio, a estabilidade do sistema *Drive-in* é importante, sendo interessante conhecer a rigidez real das ligações. Neste trabalho foi avaliada experimentalmente a rigidez da ligação coluna-placa de base, enquanto os valores de rigidez das demais ligações foram obtidos em estudos anteriores.

As análises foram feitas através de um *software* em elementos finitos, em que a estrutura foi modelada com elementos de viga e elementos de mola. Estudou-se o tipo de análise que melhor representa o comportamento da estrutura: linear ou não linear, bidimensional ou tridimensional; avaliou-se a perda de influência do plano de contraventamento dos fundos nas colunas frontais; validou-se a obtenção da área efetiva da coluna através da tensão nominal segundo a NBR-14672; estudou-se a importância da consideração dos dados experimentais no comportamento global da estrutura, aplicaram-se forças horizontais como forma de representar a estrutura fora do prumo e foram feitas algumas considerações sobre a determinação da carga crítica da coluna.

Essas análises têm como objetivo conhecer o comportamento e propor recomendações para projeto de sistemas do tipo *Drive-in*.

# **Abstract**

This work studies the behavior of the Drive-in, which is a steel storage rack system. Although these systems consist of thin cold-formed steel sections, their projects cannot be based on the traditional codes. It happens because there are holes in the columns of the racks. These holes are used to make the rabbet of the beams easier. In this study was used a specific code to steel storage racks systems of the RMI - Rack Manufacturers Institute with some modifications because this code doesn't enclose the Drive-in system.

Being a slender structure, the stability of the Drive-in system is important, and then in this case the knowledge of the true stiffness of the joining is important. At the present work the stiffness of the base plates was determined by test. The values of the others stiffness used in this study are the previous studies.

A study about a better analysis – linear or non-linear and 2D or 3D – to represent the structure behavior was made by software in finite elements, where the structure was shaped with beam and spring elements. The influence of the bracing was evaluated in the front columns. The calculation of the column's area through the NBR-14672's stress was validated. The experimental data in the global behavior of the structure was considered important. Horizontal forces were applied as form to the effect of the out-of-plumbness in the structure and some considerations were made about the critical load of the column.

These analyses have as objective to know the behavior and to consider recommendations for project of Drive-in system.

# Sumário

Lista de Figuras.....	X
Lista de Quadros .....	XVI
Lista de Símbolos.....	XVII
Lista de Tabelas .....	XXII
 CAPÍTULO 1. Introdução .....	 1
 CAPÍTULO 2. Sistemas de Armazenagem Industrial .....	 7
2.1. Histórico .....	8
2.2. Características gerais dos sistemas de armazenagem.....	10
2.3. Tipos de sistemas de armazenagem.....	11
2.3.1. Sistemas Estáticos.....	12
2.3.1.1. Sistema <i>Porta-pallets</i> .....	12
2.3.1.2. Sistema <i>Drive-in</i> .....	14
2.3.1.3. Sistema <i>Drive-through</i> .....	16
2.3.1.4. Sistema <i>Cantilever</i> .....	16
2.3.2. Sistema Dinâmico .....	17
2.3.2.1. Sistema de armazenagem dinâmica.....	17
2.3.2.2. Sistema <i>Flow-rack</i> .....	19
2.3.2.3. Sistema <i>Push-back</i> .....	20
 CAPÍTULO 3. Características do Sistema <i>Drive-in</i> .....	 23
3.1. Elementos componentes do sistema <i>Drive-in</i> .....	23
3.1.1. Vigas .....	25
3.1.2. Colunas.....	27

3.1.3. Elementos de contraventamento .....	30
3.1.4. Distanciadores .....	31
3.1.5. Placa de base .....	32
3.1.6. Ligações .....	34
3.2. Estabilidade.....	35
3.3. Imperfeições.....	38
 CAPÍTULO 4. Prescrições de Norma.....	 43
4.1. Especificações do RMI .....	44
4.1.1. Levantamento das cargas .....	44
4.1.2. Combinação das cargas pelo Método dos Estados Limites (LRFD) .....	45
4.1.3. Dimensionamento das colunas.....	46
4.1.4. Comportamento das ligações .....	54
4.1.5. Vigas .....	56
4.1.6. Comprimento efetivo .....	57
4.1.7. Placas de base .....	58
4.1.8. Considerações de projeto .....	59
4.2. Especificações da ABML. ....	60
4.3. Considerações quanto ao dimensionamento das colunas do sistema <i>Drive-in</i> .....	60
 CAPÍTULO 5. Placa de Base. ....	 63
5.1. Comportamento da placa de base .....	64
5.2. Ensaios descritos na literatura.....	64
5.3. Ensaio da ligação coluna-placa de base .....	66
5.4. Resultados encontrados.....	69
 CAPÍTULO 6. Análise Numérica.....	 75
6.1. Análise não linear .....	75
6.2. Análise tridimensional .....	76
6.3. Elementos utilizados na modelagem.....	76
6.4. Características geométricas dos componentes do sistema <i>Drive-in</i> .....	78
6.5. Resultados experimentais utilizados .....	80

6.6. Estruturas modeladas .....	81
6.6.1. Configurações do carregamento .....	84
6.7. Avaliação da carga crítica da coluna do sistema <i>Drive-in</i> .....	90
 CAPÍTULO 7. Análise dos Resultados .....	93
7.1. Análise das combinações de carga.....	94
7.2. Estudo das análises linear e não linear.....	97
7.3. Estudo das análises bidimensional e tridimensional.....	101
7.4. Eficiência do plano de contraventamentos dos fundos .....	103
7.5. Análise dos dados experimentais.....	104
7.6. Análise das forças horizontais .....	108
7.6.1. Forças horizontais na direção do eixo global z.....	108
7.6.2. Forças horizontais na direção do eixo global x.....	112
 CAPÍTULO 8. Considerações Finais.....	117
 Referências Bibliográficas .....	120
 ANEXO I. Projeto do Sistema de Armazenagem Industrial do Tipo <i>Drive-in</i> .....	124

# Lista de Figuras

## CAPÍTULO 1

Figura 1.1 – Foto do sistema de armazenagem industrial automatizado do tipo <i>Drive-in</i> , (Águia (2002)).	1
---	---

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Detalhe da ligação de encaixe entre a viga e a coluna, (Altamira (2002))...	8
Figura 2.2 – Diferentes tipos de colunas dos sistemas de armazenagem industrial.	9
Figura 2.3 – Foto do sistema de armazenagem para bobinas, (Esmena (2002)).	10
Figura 2.4 – Foto do sistema de armazenagem para placas de madeira, (Isma (2002)).	10
Figura 2.5 – Foto do armazenamento manual direto sobre o <i>rack</i> , (Altamira (2002))...	11
Figura 2.6 – Foto de um palete metálico, (Parmatec (2000)).	11
Figura 2.7 – Foto do sistema de armazenagem industrial do tipo <i>Porta-pallets</i> , (Altamira (2002)).	12
Figura 2.8 – Foto de um estoque de produtos a granel no sistema <i>Porta-pallets</i> , (Altamira (2002)).	13
Figura 2.9 – Configuração do sistema <i>Porta-pallets</i> : (a) Vista frontal; (b) Vista superior; (c) Vista lateral com o esquema de armazenamento através de empilhadeira, e indicação de sentido de acesso para estocagem, (Steel King (2002)).	14
Figura 2.10 – Configuração do sistema <i>Drive-in</i> (a) Vista frontal; (b) Vista superior; (c) Vista tridimensional com o esquema de armazenamento através de empilhadeira, e indicação de sentido de acesso para estocagem, (Altamira (2002)).	15
Figura 2.11 – Vista superior da movimentação das empilhadeiras dentro do sistema <i>Drive-trough</i> , (Altamira (2002)).	16
Figura 2.12 – Foto do sistema de armazenagem do tipo <i>Cantilever</i> , (Fiel (2002)).	17
Figura 2.13 – Esquema de roldanas no sistema de armazenagem dinâmica, (Steel King (2002)).	18
Figura 2.14 – Foto de um mecanismo de rolos no sistema de armazenagem dinâmico, (Águia (2002)).	18

Figura 2.15 – Princípio de funcionamento do sistema de armazenagem dinâmica, (Steel King (2002)).	19
Figura 2.16 – Foto do sistema de armazenagem do tipo <i>Flow-rack</i> , (Sofima (2002))...	20
Figura 2.17 – Foto de um esquema de rodas ao longo dos trilhos, (Sofima (2002)).....	20
Figura 2.18 – Esquema de armazenamento no sistema <i>Push-back</i> ilustrando a retirada e colocação do produto, (Steel King (2002)).....	21
Figura 2.19 – Foto de um esquema de trilhos do sistema <i>Push-back</i> , (Isma (2002)).....	22
Figura 2.20 – Foto do detalhe do esquema de funcionamento dos trilhos do sistema <i>Push-back</i> , (Steel King (2002)).	22

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Elementos componentes do sistema <i>Drive-in</i> (Águia (1999)). (a) vista frontal do sistema <i>Drive-in</i> com o posicionamento de uma ligação do braço central e da longarina; (b) detalhe da ligação da coluna e dos elementos componentes da ligação do braço; (c) detalhe da ligação da coluna e dos elementos componentes da ligação da longarina,	24
Figura 3.2 – Configuração do braço e da viga do túnel (Águia (1999)); (a) Braço; (b) Viga do túnel.	25
Figura 3.3 – Longarina com ligação de garra com dois dentes (Águia (1999)).	26
Figura 3.4 – Configuração do armazenamento no sistema <i>Drive-in</i> .	27
Figura 3.5 – Tipos de colunas de sistemas industriais de armazenagem utilizadas no país.	28
Figura 3.6 – Tipos de seção transversal de colunas: (a) Seção tipo <i>rack</i> ou “garrafa”; (b) seção U enrijecido.	29
Figura 3.7 – Coluna com seção tipo <i>rack</i> ou “garrafa”, com flanges adicionais para conexão dos contraventamentos, (Altamira (2002)).	29
Figura 3.8 – Foto de uma coluna de seção transversal U enrijecido com cantoneiras adicionais para instalação dos contraventamentos, (Isma (2000)).	30
Figura 3.9 – Sistema <i>Drive-through</i> com contraventamentos na face lateral e no plano horizontal superior, (Isma (2000)).	31
Figura 3.10 – Detalhe da posição e seção transversal de distanciadores na face lateral do sistema, (Águia (1999)).	32

Figura 3.11 – Tipos de placas de base de sistemas de armazenagem. ....	33
Figura 3.12 – Protetor de colunas contra impactos na placa de base (Altamira (2002)).	33
Figura 3.13 – Ligação parafusada com fixação no flange da coluna. ....	34
Figura 3.14 – Ligação com garras dentadas com pino de segurança, (Altamira (2002)).	34
Figura 3.15 – Foto de uma estrutura do tipo <i>Drive-in</i> , (Andrade (2003)). ....	35
Figura 3.16 – Indicação das direções no sistema <i>Drive-in</i> . ....	36
Figura 3.17 – Vista da face lateral do sistema de contraventamentos do <i>Drive-in</i> com a indicação de seus componentes. ....	37
Figura 3.18 – Vista superior do sistema mostrando os contraventamentos dispostos no topo das colunas do <i>Drive-in</i> com a indicação de seus componentes. ....	37
Figura 3.19 – Vista do plano de fundo do sistema de contraventamento do <i>Drive-in</i> com a indicação de seus componentes. ....	38
Figura 3.20 – Pontos de aplicação das forças horizontais segundo a norma australiana de <i>rack</i> AS 4084 (1993); (a) equivalência das forças para representar a imperfeição no plano ZY; (b) equivalência das forças para representar a imperfeição no plano XY. ....	40

## CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Identificação da maior largura da seção transversal bruta ( $W$ ) e da distância de eixo a eixo das perfurações, ( $L_p$ ): (a) Seção transversal tipo <i>rack</i> com a identificação de $W$ ; (b) Vista frontal da coluna com as dimensões de $W$ e $L_p$ . ....	49
Figura 4.2 – Tipos de perfurações com a indicação do comprimento mínimo da coluna curta, (AISI (1996)). ....	50
Figura 4.3 – Esquema geral de montagem do ensaio de coluna curta, posicionada na prensa hidráulica KRATOS. ....	51
Figura 4.4 – Seção transversal considerando a área líquida mínima com a indicação da posição do $CG_{\min}$ . ....	52
Figura 4.5 – Esquema do ensaio da viga em balanço ( <i>Cantilever test</i> ) segundo as prescrições do RMI. ....	54
Figura 4.6 – Curva ilustrativa carga-deslocamento de uma ligação com indicação da carga última ( $P_u$ ) e do par ordenado ( $\delta_{0,85}$ ; $P_{0,85}$ ). ....	56
Figura 4.7 – Disposição dos comprimentos $L_{\text{short}}$ e $L_{\text{long}}$ para pórticos em que as diagonais de contraventamento se conectam a coluna. ....	58

Figura 4.8 – (a) Coluna com carregamento na extremidade; (b) Coluna com carregamento aplicado ao longo do seu comprimento.....	62
--	----

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Modelo de placa de base utilizado no sistema <i>Drive-in</i> em estudo.....	63
Figura 5.2 – Esquema do ensaio sugerido pela FEM para a determinação da rigidez da ligação coluna-placa de base.....	65
Figura 5.3 – Esquema de montagem do ensaio. ....	67
Figura 5.4 – Foto do ensaio realizado para a determinação da rigidez da ligação coluna-placa de base mostrando o posicionamento do atuador hidráulico, dos transdutores de deslocamento e relógio. ....	68
Figura 5.5 – Curva ilustrativa do Método da Inclinação a 50% do Momento Último. ..	69
Figura 5.6 – Foto do ensaio 1 apresentando a configuração da coluna após a aplicação de toda a carga. ....	70

## CAPÍTULO 6

Figura 6.1 – Representação do elemento <i>Link 180</i> . ....	77
Figura 6.2 – Representação do elemento <i>Combin 14</i> identificando a sua rigidez a rotação.....	78
Figura 6.3 – Vista tridimensional da estrutura modelada no ANSYS (2001). ....	82
Figura 6.4 – Painel representativo da estrutura imperfeita no plano XY. ....	84
Figura 6.5 – Painel representativo da estrutura imperfeita no plano ZY.....	84
Figura 6.6 – Distribuição da carga de armazenagem na estrutura: (a) Vista frontal com indicação do peso dos paletes e sua distribuição; (b) Vista lateral com indicação da carga $q$ nas vigas do túnel. ....	85
Figura 6.7 – Definição dos planos de aplicação das forças horizontais. ....	86
Figura 6.8 –Pontos de aplicação da força horizontal $F_z$ no plano frontal. ....	87
Figura 6.9 – Pontos de aplicação das forças horizontais $F_x$ no plano padrão. ....	88
Figura 6.10 – Configuração de carregamento da estrutura bidimensional. ....	90
Figura 6.11 – Configuração de carregamento das colunas: (a) Carregamento apenas na extremidade; (b) Configuração real de carregamento.....	91

Figura 6.12 – Valores das cargas críticas para cada tipo de configuração de carregamento.....	91
---	----

## CAPÍTULO 7

Figura 7.1 – Localização das colunas e dos planos na estrutura tridimensional. ....	93
Figura 7.2 – Localização das colunas no plano da estrutura bidimensional.....	94
Figura 7.3 – Comparação das análises linear e não linear através da relação esforço axial/área transversal na coluna direita no 1° plano da estrutura tridimensional.....	98
Figura 7.4 – Comparação dos resultados de momento fletor em torno do eixo global z da coluna direita do 1° plano da estrutura tridimensional. ....	99
Figura 7.5 – Comparação dos deslocamentos na direção global x da coluna direita do 1° plano da estrutura tridimensional.....	99
Figura 7. 6 – Configuração deformada em relação ao eixo global x da estrutura sob uma análise linear. ....	100
Figura 7. 7 – Configuração deformada em relação ao eixo global x da estrutura sob uma análise não linear. ....	100
Figura 7.8 – Gráfico carga versus deslocamento.....	101
Figura 7.9 – Comparação das análises bidimensional e tridimensional através dos resultados da relação esforço axial/área transversal na coluna direita.....	102
Figura 7.10 – Comparação das análises bidimensional e tridimensional através dos resultados de momento fletor em torno do eixo global z na coluna direita. ....	103
Figura 7.11 – Comparação dos deslocamentos na direção do eixo global x entre as colunas direitas do 1° plano e do 7° plano.....	104
Figura 7.12 – Comparação da relação esforço axial/área transversal na coluna direita do 1° plano de estruturas com áreas calculadas segundo a NBR-14672 e a AISI (1996). ....	105
Figura 7.13 – Comparação de momento fletor em torno do eixo global z na coluna direita do 1° plano de estruturas com áreas calculadas segundo a NBR-14672 e a AISI (1996).....	105
Figura 7.14 – Gráfico comparativo da relação esforço axial/área transversal da coluna direita do 1° plano da estrutura com dados experimentais e com dados nominais de projeto. ....	107

Figura 7.15 – Gráfico comparativo de momento fletor em torno do eixo global z da coluna direita do 1° plano da estrutura com dados experimentais e com dados nominais de projeto. ....	107
Figura 7.16 – Comparação da relação esforço axial/área transversal na coluna direita do 1° plano para estruturas representando a falta de prumo no plano ZY.....	109
Figura 7.17 – Comparação da relação esforço axial/área transversal na coluna direita do 2° plano para estruturas representando a falta de prumo no plano ZY.....	110
Figura 7.18 – Comparação de momento fletor em torno do eixo global z na coluna direita do 1° plano para estruturas representando a falta de prumo no plano ZY.....	110
Figura 7.19 – Comparação de momento fletor em torno do eixo global z na coluna direita do 2° plano para estruturas representando a falta de prumo no plano ZY.....	111
Figura 7.20 – Comparação de momento fletor em torno do eixo global z da coluna direita do 1° plano para estruturas representando a imperfeição no plano XY - forças horizontais Fx dispostas apenas no 1° plano. ....	112
Figura 7.21 – Plano da estrutura deslocada na direção global x após a aplicação das forças horizontais em todos os planos. ....	113
Figura 7.22 – Comparação da relação esforço axial/área transversal na coluna direita do 1° plano para estruturas representando a falta de prumo no plano XY - forças horizontais Fx dispostas em todos os planos. ....	114
Figura 7.23 – Comparação da relação esforço axial/área transversal na coluna esquerda do 1° plano para estruturas representando a falta de prumo no plano XY - forças horizontais Fx dispostas em todos os planos. ....	114
Figura 7.24 – Comparação de momento fletor em torno do eixo global z na coluna direita do 1° plano para estruturas representando a falta de prumo no plano XY - forças horizontais Fx dispostas em todos os planos. ....	115
Figura 7.25 – Comparação de momento fletor em torno do eixo global z na coluna esquerda do 1° plano para estruturas representando a falta de prumo no plano XY - forças horizontais Fx dispostas em todos os planos. ....	116

# Lista de Quadros

## CAPÍTULO 7

Quadro 7.1 – Distribuição da relação esforço axial/área transversal nas colunas do 1° e 7° plano da estrutura tridimensional após análise não linear.....	95
Quadro 7.2 – Distribuição de momento fletor em torno do eixo global z nas colunas do 1° e do 7° plano da estrutura tridimensional após análise não linear. ....	96

# Lista de Símbolos

## CAPÍTULO 3

$P$  = carga axial;

$\Delta$  = deslocamentos laterais sofridos pela estrutura;

$\theta$  = ângulo de imperfeição da estrutura;

$\psi_0$  = ângulo em rad da imperfeição máxima fornecido pela AS 4084 (1993);

$n$  = número de baias do sistema de armazenagem que são interconectadas;

$\phi_1$  = rotação angular em rad formada pela folga da ligação, determinada por meio de ensaio experimental;

$F_{Hi}$  = forças horizontais aplicadas no nível  $i$  da estrutura para simular a rotação  $\theta$  sofrida;

$W_{ij}$  = cargas concentradas no nível  $i$  na coluna  $j$  devido ao peso próprio e às cargas dos paletes;

$\phi_{imp}$  = ângulo de imperfeição variável relacionado com a geometria da estrutura;

$n_c$  = número de colunas na direção longitudinal, ou número de colunas na direção transversal, dependendo em qual direção está sendo aplicada a carga;

$n_s$  = número de níveis de viga;

$\phi_s$  = máximo valor especificado de imperfeição ( $\phi_s = 1/200$  rad);

$\phi_1$  = rotação devida à folga na ligação viga-coluna determinada experimentalmente;

## CAPÍTULO 4

$DL$  = peso próprio;

$LL$  = sobrecarga;

$PL$  = carga de armazenagem;

$Imp$  = carga vertical de impacto;

$F_x$  = força horizontal na direção global  $x$ ;

$F_z$  = força horizontal na direção global  $z$ ;

$WL$  = carga de vento;

$EL$  = carga sísmica;

$RL$  = carga de chuva;

$SL$  = carga de neve;

$P_n$  = carga nominal axial;

$A_e$  = área efetiva da seção transversal da coluna;

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

$f_{ya}$  = 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;

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

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

$Q_{mín}$  = fator  $Q$  determinado pelo ensaio de coluna curta, segundo a equação 4.3 com espessura mínima ( $t_{mín}$ );

$Q_{máx}$  = fator  $Q$  determinado pelo ensaio de coluna curta, segundo a equação 4.3 com espessura máxima ( $t_{máx}$ );

$t$  = espessura da seção que se quer determinar o  $Q$ ;

$L_p$  = distância entre os centros das perfurações;

$W$  = maior largura da seção transversal bruta;

$L$  = comprimento da coluna para realizar o ensaio da coluna curta;

$CG_{mín}$  = centro de gravidade da área mínima da seção transversal;

$W_e$  = módulo elástico efetivo da fibra mais extrema comprimida;

$W_{net}$  = módulo elástico da seção transversal da coluna, considerando a área líquida mínima para a fibra extrema comprimida;

$W_c$  = módulo elástico da seção efetiva considerando a área líquida mínima para a fibra extrema comprimida;

$M_c$  = momento elástico crítico;

$W_f$  = módulo elástico da seção transversal de área bruta para a fibra comprimida extrema;

$f_y$  = tensão de escoamento do aço;

$J$  = constante de torção de *Saint Venant*;

$r_0$  = raio de giração polar;

$C_w$  = constante de empenamento à torção;

$L_c$  = comprimento da coluna;

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

$L_b$  = comprimento do braço de alavanca da viga;

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

$F$  = rigidez da ligação (kNm/rad);

$P_{0,85}$  = 0,85 vezes o carregamento último;

$\delta_{0,85}$  = deslocamento na extremidade livre da viga, onde é posicionado o carregamento e correspondente ao valor de  $P_{0,85}$ ;

R.F. = fator de minoração que considera a dispersão dos resultados;

$L_{short}$  = mínima distância entre dois pontos de conexão dos elementos de contraventamento e a coluna;

$L_{long}$  = máxima distância entre dois pontos de conexão dos elementos de contraventamento e a coluna;

$K_t$  = coeficiente de flambagem à torção;

$P_p$  = carga nominal aplicada à placa de base;

$\phi_c$  = coeficiente de segurança determinado o critério do LRFD;

$f'_c$  = resistência à compressão do piso de concreto aos 28 dias;

$A_{pb}$  = área efetiva da placa de base;

$P$  = carga axial de cálculo;

$P_u$  = carga axial última de compressão;

$C_{my}$ ,  $C_{mz}$  = fator de momento equivalente em relação ao eixo y e z, respectivamente;

$M_y$  e  $M_z$  = momento fletor de cálculo em torno do eixo y e z, respectivamente;

$M_{uy}$  e  $M_{uz}$  = momento fletor último em torno do eixo y e z, respectivamente, na ausência de carga axial;

$P_{ey}$  e  $P_{ez}$  = carga de flambagem elástica em torno do eixo y e z, respectivamente.

## CAPÍTULO 5

$M$  = momento fletor na coluna;

$F_1$  = força axial aplicada;

$F_2$  = Força horizontal aplicada;

$\Delta$  = deslocamento sofrido pelo centro do bloco de concreto;

$L$  = comprimento total da peça ensaiada;

$M_i$  = momento fletor para o tempo  $i$ ;

$P_i$  = carga aplicada no tempo  $i$

$\ell_j$  = comprimento do centro de rotação ao aparelho  $j$ ;

$\theta_i$  = ângulo de rotação da coluna no tempo  $i$ ;

$\Delta_{ij}$  = deslocamento sofrido pela coluna após a aplicação da carga no tempo  $i$  medido pelo aparelho  $j$ ;

$M_u$  = momento fletor último;

$k$  = rigidez à rotação de uma ligação;

## CAPÍTULO 6

$k$  = rigidez à rotação de uma ligação;

$I_{yy}$  = momento de inércia relativo ao eixo local  $y$  do elemento;

$I_{zz}$  = momento de inércia relativo ao eixo local  $z$  do elemento;

$J$  = momento de inércia a torção;

$A$  = área da seção transversal;

$t$  = espessura;

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

$f_u$  = tensão limite de resistência à tração, obtida pelo ensaio de caracterização do aço;

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

$\theta$  = ângulo de imperfeição da estrutura;

$F_x$  = força horizontal na direção global  $x$ ;

$F_z$  = força horizontal na direção global  $z$ ;

$w$  = carga de um palete;

$q$  = carga distribuída na viga do túnel;

$W_{ij}$  = cargas concentradas no nível  $i$  na coluna  $j$  devido ao peso próprio e às cargas dos paletes.

## CAPÍTULO 7

DL = peso próprio;

LL = sobrecarga;

PL = carga de armazenagem;

Imp = carga vertical de impacto;

$F_x$  = força horizontal na direção global  $x$ ;

$F_z$  = força horizontal na direção global  $z$ ;

## Lista de Tabelas

### CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Classificação das ligações conforme a rigidez.....	60
---	----

### CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 – Valores encontrados no ensaio 1 para a posição do relógio. ....	71
Tabela 5.2 – Valores encontrados no ensaio 1 para a posição do LVDT1. ....	71
Tabela 5.3 – Valores encontrados no ensaio 1 para a posição do LVDT2. ....	72
Tabela 5.4 – Valores encontrados no ensaio 2 para a posição do relógio. ....	72
Tabela 5.5 – Valores encontrados no ensaio 2 para a posição do LVDT1. ....	73
Tabela 5.6 – Valores encontrados no ensaio 2 para a posição do LVDT2. ....	73
Tabela 5.7 – Resumo dos resultados de rigidez encontrados e o valor médio em cada ponto. ....	74

### CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 – Propriedades geométricas dos membros que compõe o sistema <i>Drive-in</i> . 79	
Tabela 6.2 – Valores médios de $f_{ya}$ , $f_u$ e do alongamento residual após a ruptura.....	80
Tabela 6.3 – Valores médios da rigidez das ligações determinadas por Oliveira (2000).80	
Tabela 6.4 – Valores de tenão nominal e área efetiva calculados de acordo com a norma brasileira NBR-14762 e com a AISI (1996). ....	81
Tabela 6.5 – Resumo das características das estruturas modeladas. ....	82
Tabela 6.6 – Dados experimentais e nominais de projeto utilizados.....	83
Tabela 6.7 – Valores das forças horizontais $F_z$ aplicadas na direção do eixo global $z$ . .	87
Tabela 6.8 – Valores das forças horizontais $F_x$ aplicadas apenas nos pontos do primeiro plano da estrutura na direção do eixo global $x$ . ....	88
Tabela 6.9 – Valores das forças horizontais $F_x$ aplicadas nos pontos de todos os planos da estrutura na direção do eixo global $x$ . ....	89

## **Introdução**

Os sistemas de armazenagem industrial, também conhecidos como *racks*, são sofisticados sistemas estruturais utilizados para armazenagem, estocagem e distribuição de produtos manufaturados. Estes sistemas variam desde pequenas estantes carregadas manualmente até estruturas de mais de 30 metros de altura automatizadas que utilizam empilhadeiras para movimentação das cargas. Os *racks* são utilizados em armazéns de fábricas, supermercados, atacados, entre outros. Existem vários tipos de sistemas de armazenagem industrial, cada um deles atendendo as diversas características dos produtos a serem armazenados. A figura 1.1 ilustra um sistema em operação.



Figura 1.1 – Foto do sistema de armazenagem industrial do tipo *Drive-in*, (Águia (2002)).

Os *racks* são fabricados em perfis formados a frio, tendo como principal característica perfurações ao longo de toda a altura de suas colunas. Através dessas

perfurações as vigas são encaixadas nas colunas, facilitando assim o processo construtivo tendo-se ligações semi-rígidas parafusadas ou não-parafusadas. Devido à elevada esbelteza dos membros que o compõem, e as perfurações em sua coluna, a estabilidade nesses sistemas é importante, devendo ser avaliada considerando-se a influência da semi-rigidez das ligações, inclusive da ligação entre a coluna e a placa de base, e o uso de contraventamentos. Outros fatores que afetam a estabilidade do sistema são as imperfeições iniciais oriundas da instalação da estrutura fora do prumo, a folga na ligação e os possíveis impactos provenientes do ato de armazenagem feito pelas empilhadeiras. Assim, por essas características próprias, os *racks* não se enquadram nas normas de projeto existentes o que levou os fabricantes a desenvolverem estudos visando à elaboração de prescrições específicas para estes tipos de sistemas.

Nos Estados Unidos existe o *Rack Manufacturers Institute* – (RMI (1997)) que prescreveu várias especificações baseados em pesquisas e na norma de dimensionamento de estruturas de aço formados a frio do *American Iron and Steel Institute*, AISI (1996).

Na Inglaterra, é utilizada a prescrição desenvolvida pela *Storage Equipment Manufactures' Association* – (SEMA (1980)), que é empregada conjuntamente com a norma britânica BS-499 (1969), (1975).

Na Europa existe a prescrição da *Federation Européenne de la Manutention* – (FEM (1997)), utilizada em conjunto com as prescrições da norma de dimensionamento de estruturas de aço, Eurocode 3 (1992).

Na Austrália, os aspectos do projeto estrutural dos sistemas de armazenamento industrial são descritos pela *Australian Steel Storage Racking Standard AS 4084*, e é baseado principalmente no RMI (1990), embora a combinação de cargas, tolerâncias e folgas tenham sido baseadas na FEM (1986).

No Brasil foi criada a Associação Brasileira de Movimentação e Logística – ABML – formada por empresas fabricantes e fornecedoras de equipamentos e serviços para a área de logística. Recentemente esta associação publicou uma recomendação para seus associados baseada no RMI (1997) e na AISI (1991), a prescrição “Especificação para projeto, testes e utilização de Sistemas de Armazenagem”, porém as várias empresas que existem no Brasil, apresentam características próprias para a fabricação das colunas, ligações, bem como o tipo de montagem utilizada.

Através dessas especificações, vários pesquisadores vêm desenvolvendo estudos relativos ao comportamento dos sistemas de armazenagem industrial com o objetivo de otimizar os projetos.

Godley (1991) fez uma introdução geral sobre alguns dos tipos de *racks*, como *Porta-pallets*, *Drive-in* e *Drive-through*. Seu estudo aponta o avanço do uso desta estrutura ao longo do tempo. Apresenta ainda alguns dos problemas aos quais as peças da estrutura estão sujeitas, o cálculo dos diferentes coeficientes de flambagem para as direções deslocáveis e indeslocáveis dos *racks* e avalia a importância da estabilidade global da estrutura.

Davies et al. (1997) estudaram o comportamento das colunas perfuradas em relação aos modos de flambagem local, distorcional e global. O objetivo deste estudo foi propor soluções analíticas e para uso em projeto dos membros que compõem o sistema. Para tanto os autores realizaram uma análise das colunas utilizando o método da GBT (*Generalized Beam Theory*) e o método dos elementos finitos. Concluíram que o método da GBT fornece bons resultados em relação aos resultados da análise em elementos finitos.

Kesti e Davies (1999) estudaram diferentes métodos para determinar a tensão elástica de flambagem distorcional de uma coluna curta de perfil formado a frio. Os métodos estudados foram o do Eurocode 3 (1992), o método do AS/NZ 4600 (*Standard of Australian and New Zealand*) e o método da GBT (*Generalized Beam Theory*). Deste estudo os autores concluíram que o método da GBT e o do AS/NZ 4600 fornecem resultados semelhantes, porém o método do Eurocode 3 quando comparado com o método da GBT resulta em valores de tensão elástica de distorção diferentes. Esta diferença nos valores de tensão elástica de distorção influencia no cálculo da área efetiva, já que esta é dependente do valor da tensão elástica de distorção.

Godley et al. (2000) analisaram as estruturas do tipo *Porta-pallets* na direção não contraventada, sujeitas a cargas horizontais e verticais. As estruturas foram analisadas através de equações diferenciais de flexão, incluindo o efeito de segunda ordem (efeito  $P\Delta$ ) e permitindo imperfeições iniciais na estrutura. Esse procedimento mostrou-se eficiente, e forneceu resultados compatíveis aos encontrados em estudos utilizando análise em elementos finitos.

O comportamento das ligações viga-coluna e placa de base-coluna é tipicamente não linear. Baldassino e Bernuzzi (2000) estudaram a influência da modelagem das ligações viga-coluna e placa de base-coluna, juntamente com a imperfeição de montagem da estrutura no comportamento dos *racks* tipo *Porta-pallets*. As conclusões indicam que para uma análise de projeto mais refinada e otimizada, deve-se considerar a rigidez das ligações, tanto viga-coluna quanto coluna-placa de base. Perceberam também a necessidade de incluir um deslocamento adicional associado com a folga da ligação para expressar imperfeição geométrica no projeto, a despeito do valor de  $1/200$  rad considerado fixo para todo o tipo de estrutura.

Oliveira (2000) fez um estudo dos sistemas de armazenagem, dando ênfase ao sistema *Drive-in*. Foram realizados testes experimentais tanto para quantificar a rigidez das ligações braço-coluna e longarina-coluna como para determinar a influência dos furos nas colunas. Estes resultados encontrados apresentaram boa correlação com os valores fornecidos através de cálculos prescritos pelo RMI (1997), (Freitas et al. (2000a), (2000b)).

Freitas et al. (2001) desenvolveram um estudo teórico-experimental em colunas avaliando a influência das perfurações na capacidade de carga das colunas do sistema. Os resultados experimentais realizados por Oliveira (2000) foram avaliados por estudos teóricos baseados nas prescrições do RMI (1997) e utilizando método numérico em elementos finitos. A comparação dos resultados experimentais com os resultados teóricos mostrou uma boa aproximação, principalmente se os dados utilizados para a caracterização do aço são reais e não aqueles fornecidos pelos fabricantes. Pode-se assim concluir que a análise em elementos finitos mostrou-se eficiente.

Markazi et al. (2001) estudaram o comportamento das ligações de encaixe semi-rígidas viga-coluna. Uma análise linear tridimensional do conector foi realizada e os resultados comparados com dados experimentais de Markazi et al. (1997). Os efeitos das diferentes condições de contorno foram investigados. Sub-modelos de parte da coluna em contato com a conexão foram feitos para determinar a influência do comportamento da coluna na relação momento-curvatura. Foram simulados dois modelos de ligação, rígida e semi-rígida, em que foram obtidos resultados similares aos observados em ensaios experimentais. A precisão de ambas as análises é

aproximadamente a mesma, porém a conexão rígida fornece resultados mais conservadores, logo seu uso é recomendado.

Bernuzzi e Castiglioni (2001) estudaram nas estruturas tipo *Porta-pallets* o comportamento das ligações sujeitas a um carregamento cíclico para os *racks* localizados em zonas sísmicas. Concluíram que as ligações, no princípio, possuem uma capacidade de dissipação de energia, que com o aumento do número de ciclos vai diminuindo, juntamente com a resistência. Testes futuros serão feitos com o objetivo de definir um modelo simplificado de simular a curva momento rotação associado com o histórico do carregamento.

A capacidade de carga última de uma coluna curta perfurada foi estudada por Shanmugam e Dhanalakshmi (2001). Uma equação foi determinada para encontrar esta capacidade utilizando vários parâmetros, tais como: esbeltez da placa, formato e tamanho das aberturas. Os resultados encontrados dessa equação foram comparados com os resultados de ensaios experimentais e de análise em elementos finitos. Os autores concluíram que a equação proposta é capaz de fornecer um valor adequado de carga última em todos os casos de seções com uma ou várias aberturas.

Pode-se observar que o sistema *Drive-in* ainda é pouco estudado, embora seja amplamente utilizado. Apenas o sistema tipo *Porta-pallets* tem sido estudado como um todo. Neste trabalho foi estudado o comportamento do sistema de armazenagem do tipo *Drive-in* globalmente, condicionando sua estrutura a vários parâmetros já estudados para o sistema *Porta-pallets*. Para este objetivo, foram considerados valores reais da rigidez das ligações entre as vigas e as colunas, determinadas anteriormente por Oliveira (2000), e a rigidez da ligação entre a coluna e a placa de base que foi determinada neste trabalho.

O projeto do sistema *Drive-in* utilizado foi fornecido pela Empresa Águia Sistemas de Armazenagem (Anexo I). Para este estudo utilizou-se a prescrição de norma do RMI, fazendo algumas modificações, já que o escopo desta prescrição não abrange os *racks* do tipo *Drive-in*. A estrutura foi toda modelada em elementos de viga e elementos de mola no *software* ANSYS e foram feitas várias análises, linear e não linear, bidimensional e tridimensional. O objetivo destas análises foi a validação das prescrições do RMI (1997) para o sistema *Drive-in*, comprovação da importância da determinação dos dados experimentais, verificação da influência do plano de

contraventamento dos fundos nas colunas frontais e validação das forças horizontais como forma de representar a estrutura fora do prumo.

A seguir, será apresentado de forma sucinta o conteúdo de cada capítulo mostrando os passos seguidos para a realização do trabalho.

No capítulo 2 é apresentado um breve histórico dos sistemas de armazenagem industrial. Em seguida são descritos os tipos de *racks* mais utilizados com suas características principais. Esta descrição está dividida segundo uma classificação quanto ao tipo de armazenagem que pode ser estática ou dinâmica.

No capítulo 3 são apresentadas as características dos elementos que compõem o sistema *Drive-in*, as ligações vigas-colunas, alguns aspectos relativos à estabilidade do sistema como os sistemas de contraventamentos e imperfeições na estrutura.

No capítulo 4 apresenta-se as prescrições de norma do RMI (1997) que podem ser adotadas para a análise do sistema *Drive-in*, já que o RMI não abrange este sistema em suas considerações. No fim deste capítulo são apresentadas algumas recomendações da ABML (2001) que são diferentes das considerações do RMI e algumas considerações sobre o dimensionamento das colunas do sistema *Drive-in*.

No capítulo 5 é estudado o comportamento da ligação coluna-placa de base. É apresentado o ensaio sugerido pela FEM (1997) e analisado por Godley et al. (1998). Logo após é descrita a metodologia utilizada para realizar o ensaio da ligação coluna-placa de base para determinar a rigidez dessa ligação.

No capítulo 6 é descrito como as análises foram realizadas, apresentado os aspectos de uma análise não linear e tridimensional, os tipos de elementos utilizados na modelagem da estrutura, as características geométricas dos componentes do sistema, um resumo dos resultados experimentais utilizados, incluindo os valores determinados por Oliveira (2000), os tipos de estruturas modeladas com as cargas aplicadas e finalmente uma avaliação da carga crítica da coluna do sistema *Drive-in*.

No capítulo 7 estão os resultados encontrados nos estudos realizados, comparando análises linear e não linear, bidimensional e tridimensional, a eficiência dos contraventamentos no fundo da estrutura, comprovação da importância de determinar os dados experimentais e validação das forças horizontais como forma de representar a falta de prumo nas estruturas.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido.

## **Os Sistemas de Armazenagem Industrial**

Os primeiros registros desses sistemas de armazenagem datam da década de 1930 (Godley (1991)) e eram constituídos de cantoneiras de aço formado a frio com furos ao longo de seu comprimento. Atualmente o processo de fabricação e construção das estruturas de armazenagem foi muito aprimorado no nível de organização e utilização racional da área útil dos depósitos para que essas estruturas fossem utilizadas em fábricas, supermercados, redes atacadistas, etc. Os *racks*, como são também chamados, são usados para armazenar produtos em diferentes fases da produção, em que podem ficar armazenados por longos ou curtos períodos, e serem armazenados e retirados um número de vezes dependendo da demanda do processo de produção e do mercado consumidor.

Esta grande diversidade de uso dos sistemas de armazenagem vem fazendo com que os projetos sejam cada vez mais ajustados à necessidade do cliente para atender a todos os tipos de produtos a serem armazenados, gerando assim vários tipos de *racks*.

Uma das principais características dos sistemas de armazenagem é a conexão de elementos através de peças perfuradas e parafusos visando facilitar e agilizar a montagem nos depósitos (Oliveira (2000)) (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Detalhe da ligação de encaixe entre a viga e a coluna (Altamira (2002)).

## 2.1. Histórico

No princípio os sistemas de armazenagem industrial eram compostos de cantoneiras de aço constituídas por perfis formados a frio com perfurações ao longo de todo o seu comprimento. As conexões entre os elementos eram simples, feitas através de parafusos, permitindo assim grande flexibilidade para o projetista no desenvolvimento de uma variedade de formas e configurações.

Com o passar dos tempos percebeu-se que o método das conexões por parafusos estava se tornando trabalhoso e caro, e era necessário um grande sistema de contraventamentos para assegurar a estabilidade da estrutura, principalmente devido à baixa rigidez a torção das seções tipo cantoneira. Além disto, tornou-se evidente que os sistemas de armazenagem não necessitavam da ampla flexibilidade de modificação de sua configuração com a qual estavam sendo construídos. Assim as perfurações foram resumidas apenas as colunas e os fabricantes desenvolveram outros tipos de ligações não-parafusadas, em que a conexão à coluna é feita através de garras dentadas, não utilizando parafusos.

As seções das colunas evoluíram passando de seções cantoneiras para U enrijecido, porém com estas seções os sistemas ainda apresentavam dificuldades na instalação dos

contraventamentos. Como forma de facilitar este problema foram desenvolvidos vários tipos de seções de colunas como, por exemplo, seções tipo “garrafa” chamadas também de seções tipo *rack*. Essas seções possuem rasgos ao longo do comprimento e faces adicionais para instalação dos contraventamentos (Figura 2.2).

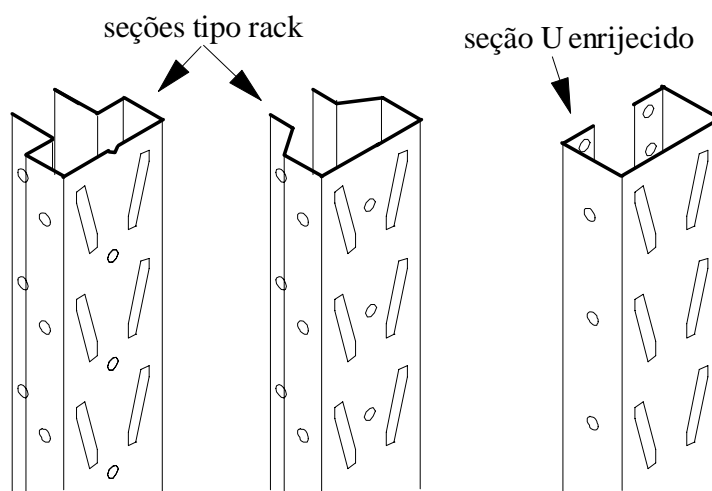


Figura 2.2 – Diferentes tipos de colunas dos sistemas de armazenagem industrial.

No Brasil, atualmente, existem diversas empresas que fabricam sistemas de armazenagem industrial como a Águia Sistemas de Armazenagem Ltda., Altamira Indústria Metalúrgica Ltda., Bertolini S/A – Sistemas de Armazenagem, Esmena do Brasil S.A., Fiel S/A Móveis e Equipamentos Industriais, Isma S/A Indústria Silveira de Móveis de Aço, Sofima S/A. Essas empresas desenvolveram seus sistemas utilizando tipos variados de ligações e colunas e fazem parte da ABML – Associação Brasileira de Movimentação e Logística criada em abril de 1997 com o objetivo de integrar e aumentar a representatividade do setor dentro da economia brasileira. Além dessas empresas há engenheiros estruturais que projetam estes tipos de sistemas que são construídos por empresas metalúrgicas independentes.

## 2.2. Características gerais dos sistemas de armazenagem

O ambiente onde são armazenados os produtos pode ser denominado de depósito de armazenagem. Os locais de armazenagem têm que ter uma utilização eficiente do espaço, permitindo uma grande densidade de armazenagem, e o fácil acesso aos produtos, descrito como acessibilidade. Para cada tipo de produto a ser armazenado, há uma infinidade de tamanhos e tipos de sistemas de armazenagem que se adaptam às suas características (Figura 2.3 e 2.4).



Figura 2.3 – Foto do sistema de armazenagem para bobinas, (Esmena (2002)).



Figura 2.4 – Foto do sistema de armazenagem para placas de madeira, (Isma (2002)).

A armazenagem pode ser feita manualmente ou por meio de empilhadeiras, além disto, os produtos podem ser dispostos individualmente sobre chapas metálicas, (Figura 2.5) ou empilhados em um gradil, que pode ser tanto metálico ou de madeira, chamado de palete (Figura 2.5 e 2.6).



Figura 2.5 – Foto do armazenamento manual direto sobre o *rack*, (Altamira (2002)).



Figura 2.6 –Foto de um palete metálico, (Parmatec (2000)).

A armazenagem nos sistemas que utilizam paletes pode ser classificada em duas categorias: com carregamento dos paletes de forma estática, em que somente uma empilhadeira é responsável pelo carregamento e descarregamento da estrutura e os produtos já armazenados não se movimentam sozinhos dentro da estrutura; e a forma dinâmica, onde sistemas de roletes são inseridos para a movimentação dos paletes no interior do sistema. Serão mostradas a seguir, as principais características de alguns tipos de sistemas de armazenagem paletizados considerados estáticos e dinâmicos.

### **2.3. Tipos de sistemas de armazenagem**

Para atender as necessidades específicas de cada produto a ser armazenado existem projetos de sistemas de armazenagem industrial diferentes. Essas diferenças estão na altura entre vigas, profundidade do sistema, modo de armazenamento, entre outras características a seguir apresentadas.

#### **2.3.1. Sistemas Estáticos**

Este sistema é mais indicado para armazenar produtos que não possuem grande rotatividade. Há uma grande variedade de tipos de *racks* estáticos, dentre os mais conhecidos estão:

#### **2.3.1.1. Sistema *Porta-pallets***

É um dos sistemas mais utilizados em depósitos (Figura 2.7). Permite a verticalização do espaço útil de forma seletiva, possibilitando o acesso direto a todos os itens armazenados com o mínimo de operações da empilhadeira. A sua altura está relacionada com o alcance do mecanismo que vai armazená-lo. A grande versatilidade deste sistema é que além de permitir a armazenagem paletizada, permite outras utilizações, como embalagens individuais em áreas de comércio varejista com uso de bandejas metálicas (Figura 2.8).



Figura 2.7 – Foto do sistema de armazenagem industrial do tipo *Porta-pallets*, (Altamira (2002)).



Figura 2.8 – Foto de um estoque de produtos a granel no sistema *Porta-pallets*, (Altamira (2002)).

A configuração do sistema *Porta-pallets* é mostrada na figura 2.9. Na figura 2.9 (a) observa-se à vista frontal, com a indicação das vigas em que são apoiados os paletes. A figura 2.9 (b), indica uma vista superior com os corredores de acesso para o armazenamento, e na figura 2.9 (c) tem-se uma vista lateral indicando através de setas, o sentido de acesso para estocagem utilizando as empilhadeiras. Uma desvantagem do sistema *Porta-pallets* é que os corredores por onde passam as empilhadeiras diminuem a área estocada de produto, portanto, a densidade de armazenagem do depósito.

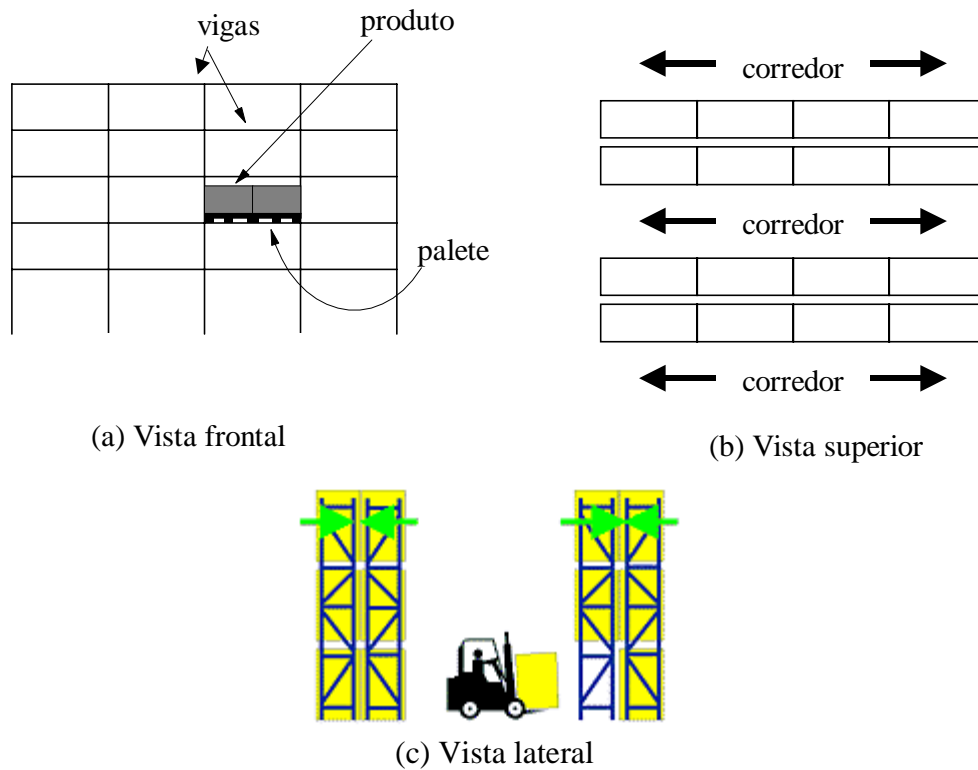
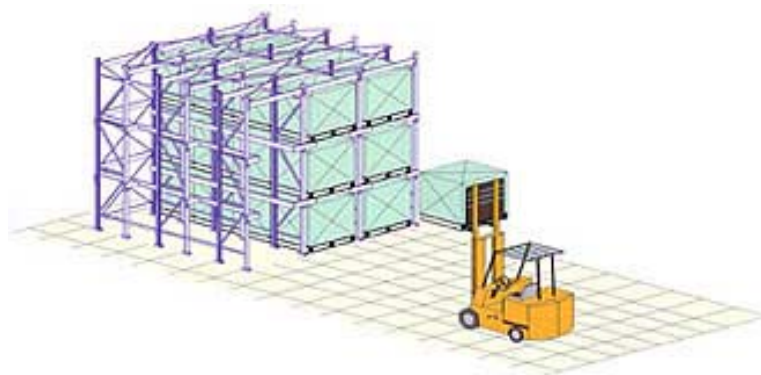
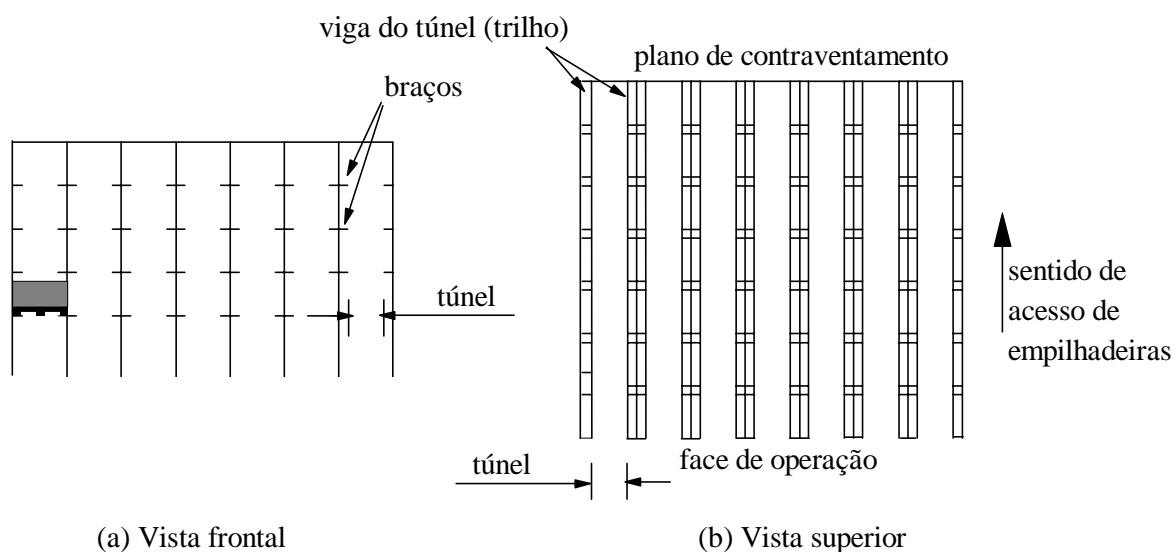


Figura 2.9 – Configuração do sistema *Porta-pallets*: (a) Vista frontal; (b) Vista superior; (c) Vista lateral com o esquema de armazenamento através de empilhadeira, e indicação de sentido de acesso para estocagem, (Steel King (2002)).

### 2.3.1.2. Sistema *Drive-in*

Este sistema tem como principal característica o total aproveitamento da área disponível, pois possibilita o trânsito interno de empilhadeiras armazenando os paletes ao longo da profundidade do sistema, reduzindo ao máximo a quantidade de corredores. O armazenamento nestes sistemas é realizado através de trilhos, também denominados de vigas do túnel e estas são ligadas a vigas curtas em balanço, chamadas de braços. Essas vigas curtas, os braços, possibilitam um túnel para o acesso de empilhadeiras no interior do sistema, como é mostrado na figura 2.10. Na figura 2.10 (a) observa-se a vista frontal do sistema em que são identificados os braços, que suportam os trilhos de apoio dos paletes e o túnel de acesso de empilhadeiras. Na figura 2.10 (b) há a indicação da vista superior do

sistema com a visão dos trilhos, do túnel de acesso das empilhadeiras com a face de operação das mesmas e a indicação por seta do sentido de acesso das mesmas, e o plano de contraventamentos no fundo. Na figura 2.10 (c) observa-se uma vista tridimensional do sistema com a ilustração da empilhadeira. A empilhadeira entra e sai pelo mesmo lado.



(c) Vista tridimensional

Figura 2.10 – Configuração do sistema *Drive-in* (a) Vista frontal; (b) Vista superior; (c) Vista tridimensional com o esquema de armazenamento através de empilhadeira, e indicação de sentido de acesso para estocagem, (Altamira (2002)).

#### 2.3.1.3. Sistema *Drive-through*

Este sistema possui as mesmas características do sistema *Drive-in*, a diferença é que a empilhadeira tem acesso pelos dois lados do sistema, tanto pode entrar pelos fundos e sair pela frente ou entrar pela frente e sair pelos fundos. O sistema *Drive-through* não possui o plano de contraventamento nos fundos (Figura 2.11).

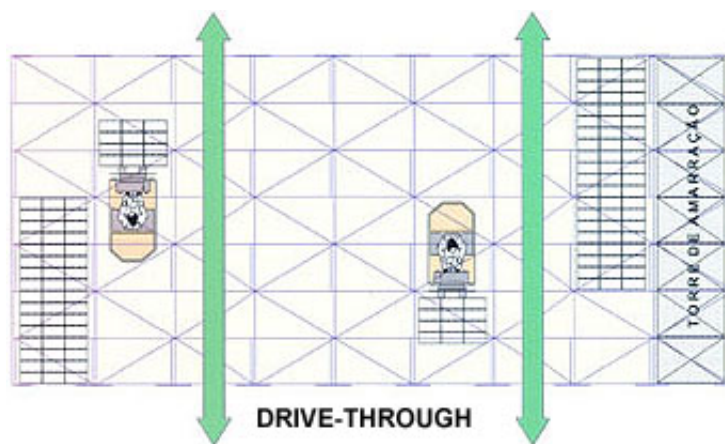


Figura 2.11 – Vista superior da movimentação das empilhadeiras dentro do sistema *Drive-through*, (Altamira (2002)).

#### 2.3.1.4. Sistema *Cantilever*

Este sistema facilita a estocagem de peças compridas ou volumosas e irregulares. Caracteriza-se por não possuir colunas nas extremidades dos conjuntos, tendo apenas uma coluna central onde são fixados os braços que servirão de apoio às peças ou aos planos (Figura 2.12). A coluna é fixada por meio de parafusos, à base, cujo engastamento ao solo se dá por chumbadores.



Figura 2.12 – Foto do sistema de armazenagem do tipo *Cantilever*, (Fiel (2002)).

### **2.3.2. Sistema Dinâmico**

O sistema de armazenagem dinâmica é adequado para os casos de estocagem de produtos com alta acessibilidade, sendo utilizado na estocagem de produtos que exigem alta densidade de armazenagem. Este sistema segue a filosofia *first-in first-out* (primeiro que entra, primeiro que sai), garantindo a acessibilidade dos produtos.

#### **2.3.2.1. Sistema de armazenagem dinâmica**

Este sistema possui um mecanismo de trilhos de roldanas (Figura 2.13), ou rolos (Figura 2.14), que promovem o movimento dos paletes para o interior do sistema por ação da gravidade e por meio de controladores de velocidade.

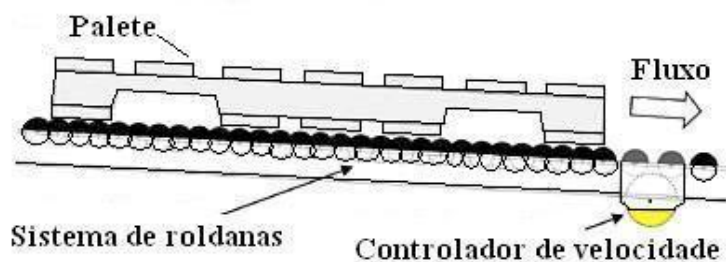


Figura 2.13 –Esquema de roldanas no sistema de armazenagem dinâmica,  
(Steel King (2002)).



Figura 2.14 – Foto de um mecanismo de rolos no sistema de armazenagem dinâmico,  
(Águia (2002)).

O sistema de armazenagem dinâmica funciona como esquematizado na figura 2.15, existindo uma face específica para o carregamento e outra para o descarregamento. A carga se movimenta através das roldanas instaladas nos trilhos, como ilustrado na figura 2.15. Os trilhos, por onde os paletes passam, possuem uma inclinação de tal forma que a face de carregamento fica em um nível mais elevado, portanto, pela ação da gravidade as cargas vão “descendo” até a face de descarregamento.

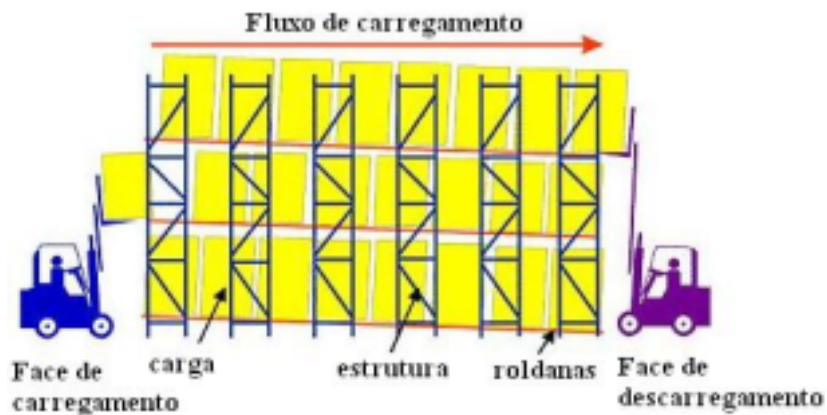


Figura 2.15 – Princípio de funcionamento do sistema de armazenagem dinâmica, (Steel King (2002)).

Neste sistema são necessários apenas dois corredores de acesso, um na face de carregamento e outro na face de descarregamento dos paletes. A profundidade desse sistema está relacionada apenas ao espaço disponível dos depósitos.

#### 2.3.2.2. Sistema *Flow-rack*

Este sistema é uma variante do sistema de armazenagem dinâmica. O *Flow-rack* possui uma profundidade menor do que o sistema de armazenagem dinâmica, sendo composto de trilhos apoiados sobre longarinas que permitem ajustar a altura e regulação para inclinação (Figura 2.16). Para facilitar o deslocamento do produto armazenado, alguns fabricantes podem desenvolver um sistema de rodas ao longo de todos esses trilhos (Figura 2.17). As mercadorias são carregadas pelo lado mais alto e descarregadas pela frente, permitindo o fácil acesso e a rápida reposição dos itens. Atende a estocagem a prazo curto facilitando a separação dos pedidos e o imediato atendimento das encomendas. Armazena cargas mais leves.



Figura 2.16 – Foto do sistema de armazenagem do tipo *Flow-rack*, (Sofima (2002)).



Figura 2.17 – Foto de um esquema de rodas ao longo dos trilhos, (Sofima (2002)).

### 2.3.2.3. Sistema *Push-back*

O sistema *Push-back* também é um variante do sistema de armazenagem dinâmica diferenciando-se na profundidade do sistema, que no *Push-back* é limitada geralmente até quatro paletes e no número de corredores de acesso, que neste sistema é somente um. Este único corredor de acesso é responsável pela operação de carga e descarga. A armazenagem é feita colocando-se o primeiro paleta no trilho e empurrando-o pelo paleta seguinte a lve

acima, e assim até o último paleta. Na retirada deste último paleta todos os demais, por gravidade, descem uma posição. A figura 2.18 ilustra o princípio de carga e descarga dos paletes. Os trilhos nos quais os paletes são colocados, possuem sistemas de roletes ou carrinhos deslizantes, figuras 2.19 e 2.20, que são responsáveis pela movimentação dos paletes. O sistema *Push-back* armazena itens com as mesmas características do sistema *Drive-in*, porém com pouca acessibilidade e pouca variedade. O sistema *Push-back* se enquadra na filosofia LIFO – *last-in first-out* (o último que entra é o primeiro que sai).



Figura 2.18 – Esquema de armazenamento no sistema *Push-back* ilustrando a retirada e colocação do produto, (Steel King (2002)).



Figura 2.19 – Foto de um esquema de trilhos do sistema *Push-back*, (Isma (2002)).



Figura 2.20 – Foto do detalhe do esquema de funcionamento dos trilhos do sistema *Push-back*, (Steel King (2002)).

## **Características do Sistema *Drive-in***

Os sistemas de armazenagem industrial possuem características comuns, como perfurações ao longo de suas colunas, ligações baseadas em encaixe e em parafusos e sistemas de contraventamento. Neste item serão apresentadas as principais características dos elementos que compõem o sistema de armazenamento estático do tipo *Drive-in*.

### **3.1. Elementos componentes do sistema *Drive-in***

O sistema *Drive-in* possui colunas, contraventamentos, distanciadores, ligações e elementos sujeitos a flexão. Estes elementos são: os braços, viga do túnel e longarinas. A figura 3.1 mostra a real configuração e o posicionamento desses elementos componentes do projeto fornecido pela Empresa Águia Sistemas de Armazenagem Ltda., (Anexo I).

Serão apresentadas a seguir as principais características dos elementos componentes do sistema *Drive-in*.

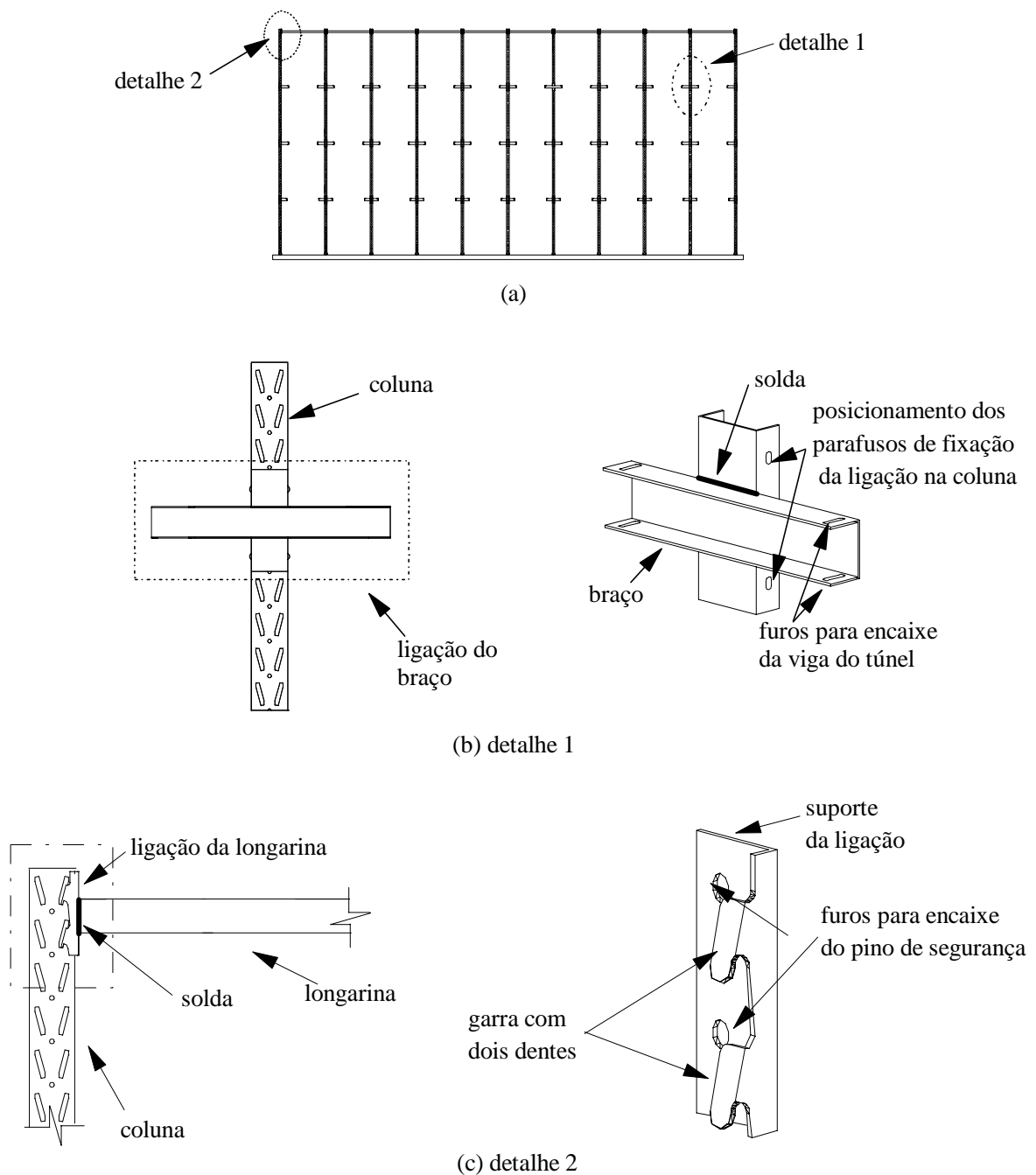


Figura 3.1 – Elementos componentes do sistema *Drive-in*

(a) vista frontal do sistema *Drive-in* (Águia (1999)) com o posicionamento de uma ligação do braço central e da longarina; (b) detalhe da ligação da coluna e dos elementos componentes da ligação do braço; (c) detalhe da ligação da coluna e dos elementos componentes da ligação da longarina.

### 3.1.1. Vigas

No sistema *Drive-in*, como dito anteriormente, existem três tipos de vigas com finalidades distintas, os braços, viga do túnel e longarinas. Os braços e as vigas do túnel são o que mais diferencia o sistema *Drive-in* do sistema *Porta-pallets*. Os braços são vigas curtas, de seção aberta, que são conectados às colunas através de ligação parafusada. A figura 3.2 (a) apresenta uma viga do tipo braço, e como o braço não liga uma coluna à outra, há um espaço entre os braços que permite a passagem das empilhadeiras de armazenagem no interior do sistema. As vigas do túnel são instaladas nas extremidades dos braços, no sentido da direção transversal, com o objetivo de suportar os paletes que serão armazenados e transmitir os esforços aos braços figura 3.2 (b). São normalmente de seção aberta e estão susceptíveis a fenômenos de flexão e principalmente a flambagem lateral por torção.

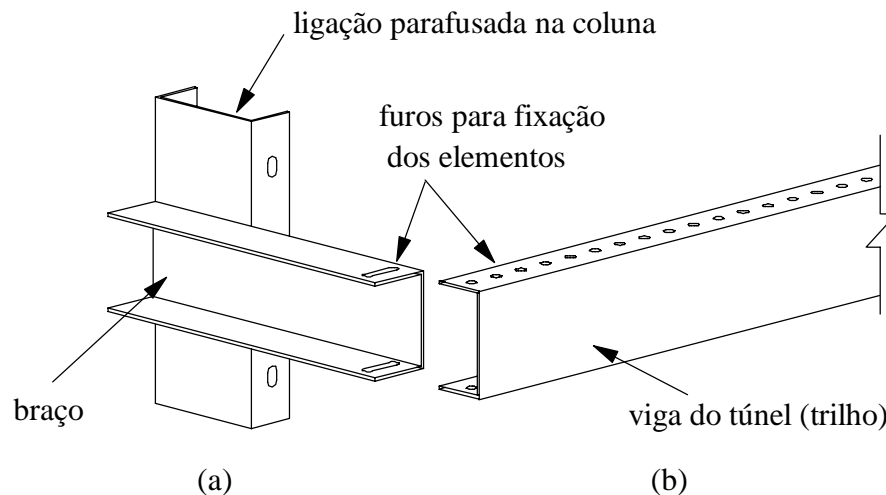


Figura 3.2 – Configuração do braço e da viga do túnel (Águia (1999)); (a) Braço; (b) Viga do túnel.

Os esforços das vigas do túnel e braços são transmitidos para a coluna através da ligação entre o braço e a coluna. Esta ligação pode ser feita de vários modos, sendo comum a utilização dos furos que existem na seção através dos quais as peças são conectadas com

parafusos de cabeça oval, que diminuem o atrito com os paletes e facilitam a operacionalização do sistema.

O outro tipo de viga existente no sistema *Drive-in* é a longarina (Figura 3.1(c) e 3.3). Essa viga é instalada no topo das colunas, fazendo a conexão entre duas colunas adjacentes. Por fazer essa “amarração” das colunas, a longarina é um elemento com a função principal de aumentar a estabilidade da estrutura. A ligação da longarina com a coluna é feita através das garras existentes em sua extremidade que se encaixam aos furos da coluna.

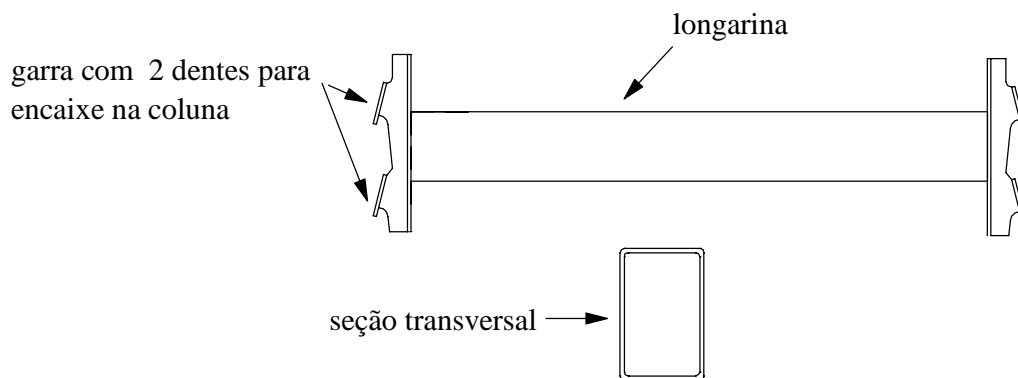


Figura 3.3 – Longarina com ligação de garra com dois dentes (Águia (1999)).

O armazenamento no sistema *Drive-in* é feito de forma que apenas um palete é disposto entre duas colunas da mesma fila, mas sendo vários na profundidade do sistema. A figura 3.4 mostra a configuração básica do armazenamento.

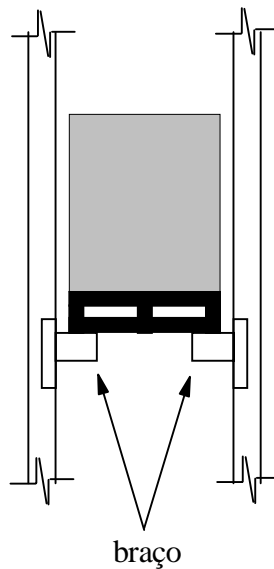


Figura 3.4 – Configuração do armazenamento no sistema *Drive-in*.

### 3.1.2. Colunas

As colunas nos sistemas de armazenagem industrial são normalmente monossimétricas sujeitas a um carregamento axial e a momento fletor sobre os dois eixos. Possuem furos em sua seção com a finalidade de encaixe das vigas em alturas não determinadas a priori pelo fabricante. Sua esbelteza é tal que seu comportamento pode ser influenciado pela flambagem local de placa, distorcional e a global (Davies et al. (1997)).

Os furos nas colunas resultam em uma redistribuição de tensão desconhecida devido às mudanças nas características geométricas ao longo da coluna e conseqüentemente na sua resistência. Não somente o tipo de tensão (compressão, tração, cisalhante), mas também forma, tamanho, localização e número de furos tem uma grande influência no comportamento estrutural dos membros que contém aberturas (Shanmugam e Dhanalakshmi (2001)).

O formato desses furos varia de empresa para empresa, pois cada uma possui seqüências de perfurações de geometria variada. A figura 3.5 ilustra alguns tipos de seções com posicionamento diferenciado dos furos.

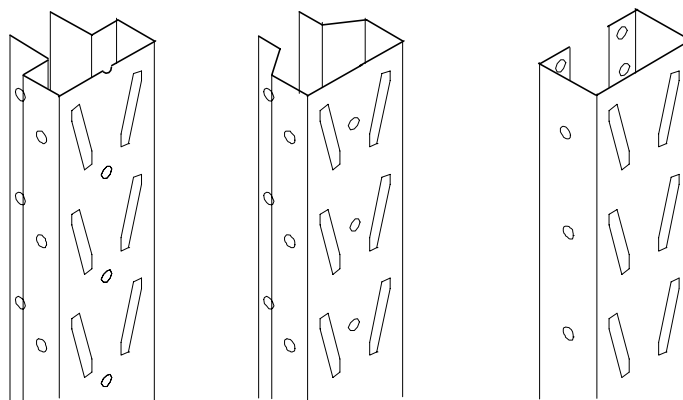


Figura 3.5 – Tipos de colunas de sistemas industriais de armazenagem utilizadas no país.

Shanmugam e Dhanalakshmi (2001) fizeram um estudo para quantificar a influência do tamanho da abertura na capacidade última de colunas curtas perfuradas. Concluíram que a capacidade última de carregamento dessas colunas, com múltiplas aberturas, diminuiu com o aumento do tamanho da abertura. Esta diminuição na resistência é o resultado da perda de rigidez da alma da peça devido às perfurações e a flambagem local da alma. A presença de furos no flange da seção também afeta a resistência.

Os furos foram adicionados às colunas com a função de facilitar a montagem da estrutura. Os furos circulares servem para o encaixe das ligações parafusadas e instalação de placa de base e distanciadores. Os furos de outros formatos são para o encaixe das garras que se localizam nas extremidades das vigas.

Os dois tipos de seções mais utilizadas no país para as colunas nos sistemas de armazenagem industrial são do tipo *rack* ou “garrafa” e seção U enrijecido. A figura 3.6 indica a nomenclatura utilizada para as partes componentes da seção transversal.

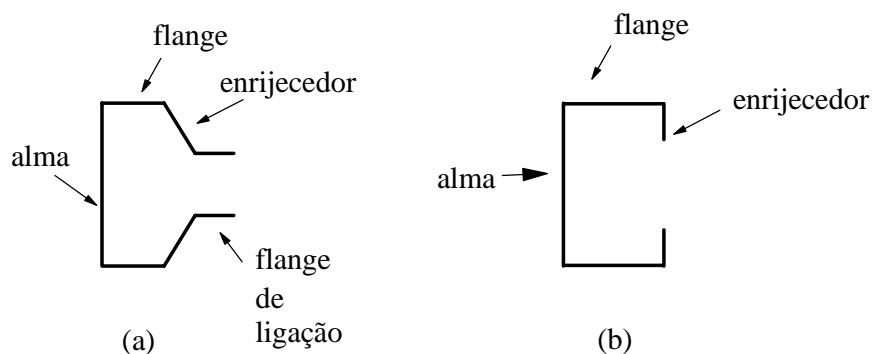


Figura 3.6 – Tipos de seção transversal de colunas: (a) seção tipo *rack* ou “garrafa”;  
(b) seção U enrijecido.

A seção tipo “garrafa” é mais vantajosa do que a seção U enrijecido, pois possui elementos adicionais (flanges de ligação), que facilitam a instalação dos contraventamentos, figura 3.7. Pela ausência de flanges de ligação na seção U enrijecido, é necessário a instalação de cantoneiras adicionais para o posicionamento dos contraventamentos em uma coluna (Figura 3.8).

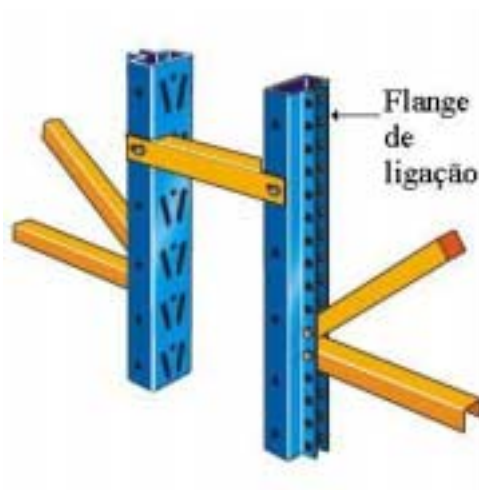


Figura 3.7 – Coluna com seção tipo *rack* ou “garrafa”, com flanges adicionais para conexão dos contraventamentos, (Altamira (2002)).

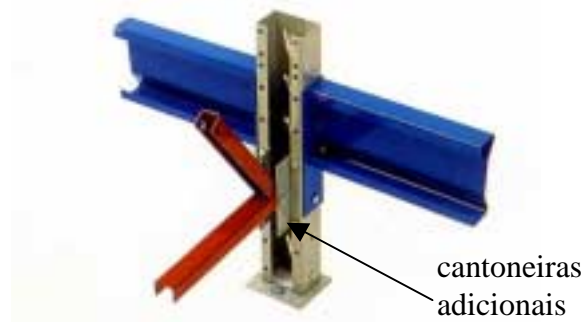


Figura 3.8 – Foto de uma coluna de seção transversal U enrijecido com cantoneiras adicionais para instalação dos contraventamentos, (Isma (2000)).

### 3.1.3. Elementos de contraventamento

Os elementos de contraventamento comumente utilizados são seções do tipo cantoneira ou U enrijecido. A soldagem dos elementos ainda é de uso comum como alternativa de travamento, porém a conexão dos elementos por parafusos tem a vantagem de poder ser feita no próprio local de instalação, o que oferece uma economia de custo e rapidez de montagem (Godley (1991)).

Para garantir a estabilidade da estrutura, os elementos de contraventamento estão localizados em vários locais dos sistemas de armazenagem. No sistema *Porta-pallets* os contraventamentos são posicionados apenas nas faces laterais do sistema. Já no sistema *Drive-through* o contraventamento é posicionado nas faces laterais e no plano horizontal superior (Figura 3.9).

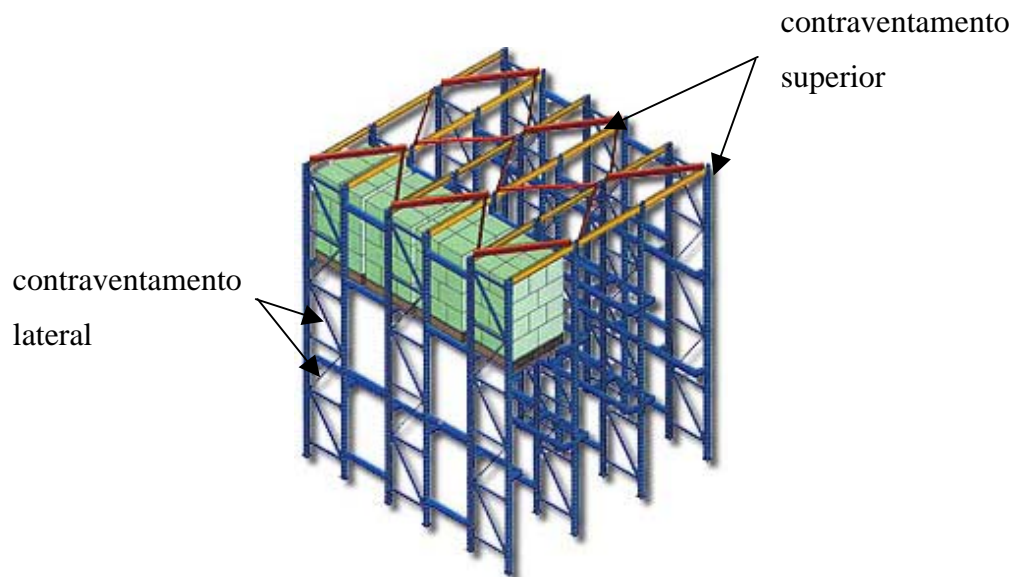


Figura 3.9 – Sistema *Drive-through* com contraventamentos na face lateral e no plano horizontal superior, (Isma (2000)).

No sistema *Drive-in* para aumentar a estabilidade do sistema, além dos planos de contraventamentos mostrados para o *Drive-through*, há um plano de contraventamento no fundo do sistema para aumentar a rigidez da estrutura.

#### 3.1.4. Distanciadores

Os elementos de contraventamentos, citados no item anterior, não são aplicados continuamente entre as colunas. São intercalados de modo que nas colunas que não possuem sistemas de contraventamento entre si sejam utilizados elementos denominados distanciadores (Figura 3.10). A principal função deste elemento é separar as colunas e a sua seção transversal geralmente é do tipo U simples.

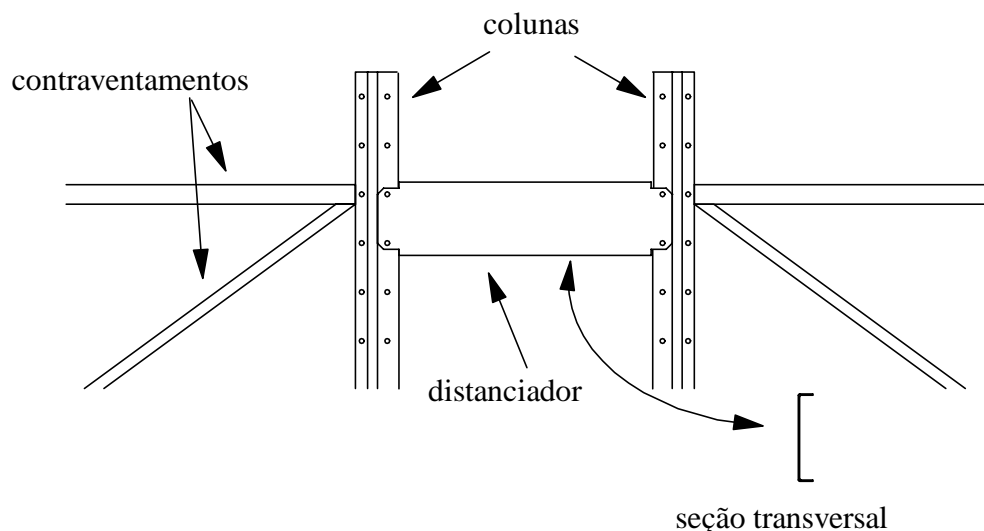


Figura 3.10 – Detalhe da posição e seção transversal de distanciadores na face lateral do sistema, (Águia (1999)).

### 3.1.5. Placas de Base

A ligação entre as colunas e o piso é feita através das placas de base. As colunas são parafusadas em uma chapa fina, chamada placa de base, com seção representada na figura 3.11. Os parafusos dessa ligação, além de fixarem a coluna ao piso, garantem a resistência a impactos verticais ascendentes provenientes dos equipamentos de armazenagem. A configuração dessa ligação permite que se considere a ligação como rotulada na face lateral e na face frontal a ligação é considerada com uma certa rigidez devido à disposição dos parafusos.

A ligação entre a coluna e a placa de base é de fundamental importância em estruturas altas e principalmente em sistemas tipo *Drive-in* e *Drive-through*, pois nestes a estabilização é garantida pelo pórtico considerando a rigidez da coluna, da longarina superior e da fixação da placa de base.

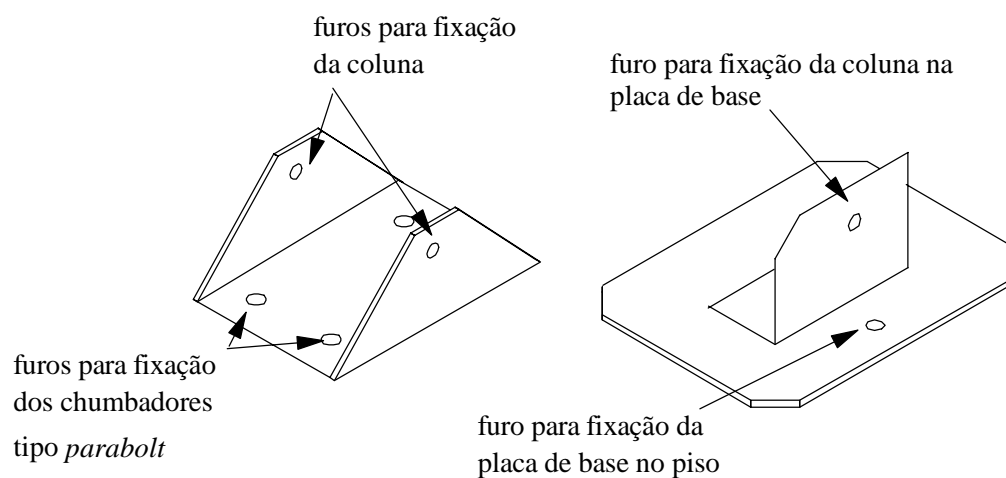


Figura 3.11 – Tipos de placas de base de sistemas de armazenagem.

Para evitar impactos na placa de base, provenientes dos equipamentos no ato de armazenagem, podem ser instalados dispositivos que envolvam a coluna reduzindo-se a possibilidade de acidentes e absorvendo os impactos (Figura 3.12).

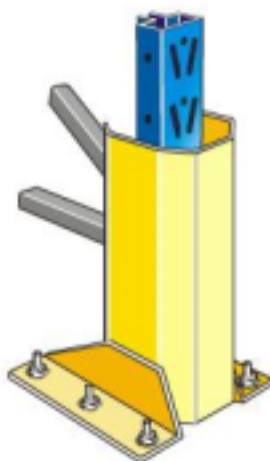


Figura 3.12 – Protetor de colunas contra impactos na placa de base (Altamira (2002)).

### 3.1.6. Ligações

Nos sistemas de armazenagem industrial há ligações rotuladas, provenientes do sistema de contraventamentos e as ligações predominantes consideradas semi-rígidas, que correspondem as demais ligações existentes. As ligações semi-rígidas podem ser feitas por meio de parafusos que se prendem na alma ou flanges da coluna (Figura 3.13), ou por meio de encaixe entre as garras e os furos na alma da coluna sem a utilização de parafusos, (Figura 3.14). Nas ligações de encaixe é necessária a colocação de um pino de segurança para resistir ao esforço cortante proveniente de um possível impacto ascendente provocado pelas empilhadeiras ou outros equipamentos. Estes pinos são instalados de modo a obter uma fixação adicional da ligação à coluna (Figura 3.14).

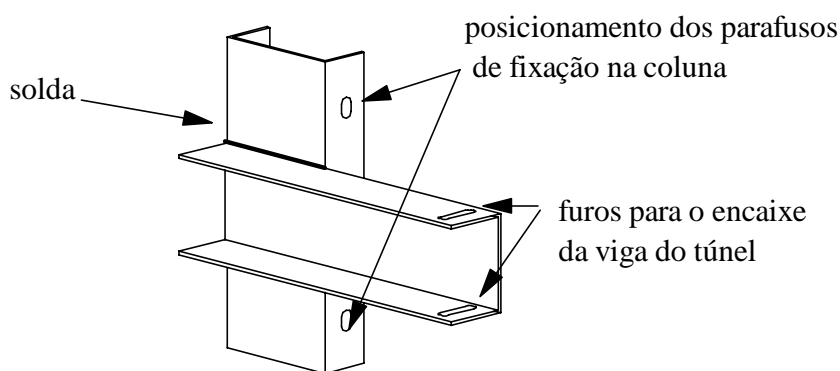


Figura 3.13 – Ligação parafusada com fixação no flange da coluna.

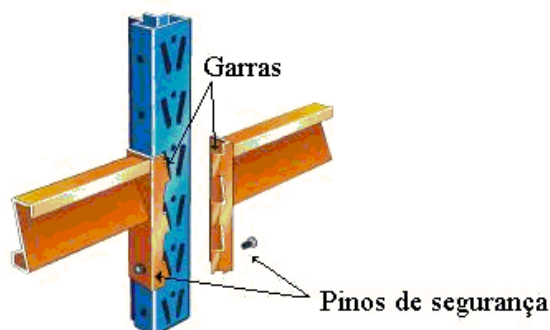


Figura 3.14 – Ligação com garras dentadas com pino de segurança, (Altamira (2002)).

### 3.2. Estabilidade

Para satisfazer as exigências de mercado, os sistemas de armazenagem industrial têm que garantir a utilização do espaço de forma eficiente e segura. Esta exigência e o aumento da experiência no uso dos *racks* levaram estes a serem construídos cada vez mais altos e com peças mais leves, logo aumentando sua esbeltez. A figura 3.15 apresenta uma estrutura em construção do tipo *Drive-in* que possui 32 m de altura, 100 m de comprimento por 35 m de largura que ilustra bem como essas estruturas podem ser altas e esbeltas.



Figura 3.15 – Foto de uma estrutura do tipo *Drive-in*, (Andrade (2003)).

Como resultado deste aumento na esbeltez, a estabilidade da estrutura tornou-se uma característica crítica no projeto e o efeito  $P\Delta$ , relatando a interação das forças axiais  $P$  com seus correspondentes deslocamentos laterais  $\Delta$  necessitou ser considerado (Godley et al. (2000)).

A estabilidade nos sistemas de armazenagem do tipo *Drive-in* é garantida por sistemas de contraventamentos e pela rigidez das ligações longarina-coluna e coluna-placa de base na direção longitudinal (Baldassino e Bernuzzi (2000)).

Na direção em que o *rack* não é contraventado as ligações por encaixe são a única fonte de estabilidade, impedindo que a estrutura tenha um grande deslocamento. O grau de deslocabilidade da estrutura determina a sua resistência e estabilidade (Markazi et al. (2001)).

Nos sistemas de armazenagem industrial, a direção longitudinal é a direção perpendicular à passagem da empilhadeira e a direção transversal é a direção paralela à passagem da empilhadeira (Figura 3.16).

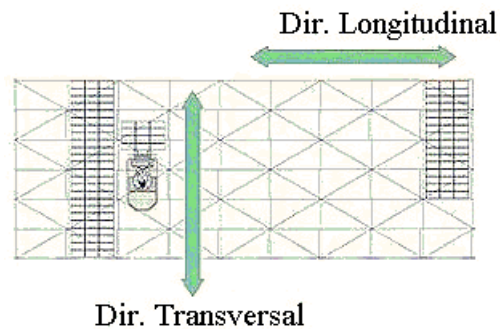


Figura 3.16 – Indicação das direções no sistema *Drive-in*.

A estabilidade no sistema *Drive-in* é grandemente afetada pela falta de travamento na direção longitudinal. Nesta direção não é possível a utilização dos elementos de contraventamento, pois é através dela que a empilhadeira tem acesso à profundidade da estrutura. Logo, há sistemas de contraventamentos nas laterais, no fundo e na parte superior das colunas (Figura 3.17, 3.18 e 3.19). O contraventamento ao longo da direção longitudinal só é aceitável nos fundos do *rack*, pois o carregamento do sistema *Drive-in* é feito apenas por um lado da estrutura, logo o fundo da estrutura pode ser contraventado. Com a impossibilidade de contraventar mais a direção longitudinal, a estabilidade nesta direção é dada basicamente pela rigidez da ligação da longarina à coluna e pela rigidez a rotação da placa de base, e é suplementada pelos efeitos estabilizantes do sistema de contraventamento disposto no fundo do *rack*. Este efeito é transmitido para as colunas

frontais através dos contraventamentos dispostos nos topos das colunas. Porém, em *racks* profundos, os efeitos estabilizantes transmitidos diminuem com a distância e sua contribuição é diminuída na parte frontal do *rack* (Godley (1991)).

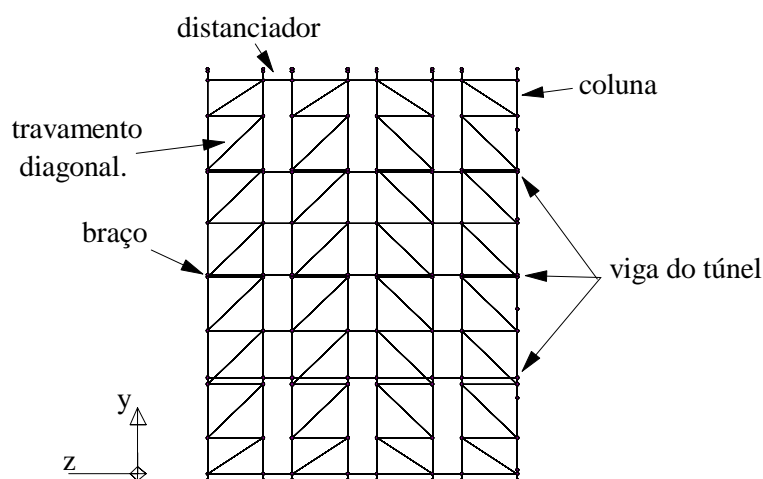


Figura 3.17 – Vista da face lateral do sistema de contraventamentos do *Drive-in* com a indicação de seus componentes.

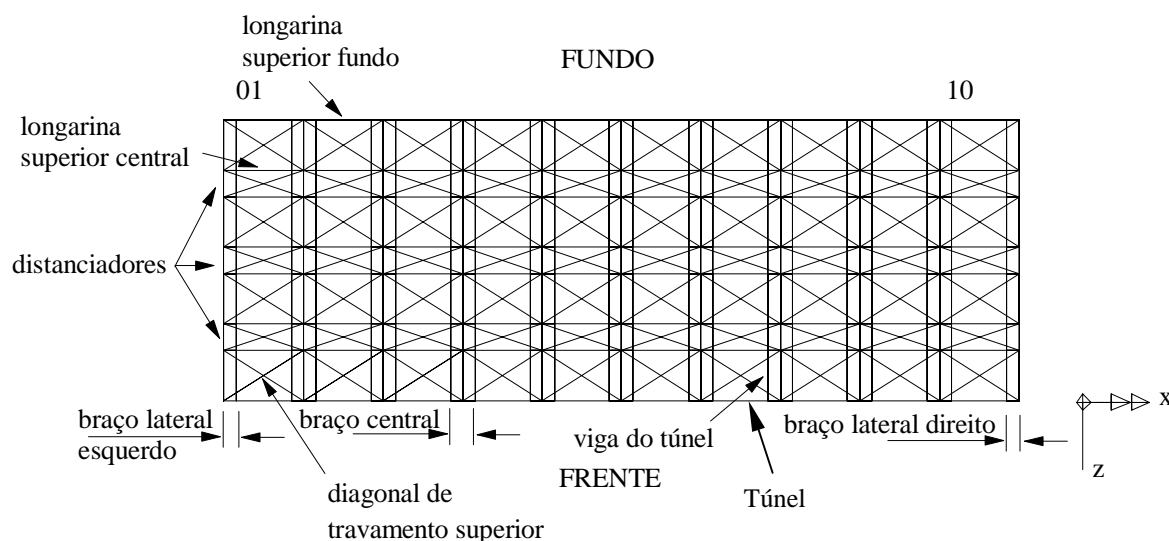


Figura 3.18 – Vista superior do sistema mostrando os contraventamentos dispostos no topo das colunas do *Drive-in* com a indicação de seus componentes.

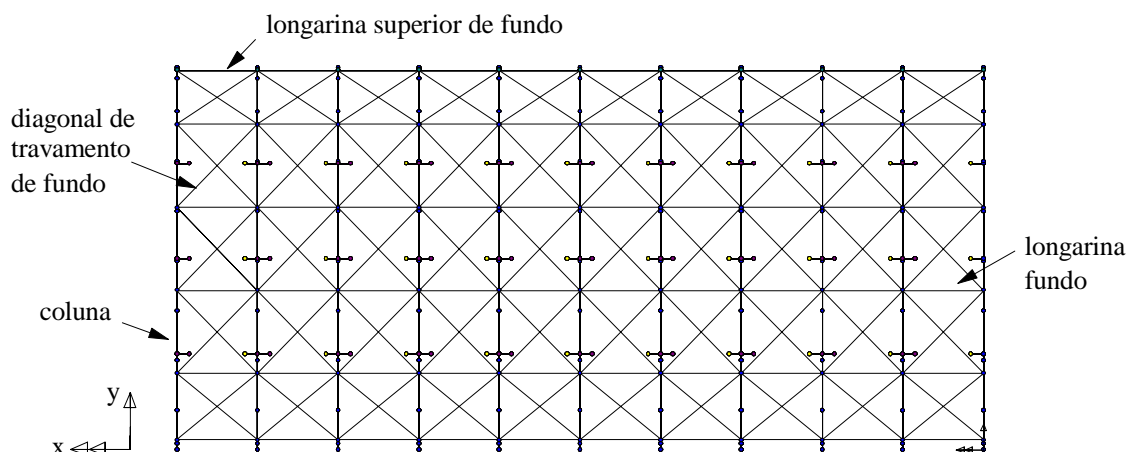


Figura 3.19 – Vista do plano de fundo do sistema de contraventamento do *Drive-in* com a indicação de seus componentes.

Como as colunas estão submetidas a várias condições de carregamento devido aos impactos provenientes do ato de armazenagem, aos esforços adicionais devido à falta de prumo, e a transferência de momentos e reações devido aos braços nelas conectados, a determinação do grau de conectividade destas colunas aos pontos de sua fixação é muito importante. A ligação da coluna com a placa de base é feita da seguinte forma: na direção transversal, que possui contraventamentos, a ligação é feita de forma que a rotação é livre, sendo assim funcionando como rótula; na direção longitudinal, a ligação é feita com parafusos, impedindo parcialmente a rotação e conferindo uma rigidez maior à estrutura. A ligação entre a coluna e a longarina é realizada através de encaixe, oferecendo uma certa rigidez. Deste modo a determinação dessas rigidezes é de extrema importância.

### 3.3. Imperfeições

As imperfeições geométricas de transporte e fabricação juntamente com as folgas nas ligações causam uma estrutura final imperfeita, fora do prumo. Essa imperfeição acarreta uma diminuição no nível de carga a ser suportada pela estrutura uma vez que aumenta os efeitos de segunda ordem (Baldassino e Bernuzzi (2000)).

O RMI (1997) limita o valor da imperfeição da estrutura em um ângulo de 0,004 rad. Para quantificar o efeito da imperfeição na estabilidade estrutural, o RMI especifica a aplicação de cargas horizontais separadamente em cada uma das direções no valor de 1,5% da carga armazenada mais o peso próprio total da estrutura, porém não faz especificação quanto ao modo de distribuição dessas cargas na estrutura.

A norma australiana de *rack* AS 4084 (1993) apresenta uma equação para o cálculo do ângulo de imperfeição  $\theta$ . Esta equação é a seguinte:

$$\theta = \frac{1}{2} \psi_0 \left( 1 + \frac{1}{n} \right) + \phi_1 \quad (3.1)$$

onde:

$\psi_0$  = ângulo em rad da imperfeição máxima fornecido pela AS 4084;

$n$  = número de baias que são interconectadas;

$\phi_1$  = rotação angular em rad formada pela folga da ligação, determinada por meio de ensaio experimental.

As forças horizontais aplicadas à estrutura para simular a rotação  $\theta$  sofrida, são aplicadas em cada nível de carregamento. Essas forças correspondem à somatória das cargas aplicadas no referente nível vezes o ângulo  $\theta$ . A equação 3.2 apresenta o cálculo dessas forças.

$$F_{Hi} = \theta \sum W_{ij} \quad (3.2)$$

onde  $\theta$  corresponde ao ângulo de inclinação e  $W$  as cargas concentradas no nível  $i$  na coluna  $j$  devido ao peso próprio e às cargas dos paletes.

A AS 4084 determina o ponto de aplicação dessas forças horizontais para uma estrutura do tipo *Porta-pallets* (Figura 3.20). A figura 3.20 (a) representa o esquema de

imposição das forças para representar a imperfeição na direção transversal, ou seja no plano YZ e a figura 3.20 (b) representa o esquema de disposição das cargas para representar a imperfeição na direção longitudinal, plano XY. Essas forças devem ser impostas na estrutura juntamente com os demais carregamentos, mas separadamente em cada direção.

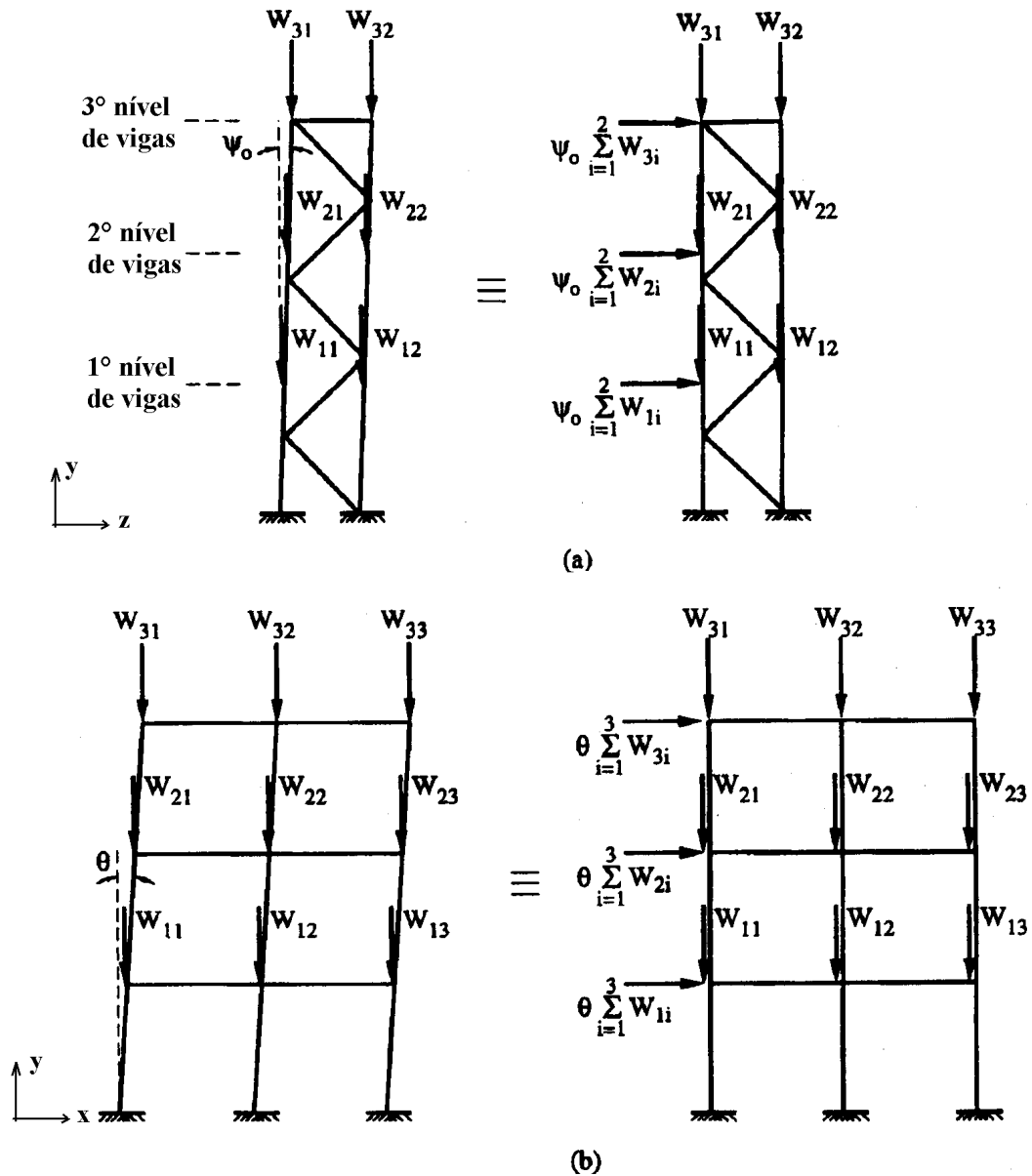


Figura 3.20 – Pontos de aplicação das forças horizontais segundo a norma australiana de rack AS 4084; (a) equivalência das forças para representar a imperfeição no plano ZY; (b) equivalência das forças para representar a imperfeição no plano XY.

No lado esquerdo da figura 3.20 estão as estruturas com grau de imperfeição e no lado direito as correspondentes estruturas com as forças horizontais representativas dessa imperfeição. Nota-se que as forças aplicadas na direção transversal (Figura 3.20 (a)) são calculadas considerando o ângulo  $\psi_0$  em rad da imperfeição máxima fornecida pela AS 4084. Na direção do plano XY, (Figura 3.20 (b)), as forças horizontais impostas são calculadas considerando o ângulo  $\theta$  encontrado de acordo com a equação 3.1.

Hancock et al. (2001) baseados no RMI adotaram como ângulo de inclinação da estrutura um valor fixo de 0,015 rad em ambas as direções. Logo a equação 3.2 foi simplificada para:

$$F_{Hi} = 0,015 \Sigma W_{ij} \quad (3.3)$$

onde W corresponde às cargas concentradas no nível i na coluna j devido ao peso próprio e as cargas dos paletes.

Esta alteração na determinação da forças horizontais é uma forma de simplificação, já que a determinação destas forças através da equação fornecida pela AS 4084 é trabalhosa, uma vez que necessita do parâmetro  $\phi_1$  que representa a rotação angular formada pela folga da ligação determinada por ensaio.

O valor de  $\theta$  determinado como 0,015 rad está exatamente de acordo com o RMI, que especifica a carga horizontal como sendo 1,5% da carga aplicada mais o peso próprio total da estrutura. Porém o RMI não especifica a distribuição dessa carga pela estrutura. Ressalta-se ainda que estas considerações são válidas para o sistema *Porta-pallets*.

Baldassino e Bernuzzi (2000) fizeram um estudo comparativo para o sistema *Porta-pallets* sob a influência de um valor de imperfeição fixo  $\phi_s = 1/200$  rad e sob um valor relacionado com a geometria da estrutura  $\phi_{imp}$ , dado pela equação 3.4 determinada pela FEM (1997):

$$\phi_{imp} = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{n_c}} \sqrt{\frac{1}{5} + \frac{1}{n_s}} (2\phi_s + \phi_1) \quad (3.4)$$

onde:

$n_c$  = número de colunas na direção longitudinal, ou número de colunas na direção transversal, dependendo em qual direção está sendo aplicada a carga;

$n_s$  = número de níveis de viga;

$\phi_s$  = máximo valor especificado de imperfeição ( $\phi_s = 1/200$  rad);

$\phi_1$  = rotação devida à folga na ligação viga-coluna determinada experimentalmente.

Os resultados encontrados demonstraram que o ângulo de imperfeição variável  $\phi_{imp}$  fornecia valores maiores do que o valor de  $\phi_s$ . Como consequência, a estrutura sob o efeito de  $\phi_{imp}$  suportava um valor de carga inferior ao da estrutura sob o valor de  $\phi_s$ . A desvantagem do uso da equação 3.4 está na determinação de  $\phi_1$ . Este é um valor obtido experimentalmente, o que demanda tempo e custo para a sua determinação.

Neste trabalho, devido a falta de especificações do RMI (1997) quanto ao modo de aplicação das forças horizontais como forma de representar a falta de prumo na estrutura, essas forças serão calculadas de acordo com Hancock et al. (2001) e aplicadas segundo a norma australiana de *rack* AS 4084 (1993).

## **Prescrições de Norma**

Os sistemas de armazenagem industrial se assemelham às estruturas de aço tradicionais, mas possuem grandes diferenças na geometria dos membros e nos sistemas de ligações (Bernuzzi e Castiglioni (2001)). Outro ponto importante é que a percentagem da carga proveniente do peso próprio é pequena em relação ao carregamento total e há ainda a carga de armazenagem, que não existe nas demais estruturas (RMI (1997)). Essas características fazem com que, no dimensionamento haja considerações adicionais que não são consideradas nas normas existentes de perfis de aço formados a frio (Oliveira (2000)). Como já foi citado anteriormente, cada país tem criado a sua própria prescrição de norma para o dimensionamento dos sistemas de armazenagem industrial: nos Estados Unidos existe o *Rack Manufacturers Institute* – (RMI (1997)), na Inglaterra, é utilizada a prescrição desenvolvida pela *Storage Equipment Manufacturers' Association* – (SEMA (1980)), na Europa existe a prescrição da *Federation Européenne de la Manutention* – (FEM (1997)), na Austrália os aspectos do projeto estrutural são descritos pela *Australian Steel Storage Racking Standard* – (AS 4084 (1993)) e no Brasil há a Associação Brasileira de Movimentação e Logística – ABML que recentemente publicou uma interpretação do texto desenvolvido pelo RMI (1997).

Serão apresentadas a seguir as prescrições do RMI e algumas considerações feitas pela ABML (2001) que diferenciam das especificações do RMI. Porém, neste trabalho serão utilizadas apenas as prescrições do RMI.

#### 4.1. Especificações do RMI

As especificações do RMI abrangem os sistemas de armazenagem industrial com características semelhantes aos *Porta-pallets*, ou seja, que possuem vigas na direção longitudinal ligando uma coluna à outra. Nem todas dessas especificações são aplicáveis aos *racks* do tipo *Drive-in*, *Drive-through*, *Cantilever* etc. A diferença entre estes tipos de estruturas está basicamente na direção longitudinal, já que os *racks* do tipo *Drive-in*, não possuem vigas interligando as colunas nos níveis intermediários, mas apenas pequenas vigas em balanço. Em consequência disso, a determinação do comprimento efetivo para as colunas na direção longitudinal não pode ser feita de acordo com o RMI, pois as colunas possuem ponto de fixação apenas na base e no topo, diferente do que ocorre no *Porta-pallets*. Os sistemas do tipo *Drive-in* e *Drive-through* não são abrangidos por nenhuma especificação de norma, portanto, neste trabalho, certas prescrições do RMI, que se enquadram para estes sistemas, são utilizadas para fazer a análise da estrutura como um todo.

##### 4.1.1. Levantamento das cargas

As cargas utilizadas no cálculo das estruturas de armazenagem industrial são:

- Peso próprio - (DL);
- Sobrecarga - (LL);
- Carga de armazenagem - (PL);
- Cargas Verticais de Impacto (Imp)

Notou-se a necessidade de considerar cargas verticais de impacto, uma vez que no ato de colocar e retirar os produtos armazenados, o mecanismo de armazenamento pode dar um impacto na estrutura. Isto é levado em consideração através de uma carga concentrada de 25% da reação da viga do túnel carregada adicionada à extremidade do braço;

- Forças Horizontais ( $F_x$  e  $F_z$ )

As conexões dos braços com as colunas e dos elementos de contraventamento com as colunas são projetadas para resistir a 1,5% da combinação de carga do peso próprio e da combinação da carga de armazenagem. Estas forças horizontais incluem o efeito da estrutura estar fora do prumo. Estas forças devem ser aplicadas simultaneamente ao carregamento vertical, mas separadamente em cada uma das direções do *rack*, transversal e longitudinal;

- Cargas de vento - (WL)

Nesta análise não há necessidade de levar em consideração as cargas devido ao vento, pois se trata de um sistema *Drive-in* específico para ambiente interno, ou seja, supõe-se que o vento não irá incidir diretamente sobre o sistema;

- Cargas Sísmicas - (EL)

O local de implantação do sistema considerado é, a princípio, o Brasil, portanto, não serão consideradas cargas sísmicas;

- Cargas de chuva - (RL)

Como já foi dito, o sistema *Drive-in* será implantado em ambiente fechado, ao abrigo de chuva;

- Cargas de neve - (SL)

O sistema *Drive-in* será implantado em ambiente fechado.

#### **4.1.2. Combinação das cargas pelo Método dos Estados Limites (LRFD)**

O RMI possui dois critérios de combinação das cargas, pelo Método dos Estados Limites (*Load and Resistance Factor Design* - LRFD) ou pelo Método das Tensões Admissíveis (*Allowable Stress Design* – ASD). Neste trabalho será considerado o Método dos Estados Limites, LRFD, de uso mais geral nos dias atuais.

As combinações se resumiram a três situações, pois SL, EL, RL e WL são nulas. Para a análise da estrutura como um todo, utilizam-se estas combinações:

1 –  $1,4DL + LL + 1,2PL$  (estado limite – Peso Próprio);

2 –  $1,2DL + 1,6LL + 1,4PL$  (estado limite – Sobrecarga/ Carga de armazenagem).

Para o dimensionamento de vigas e suas conexões, utiliza-se a seguinte combinação:

$$3 - 1,2DL + 1,6LL + 1,4PL + 1,4Imp.$$

As forças horizontais  $F_x$  e  $F_z$  são aplicadas separadamente em cada direção, para todos os tipos de combinação com fator de combinação igual a 1.

#### 4.1.3. Dimensionamento das colunas

O comportamento das colunas perfuradas é afetado pelos diferentes modos de flambagem (local, distorcional e global), bem como pela interação entre estes modos (Baldassino e Bernuzzi (2000)), (Freitas et al. (2001)).

Os efeitos das perfurações na capacidade de carga dos membros comprimidos são levados em consideração através de modificações de algumas definições do AISI (1996). Os membros submetidos à compressão terão sua capacidade de carga dada por:

$$P_n = A_e F_n \quad (4.1)$$

onde:

$P_n$  = carga nominal axial;

$A_e$  = área efetiva da seção transversal da coluna;

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

A determinação de  $A_e$  da seção com furos é feita através da seguinte equação 4.2 (Peköz (1987)):

$$A_e = \left[ 1 - (1 - Q) \left( \frac{F_n}{f_{ya}} \right)^Q \right] A_{net \min} \quad (4.2)$$

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 fator redutor de forma  $Q$  é obtido através do ensaio da coluna curta para elementos perfurados. Sendo 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 ( $A_{anetmin}$ ). O valor final será igual à média dos valores medidos nos protótipos das seções ensaiadas.

$$Q = \frac{P_{ua}}{f_{ya} A_{anet\ min}} \quad (4.3)$$

onde:

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

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

Para uma série de colunas com espessuras diferentes, a coluna com seção de menor espessura e a de seção com maior espessura devem ser ensaiadas. Para qualquer espessura intermediária, o valor de  $Q$  é determinado por interpolação linear a partir dos dados obtidos dos ensaios das seções de menor e maior espessura como é mostrado na equação 4.4:

$$Q = Q_{\min} + \frac{(Q_{\max} - Q_{\min})(t - t_{\min})}{(t_{\max} - t_{\min})} \quad (4.4)$$

onde:

$Q_{\min}$  = fator Q determinado pelo ensaio de coluna curta, segundo a equação 4.3 com espessura mínima ( $t_{\min}$ );

$Q_{\max}$  = fator Q determinado pelo ensaio de coluna curta, segundo a equação 4.3 com espessura máxima ( $t_{\max}$ );

t = espessura da seção que se quer determinar o Q.

Este método só é adequado se a diferença de tensão de escoamento dos corpos de prova de menor e maior espessura não exceder 25%.

Pelos cálculos acima, o fator Q encontrado poderá ser maior do que 1. Porém este resultado não tem significado físico. Isto ocorre devido os efeitos de conformação do perfil e nestes casos o valor adotado deve ser unitário.

No ensaio da coluna curta, para que os efeitos da flambagem global não interfiram na determinação do parâmetro Q, é necessário determinar o comprimento adequado da peça a ser ensaiada. O comprimento deve ser suficientemente curto para eliminar os efeitos da flambagem global, e suficientemente longo, para minimizar os efeitos de extremidade na região de aplicação do carregamento.

A AISI recomenda que o comprimento da coluna não exceda 20 vezes o raio de giração mínimo. Para colunas perfuradas, recomenda-se para a escolha de seu comprimento a utilização de dois parâmetros: a distância de eixo das perfurações ( $L_p$ ), e a maior largura da seção transversal bruta (W), como indicado na figura 4.1.

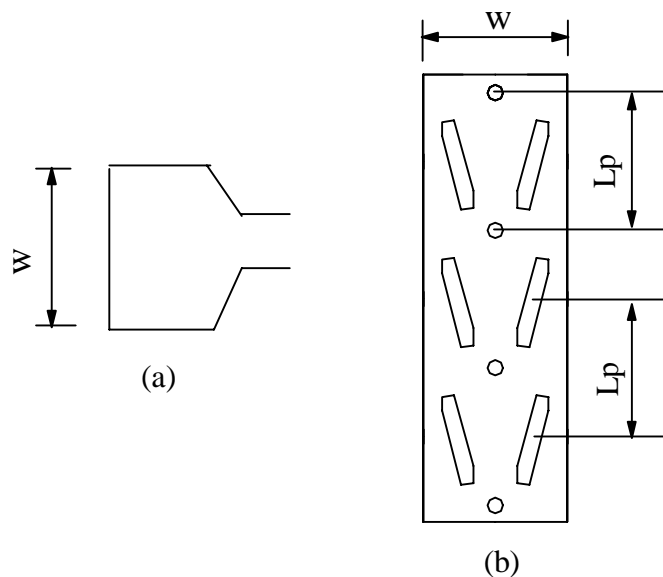


Figura 4.1 – Identificação da maior largura da seção transversal bruta ( $W$ ) e da distância de eixo a eixo das perfurações, ( $L_p$ ): (a) Seção transversal tipo *rack* com a identificação de  $W$ ; (b) Vista frontal da coluna com as dimensões de  $W$  e  $L_p$ .

Na figura 4.2 estão apresentados diversos tipos de perfurações com os comprimentos mínimos para o ensaio da coluna curta. Para colunas onde  $L_p \leq W$  (Figura 4.2 (b) e (g)) ou para caso que  $L_p > W$  (Figura 4.2 (c)) será adotado o comprimento da coluna curta ( $L$ ), maior ou igual a  $3W$ . Para colunas da figura 4.2 (d), (e), (f) e (h), com  $W < L_p$ , adota-se  $L \geq 3L_p$ . Para o caso especial, em que as extremidades da coluna possuem influência dos furos, figura 4.2 (i), é necessária a fabricação de uma coluna com seção transversal sem furos nas extremidades, como apresentado na figura 4.2 (j).

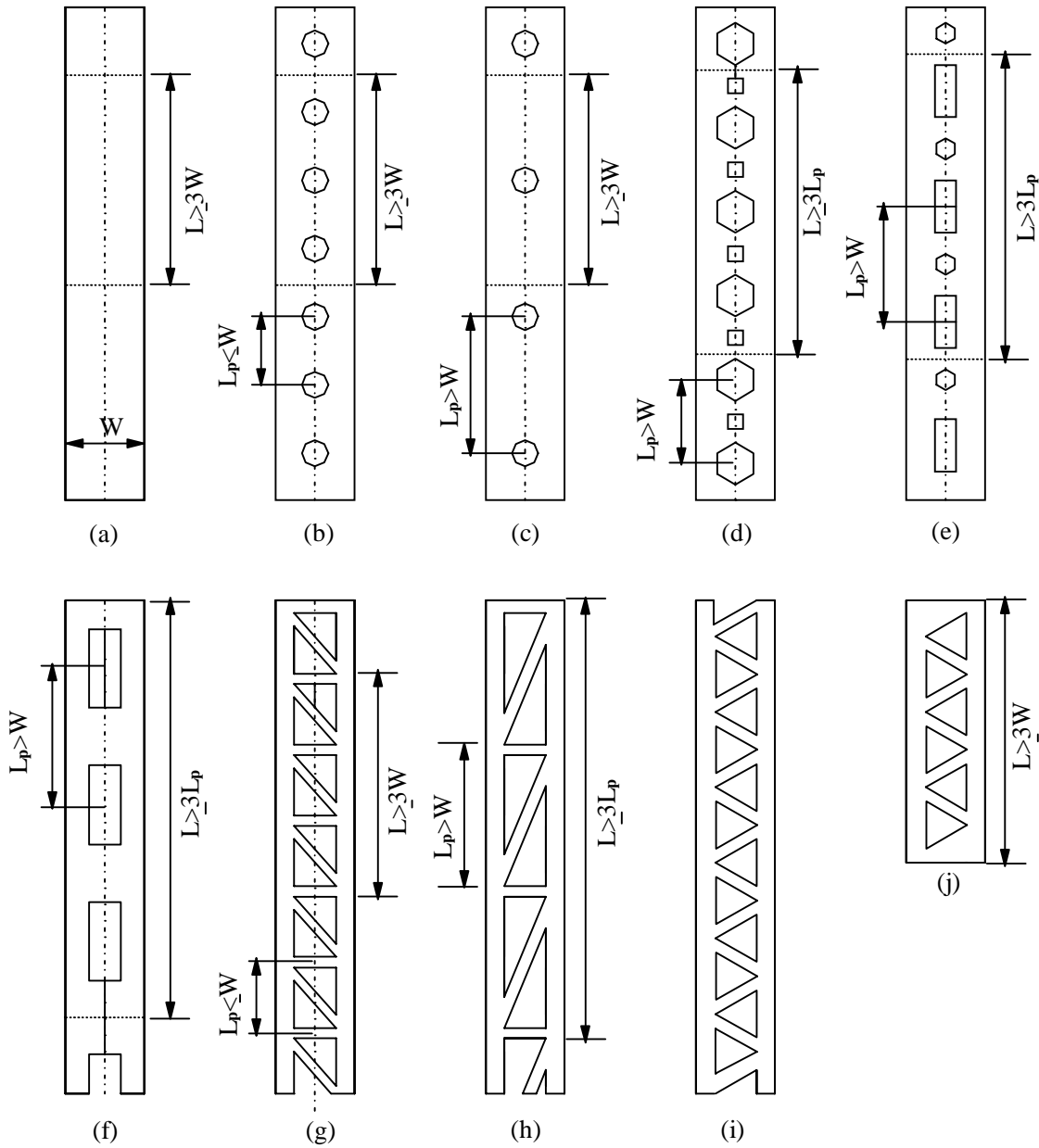


Figura 4.2 – Tipos de perfurações com a indicação do comprimento mínimo da coluna curta, (AISI (1996)).

A configuração do ensaio da coluna curta submetida à compressão utiliza uma coluna sob compressão centrada com placas na extremidade para a distribuição das tensões. (Figura 4.3). São necessários, no mínimo, três ensaios de coluna curta e no mínimo 2

ensaios de caracterização do aço. Os incrementos de carga não poderão exceder 10% da carga última estimada, nem a tensão de 21 MPa, aplicada na seção transversal, por minuto.

Este ensaio foi executado anteriormente por Oliveira (2000), utilizando peças fornecidas pela Empresa Águia Sistemas de Armazenagem, e encontrado um valor de  $Q = 0.910$ .

O esquema de montagem utilizado no ensaio está representado na figura 4.3. 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 4.4, fazendo-se coincidir o centro da placa com a posição do  $CG_{\min}$  da seção transversal.

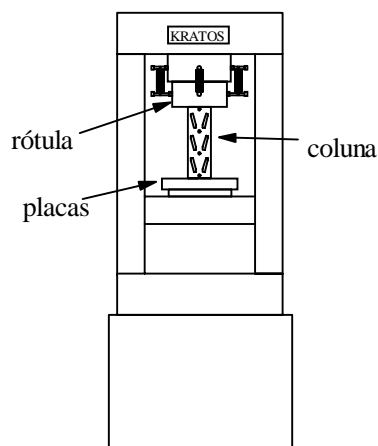


Figura 4.3 – Esquema geral de montagem do ensaio de coluna curta, posicionada na prensa hidráulica KRATOS.

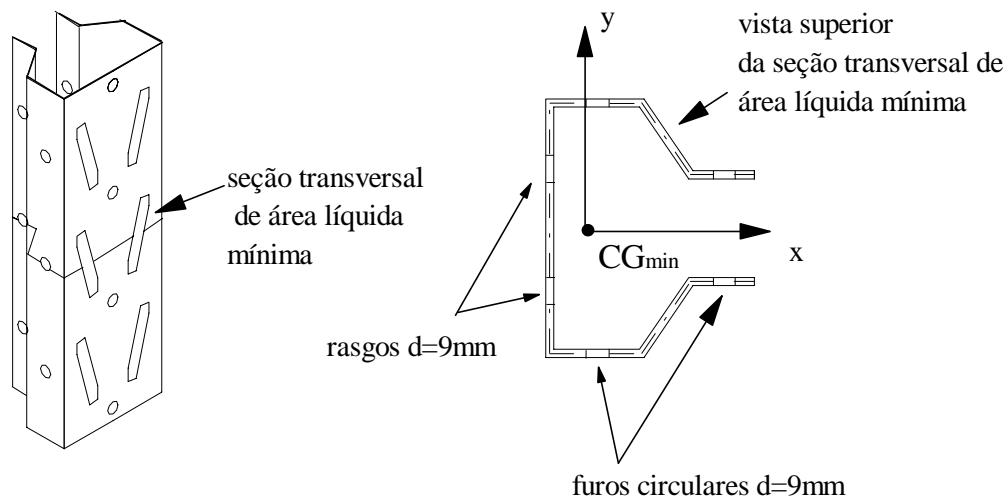


Figura 4.4 – Seção transversal considerando a área líquida mínima com a indicação da posição do CG<sub>mín</sub>.

Para os elementos com perfurações submetidos a flexão, o RMI sugere alterações no procedimento adotado pelo AISI. Essas alterações são baseadas na substituição das propriedades da seção transversal bruta pelas propriedades da seção transversal considerando a área efetiva líquida mínima. A influência dos furos é levada em consideração através do fator Q. A utilização desse procedimento é conservadora devido ao gradiente de tensão na alma da seção transversal, onde a contribuição dos esforços de tração não é levada em consideração na obtenção do fator Q, que considera uma redução de toda a seção transversal pela flambagem local. O gradiente de tensão é considerado com a metade da alma sob os esforços de compressão e a outra metade sob esforços de tração. Para a região comprimida, tem-se um fator redutor à flexão, igual a  $0,5 + Q/2$ . Assim tem-se pela equação 4.5 que o módulo elástico da fibra mais extrema comprimida é igual ao produto entre o módulo elástico da área líquida mínima efetiva pelo fator redutor à flexão.

$$W_e = W_{net} \left( 0,5 + \frac{Q}{2} \right) \quad (4.5)$$

onde:

$W_e$  = módulo elástico efetivo da fibra comprimida mais extrema;

$W_{net}$  = módulo elástico da seção transversal da coluna, considerando a área líquida mínima para a fibra comprimida extrema.

O outro termo que sofre alteração para considerar a influência dos furos é o módulo elástico da seção efetiva. Este utiliza a área líquida mínima para uma tensão de flambagem lateral igual à  $M_c/W_f$  da seção transversal bruta. Da mesma forma que  $W_e$ , é utilizado um fator redutor à flexão, multiplicando-o pelo módulo elástico efetivo da área líquida mínima, como apresentado na equação 4.6.

$$W_c = W_{net} \left[ \frac{1-Q}{2} \left( \frac{M_c/W_f}{f_y} \right) \right] \quad (4.6)$$

onde:

$W_c$  = módulo elástico da seção efetiva considerando a área líquida mínima para a fibra comprimida extrema;

$M_c$  = momento elástico crítico;

$W_f$  = módulo elástico da seção transversal de área bruta para a fibra comprimida extrema;

$f_y$  = tensão de escoamento do aço.

Para o cálculo do momento elástico crítico e das tensões de flambagem o RMI recomenda que as propriedades geométricas sejam baseadas nas dimensões da seção transversal bruta, considerando-se os cantos arredondados. Já nos cálculos da constante de torção de *Saint Venant* ( $J$ ), do parâmetro usado para determinação do momento crítico elástico, do raio de giração polar ( $r_0$ ) e da constante de empenamento à torção ( $C_w$ ), os cantos são considerados retos.

A reserva de capacidade inelástica na flexão para elementos perfurados necessita de estudos mais avançados para ser considerada, portanto o RMI não a inclui em suas prescrições.

#### 4.1.4. Comportamento das ligações

Para quantificar o valor da rigidez das ligações semi-rígidas utilizadas nos sistemas de armazenagem industrial o RMI recomenda o ensaio da viga em balanço (*Cantilever test*) indicando as dimensões, a aplicação de carga, e metodologia de ensaio (Figura 4.5).

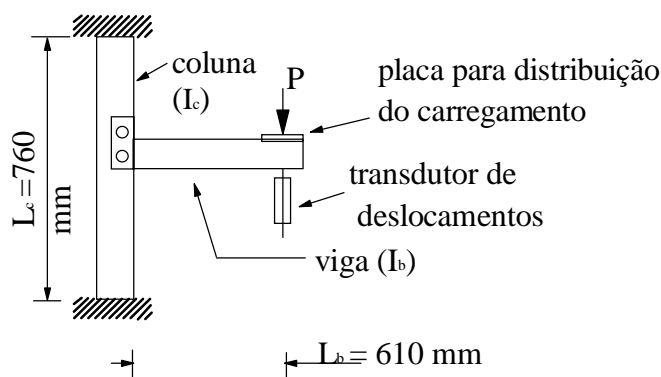


Figura 4.5 – Esquema do ensaio da viga em balanço (*Cantilever test*) segundo as prescrições do RMI.

onde:

$L_c$  = comprimento da coluna;

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

$L_b$  = comprimento do braço de alavanca da viga;

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

A relação entre o momento e a rotação angular em ligações de encaixe dos *racks* é não linear. A rigidez (F) da ligação pode ser calculada através da próxima equação:

$$F = \frac{R.F.}{\frac{\delta_{0,85}}{P_{0,85}} - \frac{L_c}{16EI_c} - \frac{L_b}{3EI_b}} \quad (4.8)$$

onde:

$F$  = rigidez da ligação (kNm/rad);

$P_{0,85}$  = 0,85 vezes o carregamento último;

$\delta_{0,85}$  = deslocamento na extremidade livre da viga, onde é posicionado o carregamento e correspondente ao valor de  $P_{0,85}$ ;

$L_c$  = comprimento da coluna;

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

$L_b$  = comprimento do braço de alavanca da viga;

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

$R.F.$  = fator de minoração que considera a dispersão dos resultados e é igual a:

$R.F. = 1$  (dimensionamento das colunas);

$R.F. = 2/3$  (dimensionamento das vigas).

As variáveis da equação 4.8 estão relacionadas com o carregamento ( $P_{0,85}$ ) e o deslocamento ( $\delta_{0,85}$ ). Estes valores são obtidos a partir da curva carga-deslocamento com a identificação do par ordenado ( $\delta_{0,85}$  ;  $P_{0,85}$ ), ilustrado na figura 4.6. Esta curva é obtida através do ensaio da viga em balanço.

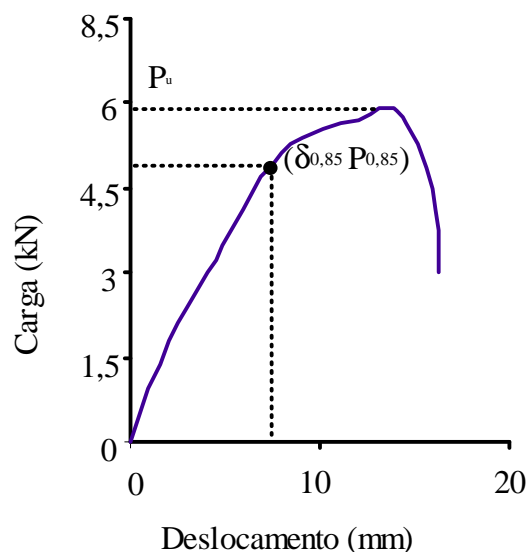


Figura 4.6 – Curva ilustrativa carga-deslocamento de uma ligação com indicação da carga última ( $P_u$ ) e do par ordenado  $(\delta_{0,85} ; P_{0,85})$ .

Este ensaio já foi realizado anteriormente por Oliveira para determinar a rigidez das ligações longarina-coluna e braço-coluna. Foram realizados três ensaios para cada tipo de ligação e os valores médios encontrados para a rigidez da ligação longarina-coluna foi de 75,193 kNm/rad e para a ligação braço-coluna foi de 73,862 kNm/rad.

O RMI recomenda que cada ligação deve resistir a um esforço ascendente de 4,45 kN sem falhar ou desencaixar da coluna.

A ligação entre a coluna e a placa de base, como dito anteriormente, é considerada rotulada na direção transversal, e na outra direção possui uma certa rigidez, porém o RMI não faz nenhuma referência para a determinação dessa rigidez. A forma de determinação da rigidez da ligação coluna-placa de base adotada neste trabalho é mostrada no capítulo 5.

#### 4.1.5. Vigas

O sistema *Drive-in* possui três tipos de vigas: braços, vigas do túnel e longarinas. O RMI não faz nenhuma consideração específica para estes tipos de vigas, sendo estas dimensionadas de acordo com a AISI. A única especificação que o RMI faz e que pode ser

aplicada ao *Drive-in* é o valor limite para a deflexão das vigas em 1/180 do comprimento do vão. Esta especificação é válida para as vigas do túnel. Para o cálculo dos braços e longarinas, considera-se os valores das rigidezes encontrados nos ensaios experimentais. A viga do túnel é calculada como viga contínua. As vigas são dimensionadas para a combinação que considera os impactos verticais, apresentada como combinação 3 do item 4.1.2.

#### 4.1.6. Comprimento Efetivo

As prescrições do RMI para o cálculo do comprimento efetivo para a direção longitudinal não podem ser aplicadas ao sistema *Drive-in*, pois nesta direção esse sistema difere amplamente do sistema *Porta-pallets*. No sistema *Porta-pallets* as colunas são ligadas uma a outra não só pela longarina, mas também pelas vigas que sustentam as cargas. Logo, o RMI especifica a determinação do coeficiente de flambagem K através de uma relação com as rigidezes das ligações das vigas ou longarinas com as colunas. Pela ausência desse tipo de viga no sistema *Drive-in*, a forma de determinação do coeficiente de flambagem K não poderá ser a mesma.

Na direção transversal, como todos os tipos de *racks* são contraventados, as prescrições do RMI podem ser utilizadas no sistema *Drive-in*. As especificações dizem que nos contraventamentos todas as ligações são consideradas rotuladas e o comprimento destravado é definido como a distância entre duas interseções dos elementos de contraventamento e a coluna. Para os sistemas que possuem elementos de contraventamento em diagonal ou uma combinação de elementos em diagonal e horizontal que interceptam a coluna, o coeficiente de flambagem K para a porção da coluna entre os pontos de contraventamento é tomado como 1, supondo que o valor máximo da taxa  $L_{\text{short}}/L_{\text{long}}$  não exceda 0,15.  $L_{\text{short}}$  e  $L_{\text{long}}$  são definidos como a mínima e a máxima distância, respectivamente, entre dois pontos de conexão dos elementos de contraventamento e a coluna (Figura 4.7).

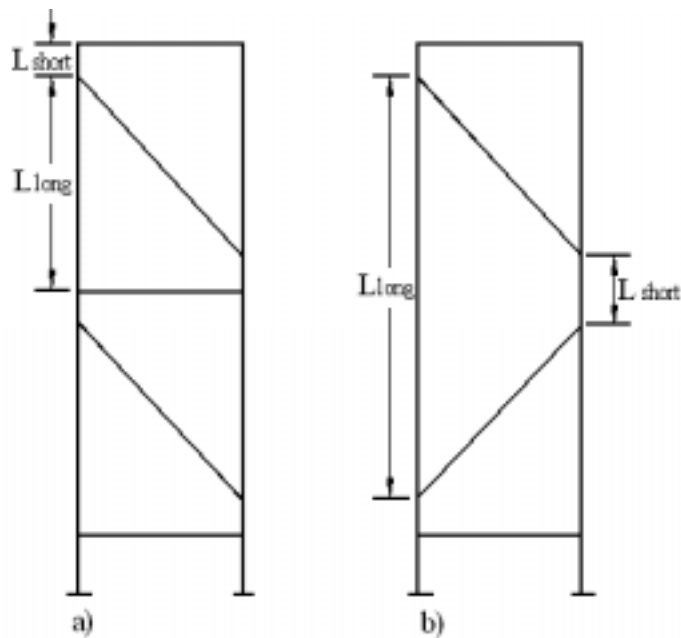


Figura 4.7 – Disposição dos comprimentos  $L_{short}$  e  $L_{long}$  para pórticos em que as diagonais de contraventamento se conectam a coluna.

Os elementos estarão sujeitos a torção pura quando o carregamento estiver aplicado no centro de cisalhamento da seção. Isto geralmente não ocorre nos membros comprimidos dos sistemas de armazenagem industrial, sendo usualmente a flambagem por flexo-torção o modo de flambagem crítico. Assim o conhecimento do coeficiente de flambagem a torção  $K_t$  se faz necessário. As restrições à torção são tais que os valores de  $K_t$  variam de 0,5 a 1,0. O RMI sugere  $K_t = 0,8$ , porém este valor não é para sistemas *Drive-in*, de modo que a favor da segurança, utiliza-se neste trabalho  $K_t = 1,0$ .

#### 4.1.7. Placas de base

O dimensionamento da placa de base é feito a partir da expressão:

$$\phi_c P_p = 1,7 f_c' A_{pb} \quad (4.9)$$

onde:

$$\phi_c = 0,60;$$

$f_c'$  = resistência à compressão do piso de concreto aos 28 dias;

$A_{pb}$  = área efetiva da placa de base.

#### **4.1.8. Considerações de Projeto**

É recomendável a colocação de placas nos sistemas de armazenagem industrial indicando as dimensões, carga máxima por palete e capacidade total para qual a estrutura foi dimensionada. Este procedimento é para evitar solicitações acima do permitido.

Sendo o *rack* projetado para mais de uma configuração na montagem das vigas, todas as possíveis configurações devem ser apontadas, identificando o modo de carregamento de cada uma delas, o máximo número de níveis de carregamento, a máxima distância entre as vigas e entre o piso e o primeiro nível de vigas. Uma observação deve ser anexada citando o perigo de alterações na configuração que não estejam previstas.

No ato da montagem do *rack* podem ocorrer falhas que conduzem a uma estrutura final fora do prumo. Segundo o RMI essa imperfeição geométrica deve ser de no máximo 1/240 rad.

A razão altura/profundidade não deve exceder a taxa 6 para 1, e quando isto ocorrer o *rack* deve se projetado para resistir a uma força lateral de 1,56 kN aplicada no topo da coluna considerando o *rack* vazio. Além disso, o *rack* deve ser adequadamente ancorado ou contraventado externamente. Recomenda-se que não se deve ultrapassar a taxa 8 para 1.

Além destes cuidados, durante a vida útil da estrutura deverá haver vistorias periódicas para evitar uma superposição de paletes, danos na integridade dos componentes e folga nas ligações que possam afetar o comportamento adequado da estrutura.

## 4.2. Especificações da ABML

A especificação da Associação Brasileira de Movimentação e Logística – ABML (2001), embora seja uma interpretação das prescrições do RMI (1997), apresenta algumas considerações diferenciadas deste, as quais são:

- As ligações são classificadas quanto ao critério de rigidez conforme a tabela 4.1;

Tabela 4.1 – Classificação das ligações conforme a rigidez.

Classificação	Descrição
Rígida	Restrição da rotação de 90%
Semi-rígida	Restrição da rotação de 20% a 90%
Flexível	Restrição da rotação menor que 20%

- As combinações de cargas pelo método do LRFD são apenas duas, uma para todos os elementos da estrutura ( $1,2DL + 1,6LL + 1,4PL$ ) e outra para os apoios das longarinas e seus conectores ( $1,2DL + 1,6LL + 1,4PL + 1,4Imp$ ). Essas combinações são respectivamente a de número 2 e 3 apresentadas aqui no item 4.2.2;

- As forças horizontais devem ser equivalentes a 5% do peso de um palete aplicado isoladamente na posição mais desfavorável;

- Não é considerada a influência dos furos no comportamento das colunas através do fator redutor de forma  $Q$ , logo a área efetiva é calculada de acordo com o conceito de largura efetiva e os módulos elásticos são calculados diretamente.

## 4.3. Considerações quanto ao dimensionamento das colunas do sistema *Drive-in*

De todos os elementos que constituem os sistemas de armazenagem industrial, aquele que gera maiores dificuldades em seu dimensionamento é a coluna, pois sobre esta existem esforços de flexão e de compressão que fazem com que seu dimensionamento seja feito como viga coluna. Em uma análise tridimensional, a coluna está sujeita a esforços de

flexão em torno dos seus dois eixos principais, portanto de acordo com a norma brasileira NBR-14672 deve-se verificar a resistência em relação a carga atuante a através da equação de interação apresentada a seguir:

$$\frac{P}{P_u} + \frac{C_{my} M_y}{M_{uy} \left(1 - \frac{P}{P_{ey}}\right)} + \frac{C_{mz} M_z}{M_{uz} \left(1 - \frac{P}{P_{ez}}\right)} = 1 \quad (4.10)$$

onde:

$P$  = carga axial de cálculo;

$P_u$  = carga axial última de compressão;

$C_{my}$ ,  $C_{mz}$  = fator de momento equivalente em relação ao eixo  $y$  e  $z$ , respectivamente;

$M_y$  e  $M_z$  = momento fletor de cálculo em torno do eixo  $y$  e  $z$ , respectivamente;

$M_{uy}$  e  $M_{uz}$  = momento fletor último em torno do eixo  $y$  e  $z$ , respectivamente, na ausência de carga axial;

$P_{ey}$  e  $P_{ez}$  = carga de flambagem elástica em torno do eixo  $y$  e  $z$ , respectivamente.

Todos os esforços resistentes mencionados na equação 4.10 são diretamente encontrados seguindo as prescrições da NBR-14672. Porém, para o sistema *Drive-in* em estudo, os valores da carga de flambagem elástica representados na equação 4.10 por  $P_{ey}$  e  $P_{ez}$  são obtidos através da equação de Euler (Timoshenko e Gere (1963)). No entanto estas equações são válidas para colunas em que as cargas são aplicadas nas extremidades (Figura 4.8 (a)) e no caso das colunas do sistema em estudo, o carregamento é aplicado ao longo do comprimento da coluna (Figura 4.8 (b)). Assim, a determinação da carga crítica de flambagem elástica deve ser determinada através da análise da estabilidade ou da determinação do menor autovalor (Allen e Bulson (1980)).

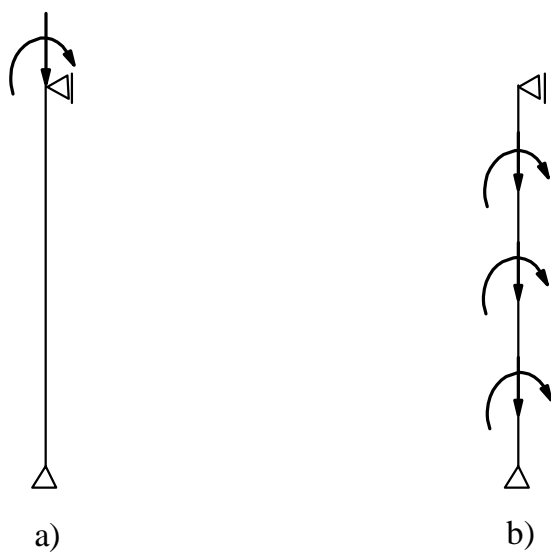


Figura 4.8 – (a) Coluna com carregamento na extremidade; (b) Coluna com carregamento aplicado ao longo do seu comprimento.

## Placa de Base

As colunas dos sistemas de armazenagem industrial são fixas ao piso através das placas de base (Figura 5.1). Essas placas de base não só servem para fixar a coluna ao piso como também para prover a estrutura de uma certa rigidez, já que o tipo da ligação e a espessura reduzida da chapa, não permitem considerar um engastamento perfeito.

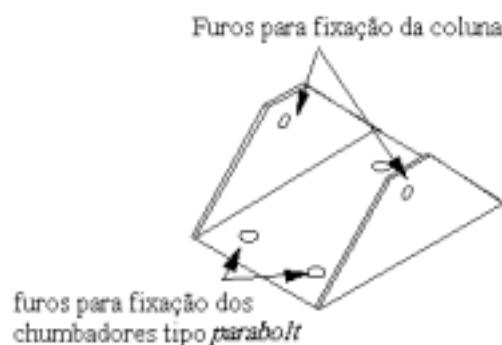


Figura 5.1 – Modelo de placa de base utilizado no sistema *Drive-in* em estudo.

Para os sistemas de armazenagem industrial do tipo *Porta-pallets* a rigidez lateral na direção longitudinal é usualmente suprida pelas ligações viga-coluna e coluna-placa de base devido à impossibilidade de usar sistemas de contraventamento nesta direção. Conseqüentemente a ligação coluna-placa de base é de fundamental importância nos sistemas *Drive-in* em que a estabilidade na direção longitudinal provém essencialmente da ligação da longarina e da placa de base, ficando todo o comprimento da coluna destravado.

A ligação entre a coluna e a placa de base é de comportamento semi-rígido na direção longitudinal e rotulada na direção transversal. Estas ligações são usualmente parafusadas e sujeitas a uma combinação de força axial e momento fletor (Godley et al. (1998)).

## 5.1. Comportamento da placa de base

O RMI não cita nenhum ensaio para quantificar a real rigidez da ligação coluna-placa de base, mas sugere a utilização das prescrições do AISC (1994) com algumas modificações para considerar a semi-rigidez da ligação coluna-placa de base para o sistema do tipo *Porta-pallets*.

Sabe-se de ensaios realizados por meio de outras prescrições de norma, que o comportamento da relação momento-curvatura da ligação coluna-placa de base é não linear e que no regime elástico essa não linearidade é pequena, mas se torna expressiva no regime plástico.

Baldassino e Bernuzzi (2000) estudaram a influência da ligação coluna-placa de base na estabilidade global da estrutura tipo *Porta-pallets*. Devido à ausência de dados experimentais, foram realizados estudos com dados de rigidez provenientes de testes apresentados pela FEM (1997). Foi feita uma análise numérica bidimensional não linear, considerando uma ligação coluna-placa de base com resistência ao momento fletor e a rotação, e outra sem nenhum tipo de resistência. Dessa análise deduziu-se que a estrutura com resistência ao momento fletor e rotação suporta um nível de carregamento maior de cargas do que a estrutura sem resistência, ou seja, sem rigidez.

Conclui-se que para o sistema *Drive-in* em que a estabilidade é um fator mais crítico, a determinação da rigidez da ligação coluna-placa de base é de extrema importância.

## 5.2. Ensaios descritos na literatura

Os ensaios relacionados com a determinação da rigidez da ligação coluna-placa de base não são muito difundidos. Poucas especificações de norma fazem alguma citação sobre o ensaio de determinação da rigidez da ligação coluna-placa de base. O RMI não faz nenhuma referência a algum ensaio para esta determinação. A FEM recomenda um tipo de ensaio esquematizado na figura 5.2.

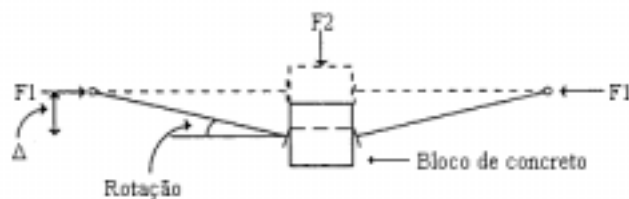


Figura 5.2 – Esquema do ensaio sugerido pela FEM para a determinação da rigidez da ligação coluna-placa de base.

Neste ensaio uma coluna é carregada de forma axial sob compressão constante com um bloco de concreto em seu centro, o qual é designado para simular o piso de concreto. Essa carga axial não altera o seu valor no decorrer do ensaio, se mantém constante. Uma carga horizontal ( $F_2$ ) é aplicada ao bloco de concreto. Com o aumento desta carga horizontal, a rotação da base da coluna é medida. O momento aplicado é calculado pela seguinte equação:

$$M = F_1 \Delta + \frac{F_2 L}{2} \quad (5.1)$$

onde:

$M$  = momento fletor na coluna;

$F_1$  = força axial aplicada;

$F_2$  = Força horizontal aplicada;

$\Delta$  = deslocamento sofrido pelo centro do bloco de concreto;

$L$  = comprimento total da peça.

Para cada nível de carga horizontal aplicada, anota-se a rotação sofrida pela peça e calcula-se o momento. Com estes vários pontos determinados plota-se uma curva momento-rotação. É esperado que o comportamento da ligação varie com a magnitude da carga de compressão, de tal forma que para usar os resultados no projeto dos *racks*, uma aproximação iterativa será necessária (Godley (1991)).

Godley et al. (1998) realizaram um estudo da placa de base utilizando o ensaio esquematizado na figura 5.2. Os objetivos do estudo eram avaliar a influência da carga

axial e do material do bloco de fixação da placa de base no valor da rigidez dessa ligação. Foram utilizados blocos de concreto e de madeira. Três ensaios foram feitos para cada tipo de bloco, sendo que as cargas de compressão axiais de cada ensaio eram de 20 kN, 40 kN e 80kN.

Destes ensaios concluiu-se que quanto maior o nível de carga axial aplicada, maior a resistência à rotação da ligação coluna-placa de base, ou seja, maior a rigidez. Além disso, o material que possui um módulo de elasticidade maior, no caso o concreto, fornece resultados mais rígidos que o material de módulo de elasticidade menor, a madeira.

### **5.3. Ensaio da ligação coluna-placa de base**

A partir da inexistência de uma formulação para determinação da rigidez da placa de base do sistema *Drive-in*, realizou-se neste trabalho uma avaliação experimental da rigidez desta ligação considerando bloco de concreto como base.

Das conclusões de Godley et al. (1998) de que uma coluna com nível mais alto de carga concentrada possui uma rigidez maior, conduz a dedução de que uma coluna sem carga axial fornece um valor de rigidez mais baixo, ou seja, a favor da segurança. Como no sistema *Drive-in* em estudo, a coluna mais solicitada em termos de momento possui um nível de tensão de compressão baixo comparado com os níveis estudados por Godley et al. (1998), leva-se a conclusão de que a melhor maneira de definir a rigidez da ligação coluna-placa de base é através de um ensaio que só momento seja aplicado à peça. Logo, para determinar a rigidez da ligação coluna-placa de base foi realizado um ensaio em que foi aplicado um momento fletor na coluna e anotadas as respectivas rotações sofridas por esta. A figura 5.3 mostra o esquema de como o ensaio foi realizado. A coluna e a placa de base utilizadas integram o projeto original em estudo.

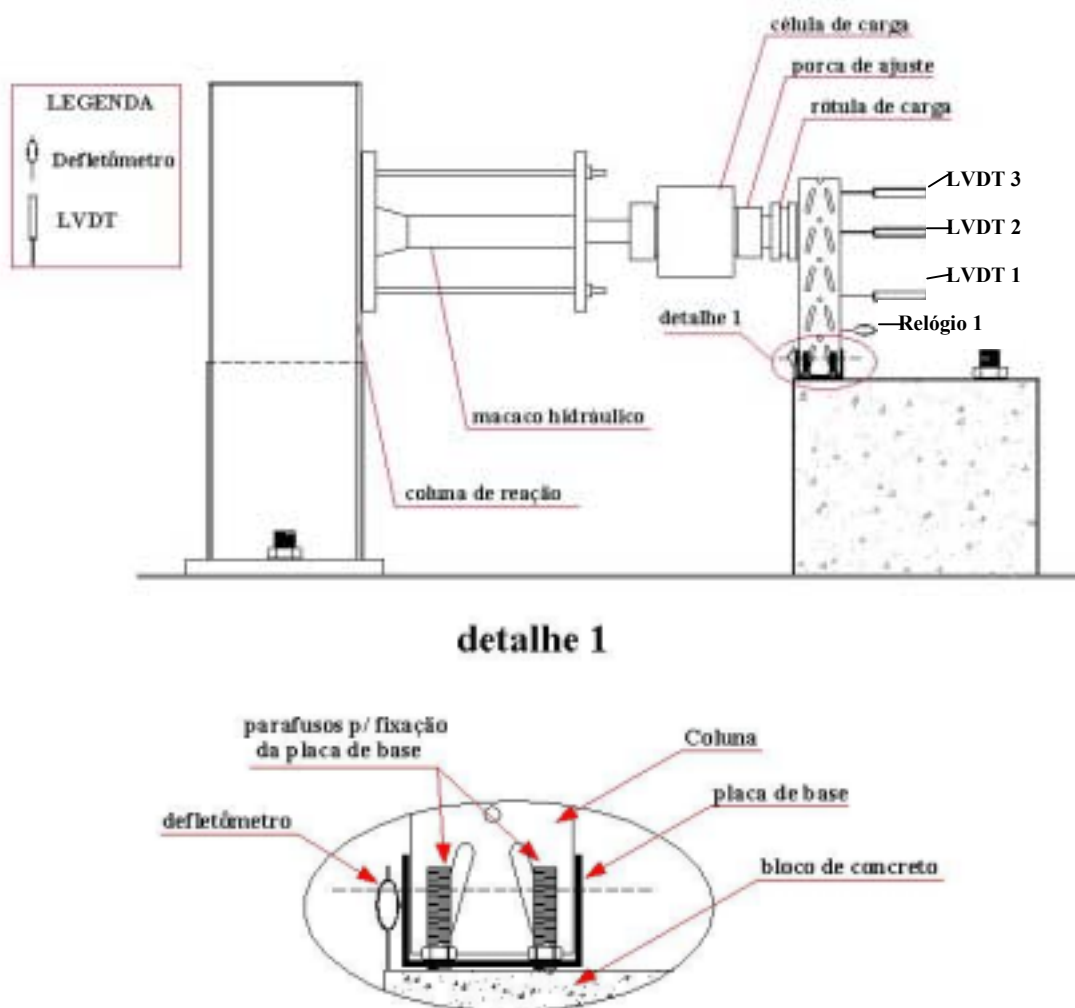


Figura 5.3 – Esquema de montagem do ensaio.

Foi concretado um bloco com barras de ancoragem em que foram fixas as placas de base. A carga foi aplicada em etapas através de atuador hidráulico e os deslocamentos medidos por transdutores de deslocamentos (LVDT 1, LVDT 2 e LVDT 3) e pelo defletômetro (relógio1). As anotações dos deslocamentos da coluna foram feitas logo após a aplicação de cada etapa de carga. A figura 5.4 apresenta uma foto do ensaio com posicionamento dos instrumentos.



Figura 5.4 – Foto do ensaio realizado para a determinação da rigidez da ligação coluna-placa de base mostrando o posicionamento do atuador hidráulico, da célula de carga, dos transdutores de deslocamento e relógio.

O objetivo deste ensaio é obter valores de momento e rotação sofridos pela coluna e em seguida obter o valor da rigidez da ligação. Para isso o momento fletor foi obtido conforme a equação 5.2 e o ângulo de rotação  $\theta_i$  foi determinado pela equação 5.3.

$$M_i = P_i \ell_j \quad (5.2)$$

onde:

$M_i$  = momento fletor para o tempo  $i$ ;

$P_i$  = carga aplicada no tempo  $i$

$\ell_j$  = comprimento do centro de rotação ao aparelho  $j$ .

$$\theta_i = \frac{\Delta_{ij}}{\ell_i} \quad (5.3)$$

onde:

$\theta_i$  = ângulo de rotação da coluna no tempo i;

$\Delta_{ij}$  = deslocamento sofrido pela coluna após a aplicação da carga no tempo i medido pelo aparelho j;

$\ell_j$  = comprimento do centro de rotação ao aparelho j.

A partir da curva momento-rotação, a rigidez  $k$  da ligação é determinada pelo Método da inclinação a 50% do momento último. Este método consiste em medir a inclinação de uma reta passando pela origem e pela coordenada correspondente a 50% do momento último ( $M_u$ ), (Figura 5.5).

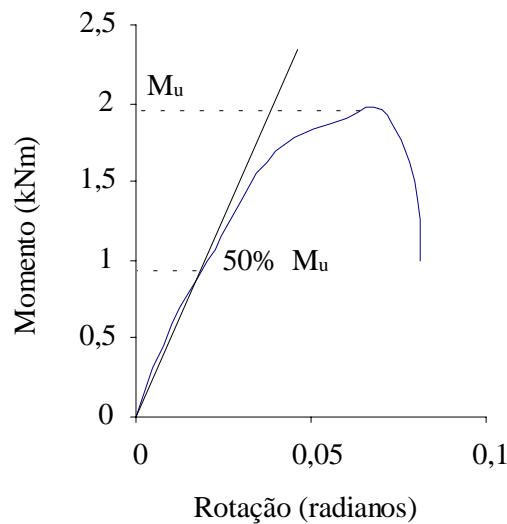


Figura 5.5 – Curva ilustrativa do Método da Inclinação a 50% do Momento Último.

#### 5.4. Resultados encontrados

Tanto no ensaio 1 quanto no ensaio 2 o LVDT 3, que está mais próximo a extremidade, não forneceu resultados coerentes, logo este LVDT 3 não será considerado nos dados. No ensaio 1 o valor máximo de carga aplicada foi de 3,28 kN e foi imposta em 6 etapas. No ensaio 2 a carga máxima de 2,34 kN foi aplicada em 5 etapas. A figura 5.6 apresenta uma foto da coluna após a aplicação de toda a carga no ensaio 1.

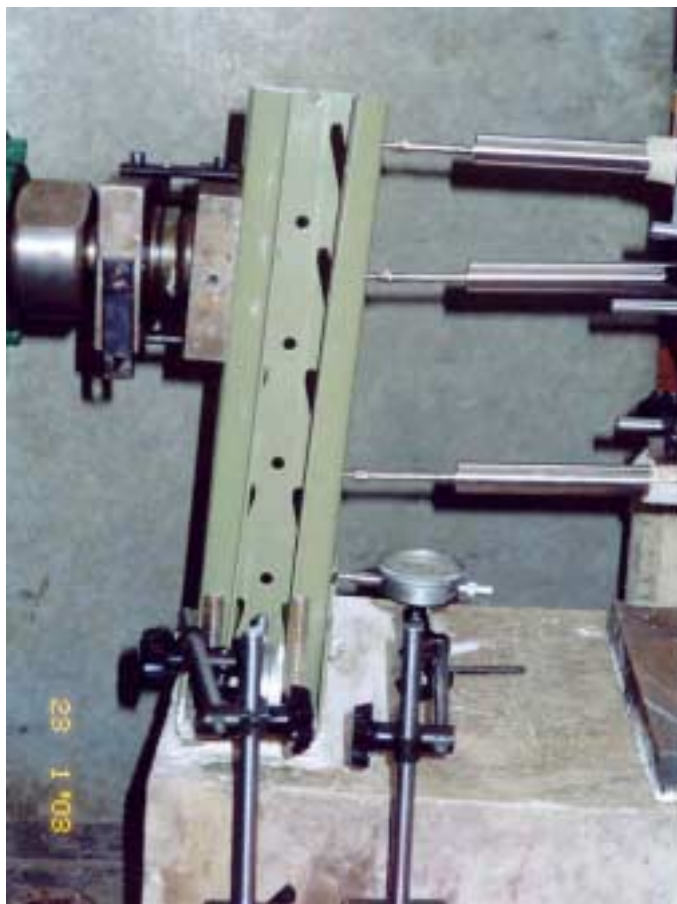


Figura 5.6 – Foto do ensaio 1 apresentando a configuração da coluna após a aplicação de toda a carga.

Foram obtidas curvas momento-rotação para os três pontos de localização dos aparelhos. As tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, que se referem ao ensaio 1, apresentam respectivamente os resultados de momento e rotação juntamente com o valor da rigidez para os pontos onde o relógio, o LVDT 1 e o LVDT 2 estão posicionados.

Tabela 5.1 – Valores encontrados no ensaio 1 para a posição do relógio.

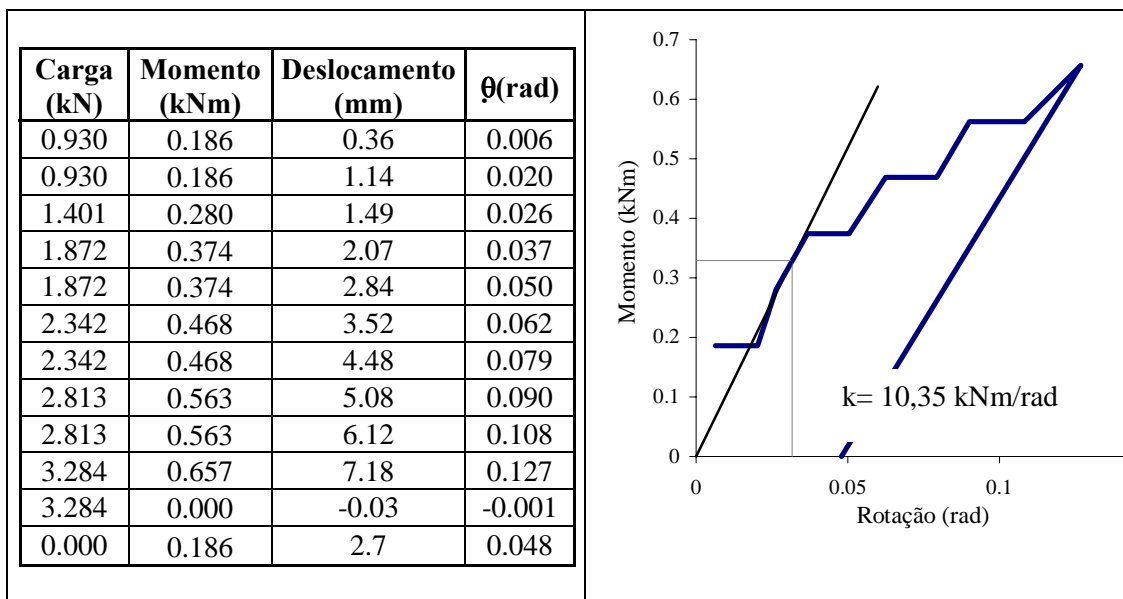


Tabela 5.2 – Valores encontrados no ensaio 1 para a posição do LVDT 1.

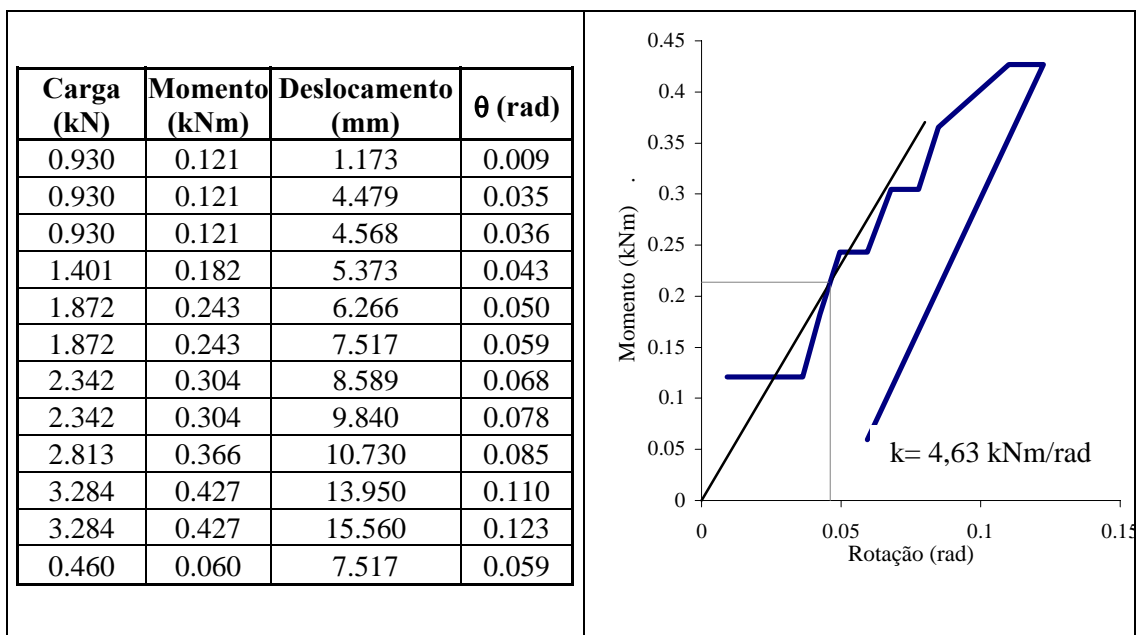
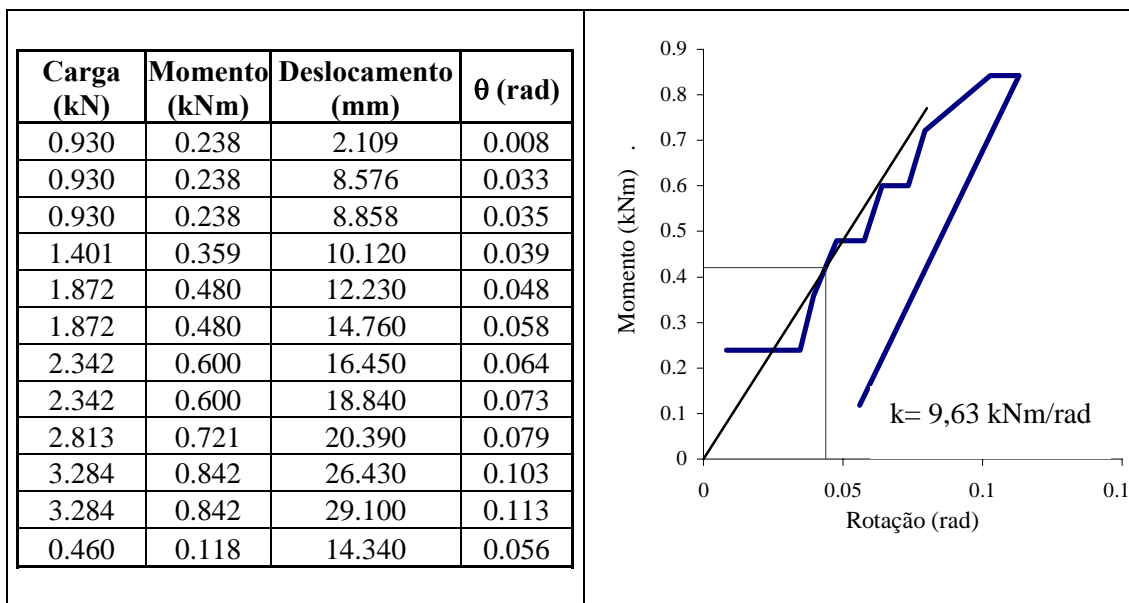


Tabela 5.3 – Valores encontrados no ensaio 1 para a posição do LVDT 2.



As tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 se referem ao ensaio 2 e apresentam respectivamente os resultados encontrados para os pontos onde o relógio, o LVDT 1 e o LVDT 2 estão posicionados.

Tabela 5.4 – Valores encontrados no ensaio 2 para a posição do relógio.

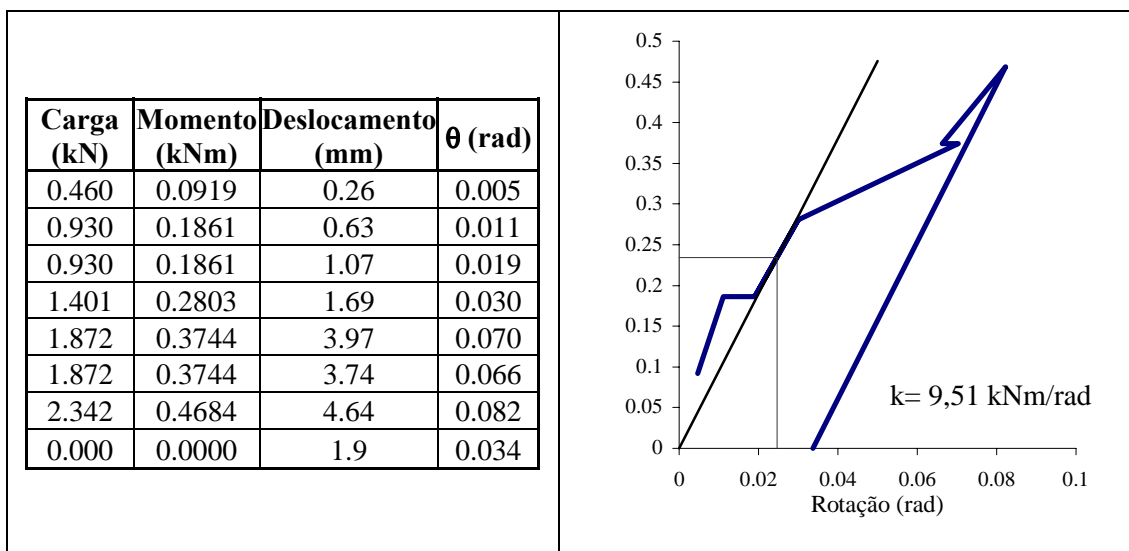


Tabela 5.5 – Valores encontrados no ensaio 2 para a posição do LVDT 1.

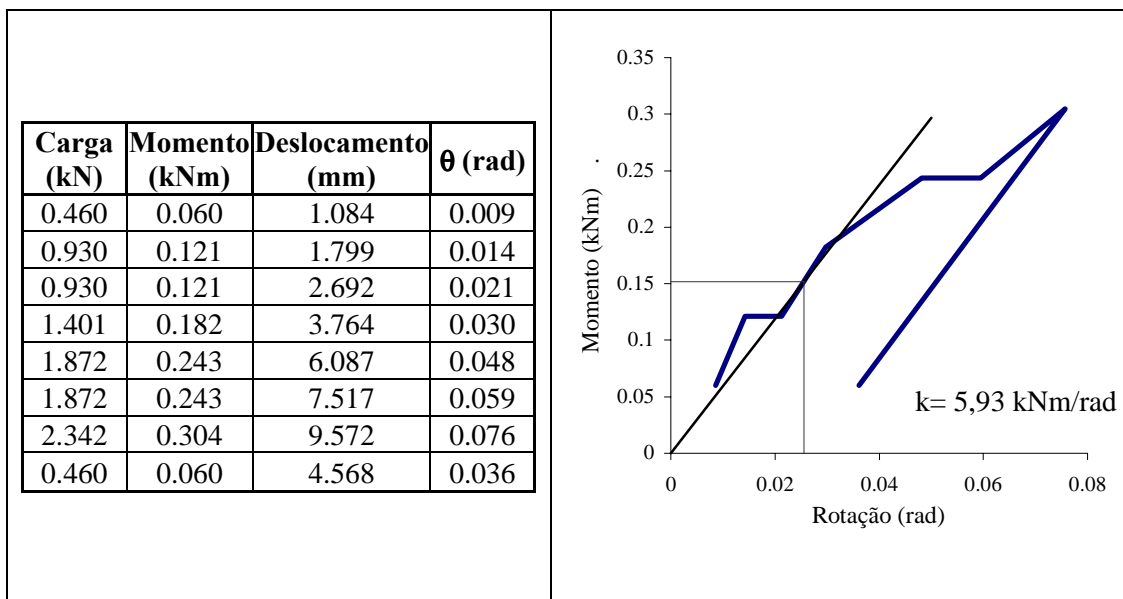
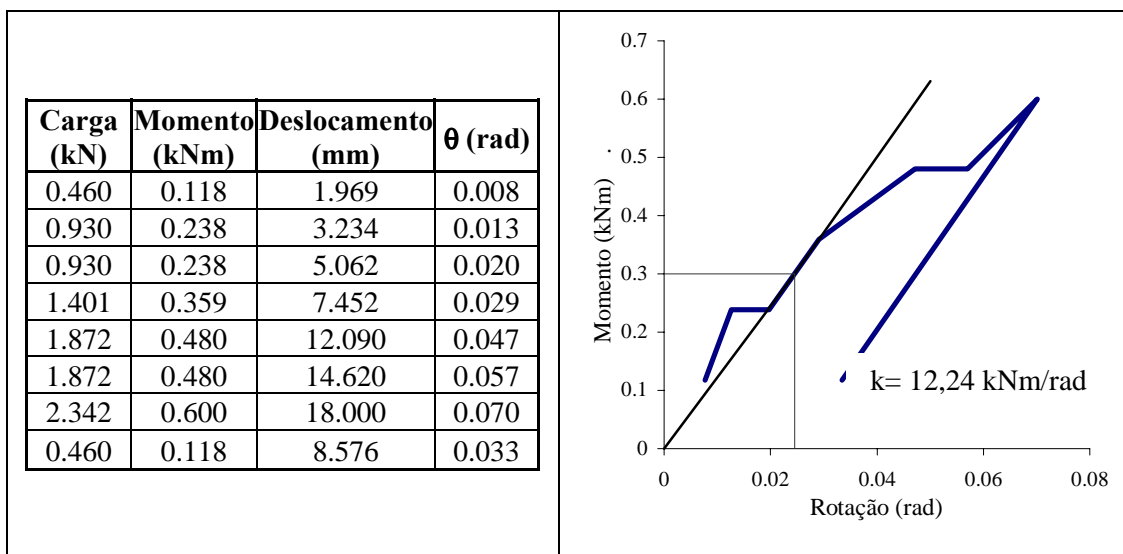


Tabela 5.6 – Valores encontrados no ensaio 2 para a posição do LVDT 2.



A tabela 5.7 apresenta um resumo com todos os valores de rigidez encontrados nos dois ensaios e o valor médio.

Tabela 5.7 – Resumo dos resultados de rigidez encontrados e o valor médio em cada ponto.

<b>Ensaio</b>	<b>Valores de rigidez (kNm/rad)</b>		
	<b>Relógio</b>	<b>LVDT 1</b>	<b>LVDT 2</b>
<b>Ensaio 1</b>	10,35	4,63	9,63
<b>Ensaio 2</b>	9,51	5,93	12,24
<b>Valor médio</b>	9,93	5,28	10,94

Dos três valores médios encontrados apresentados na tabela 5.7 o valor referente ao LVDT 1 é aproximadamente 50% menor do que os valores referentes ao relógio e ao LVDT 2, logo o resultado referente ao LVDT 1 não é confiável. Portanto o valor da rigidez da ligação coluna-placa de base a ser adotado é a média entre os valores correspondentes ao relógio e ao LVDT 2, ou seja, a rigidez média vale 10,44 kNm/rad.

Este valor será utilizado nas análises posteriores a serem apresentadas no capítulo 6.

## **Análise Numérica**

Foram modeladas quatro situações, todas representando o projeto do sistema *Drive-in* em questão (Anexo I). Uma delas representa as características do sistema considerando os dados de projeto, a outra considerando os dados obtidos em ensaios experimentais, outra modelada de forma a representar a estrutura imperfeita no plano XY, ou seja, com todos os elementos da vertical rotacionados de um ângulo pré-determinado pelo RMI, e a última de forma a representar a imperfeição no plano ZY. Por se tratar de uma estrutura com elementos muito esbeltos, a consideração dos efeitos de segunda ordem é de grande importância, logo, a fim de considerar esse efeito foi preciso uma análise não linear. A estrutura foi analisada através de um modelo tridimensional sendo que todas as análises foram feitas no *software* comercial ANSYS, utilizando as combinações de carga previstas pelo RMI, sendo que o valor da carga de armazenagem foi fornecido pelo fabricante.

### **6.1. Análise não linear**

Foi considerada a não linearidade física e geométrica. A não linearidade física é admitida no comportamento bilinear elasto-plástico do diagrama tensão deformação construído de acordo com os valores obtidos dos ensaios de caracterização dos aços utilizados. A não linearidade geométrica é considerada no comportamento dos elementos na análise da estrutura após a aplicação das cargas.

Na análise não linear as cargas são aplicadas na estrutura de forma gradual, e para cada parcela de carga aplicada são calculados todos os esforços e deslocamentos ocorridos na estrutura devido a sua atuação. Nas análises não lineares apresentadas no capítulo 7, as parcelas de cargas aplicadas são de no máximo 10% e no mínimo de 5%

da carga total dependendo da não linearidade da resposta. O método utilizado para o cálculo foi o método de Newton Raphson Padrão.

Para quantificar a diferença entre as análises, foi realizada uma análise linear e outra não linear da mesma estrutura. Na análise linear o comportamento dos aços foi considerado linear.

## **6.2. Análise tridimensional**

Para assegurar a estabilidade do sistema, a geometria da estrutura do *Drive-in* é tal que há uma transferência de esforços entre os elementos que a compõem. Essa transferência de esforços é mais bem representada quando considerada uma análise tridimensional.

Será feita uma comparação entre as análises bidimensional e tridimensional da estrutura para avaliar a influência nos resultados deste tipo de sistema.

## **6.3. Elementos utilizados na modelagem**

O *software* ANSYS é um programa de análise numérica tendo como base matemática o método dos elementos finitos. Este programa possui uma ampla biblioteca de tipos de elementos finitos que podem ser utilizados na análise para a modelagem da estrutura. Foram utilizados elementos de viga e elemento de mola que simula a semi-rigidez das ligações. A seguir é apresentada a característica dos elementos utilizados.

- *Beam 4*: elemento de viga, tridimensional de comportamento elástico, com capacidade de representar esforços de tração, compressão, torção e momentos fletores em torno dos três eixos dos elementos. Este elemento possui seis graus de liberdade em cada nó: translação e rotação nas direções x, y e z e é utilizado para representar as vigas do túnel;
- *Beam 44*: elemento de viga assimétrico, tridimensional, de comportamento elástico, com capacidade de representar esforços de tração, compressão, torção e momentos fletores em torno dos três eixos dos elementos. O elemento *Beam 44* possui seis graus de liberdade em cada nó: translação e rotação nas direções x, y e z. A assimetria deste

elemento permite representar seções que não possuem o centro de gravidade exatamente no centro da seção como ocorre nas colunas em que a seção é assimétrica, logo o elemento *Beam 44* é utilizado para representá-las. Os braços e longarinas também são representados por este elemento;

- *Link 180*: elemento de treliça tridimensional com capacidade de representar apenas esforços axiais de tração e compressão (Figura 6.1). Possui três graus de liberdade em cada nó: translação nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Como qualquer elemento de treliça, este possui rotação livre em todas as direções. Este elemento representa os componentes do contraventamento e os distanciadores do sistema *Drive-in*;

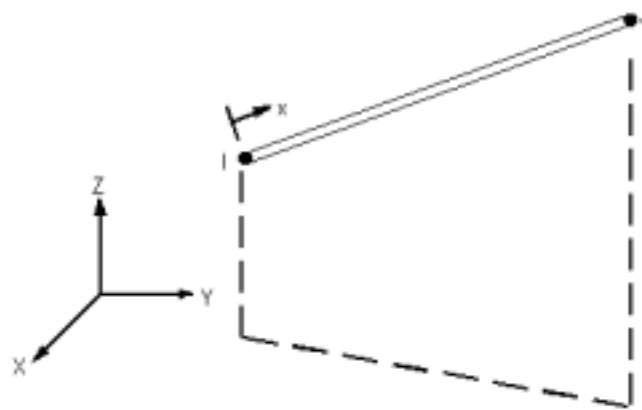


Figura 6.1 – Representação do elemento *Link 180*.

- *Combin 14*: elemento de mola com capacidade de representar rigidez à rotação ou à translação unidimensional, bidimensional ou tridimensional. Nenhum tipo de esforço é representado por este elemento, o *combin 14* apenas transmite os esforços para os elementos adjacentes. Nesta análise este elemento é utilizado apenas para representar a rigidez à rotação (Figura 6.2). Isto é feito através do parâmetro  $k$  fornecido como rigidez à rotação. Esse parâmetro  $k$  é encontrado em ensaios experimentais de ligações.

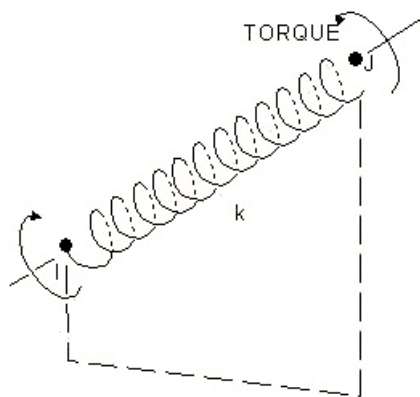


Figura 6.2 – Representação do elemento *Combin 14* identificando a sua rigidez a rotação.

Chama-se atenção ao fato de que cada elemento possui um sistema de eixos próprios, chamados de coordenadas locais. Sempre o eixo x está posicionado de modo a ser o eixo axial do elemento.

#### 6.4. Características geométricas dos componentes do sistema *Drive-in*

O sistema *Drive-in* em estudo, como já citado anteriormente, foi fornecido pela empresa Águia Sistemas de Armazenagem. As propriedades geométricas das seções dos elementos, juntamente com a disposição dos eixos locais estão representadas na tabela 6.1 a seguir, sendo que:

$I_{yy}$  = momento de inércia relativo ao eixo local y do elemento;

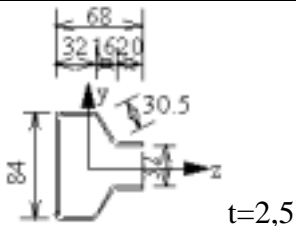
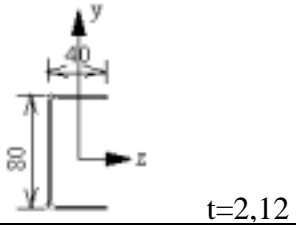
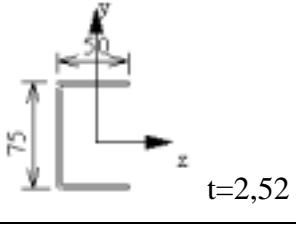
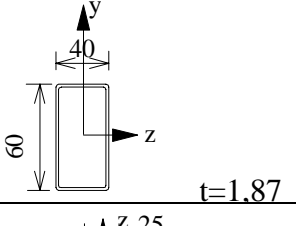
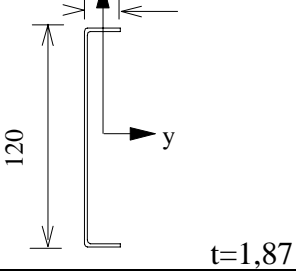
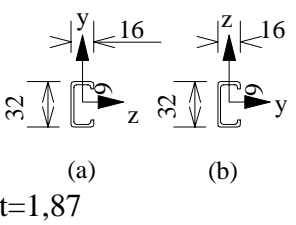
$I_{zz}$  = momento de inércia relativo ao eixo local z do elemento;

$J$  = momento de inércia a torção;

$A$  = área da seção transversal;

$t$  = espessura.

Tabela 6.1 – Propriedades geométricas dos membros que compõe o sistema *Drive-in*.

SEÇÃO TRANSVERSAL (mm)		$I_{yy} \text{ (cm}^4\text{)}$		$I_{zz} \text{ (cm}^4\text{)}$	$J \text{ (cm}^4\text{)}$	$A \text{ (cm}^2\text{)}$
COLUNA		21,04		41,51	0,1302	4,79*
VIGA DO TÚNEL		5,15		32,48	0,0486	3,24
BRAÇO		10,91		39,15	0,0889	4,20
LONGARINA		9,30		17,40	19,46	3,51
DISTANCIADOR		555,10		1,353	0,0357	3,06
CONTRAV. (A) DIAGONAL, (B) HORIZONTAL L.		(a)	0,44	1,79	0,0152	1,30
		(b)	1,79	0,44	0,0152	1,30

\* Este valor corresponde à área líquida da seção transversal descontando o valor dos furos.

## 6.5. Resultados experimentais utilizados

Em seu trabalho, Oliveira (2000) realizou vários ensaios experimentais para quantificar o comportamento dos elementos que compõem a estrutura do sistema *Drive-in*. Foram utilizados ensaios de caracterização para o aço das colunas e das longarinas de acordo com as especificações da ASTM (1995), onde corpos de prova foram tracionados obtendo-se a tensão limite de escoamento ( $f_{ya}$ ), a tensão limite de resistência à tração ( $f_u$ ) e o alongamento residual após a ruptura do aço. O aço das colunas é o especificado como ASTM A570 G36 e o aço das longarinas e braços é o SAE 1008. Os valores médios encontrados nesses ensaios estão na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Valores médios de  $f_{ya}$ ,  $f_u$  e do alongamento residual após a ruptura.

<b>Tipo do aço</b>	<b><math>f_{ya}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_u</math> (Mpa)</b>	<b>Alongamento residual após a ruptura (%)</b>
ASTM A570 G36 (colunas)	337,52	455,85	48,39
SAE 1008 (longarinas)	385,32	486,77	24,28

Através dos ensaios da viga em balanço (*Cantilever test*) e da coluna curta (*stub column test*), especificados pelo RMI, Oliveira quantificou respectivamente a rigidez das ligações longarina-coluna e braço-coluna, e o fator redutor de forma Q. A tabela 6.3 apresenta os valores médios das rigidezes encontradas.

Tabela 6.3 – Valores médios da rigidez das ligações determinadas por Oliveira (2000).

<b>Ligação</b>	<b>Rigidez (kNm/rad)</b>
Braço-coluna	73,862
Longarina-coluna	75,193

O valor do fator redutor de forma encontrado através do ensaio da coluna curta é  $Q = 0,910$ . Através deste fator redutor de forma é determinada a área efetiva da seção transversal da coluna através da equação 4.2 apresentada no item 4.1.3.

Na equação do cálculo da área efetiva, a tensão nominal da peça é calculada considerando a seção transversal bruta e o comprimento utilizado no ensaio da coluna curta. O RMI especifica o cálculo da tensão nominal de acordo com a AISI. Porém, para adequar as prescrições do RMI ao Brasil, a tensão nominal foi também calculada de acordo com as prescrições da norma brasileira de perfis formados a frio (NBR-14762 (2001)). A tabela 6.4 apresenta os valores das tensões nominais e das áreas efetivas encontradas.

Tabela 6.4 – Valores de tensão nominal e área efetiva calculados de acordo com a norma brasileira NBR-14762 e com a AISI (1996).

<b>Norma utilizada</b>	<b>Tensão nominal (MPa)</b>	<b>Área efetiva (cm<sup>2</sup>)</b>
AISI (1996)	331,493	4,16
NBR-14762 (2001)	180,741	4,33

Nos itens seguintes, quando for mencionada área efetiva calculada segundo a NBR-14672, significa que a tensão nominal utilizada no cálculo da área efetiva foi encontrada seguindo a NBR-14672, o mesmo é válido para quando for mencionada área efetiva calculada pela AISI, onde a tensão nominal utilizada no cálculo da área efetiva foi determinada seguindo as prescrições da AISI.

O valor da tensão nominal calculada pela norma brasileira é mais baixo devido à consideração do modo distorcional de flambagem que a AISI (1996) desconsidera.

Outro valor experimental utilizado foi a rigidez da ligação coluna-placa de base que foi determinada como especificado no capítulo 5, sendo que o valor médio encontrado foi de 10,44 kNm/rad.

## 6.6. Estruturas modeladas

Foram modeladas estruturas tridimensionais com as mesmas dimensões do projeto do sistema *Drive-in* (Figura 6.3). O objetivo destas análises é avaliar o comportamento da estrutura através de uma análise não linear, comparar a análise tridimensional com uma análise bidimensional, mostrar a perda de influência do plano de contraventamento dos fundos na estabilidade da estrutura a medida que aumenta a

profundidade do *Drive-in*, apresentar a importância de se considerar os dados experimentais, validar as cargas horizontais como forma de representar a falta de prumo na estrutura e avaliar a carga crítica da coluna.

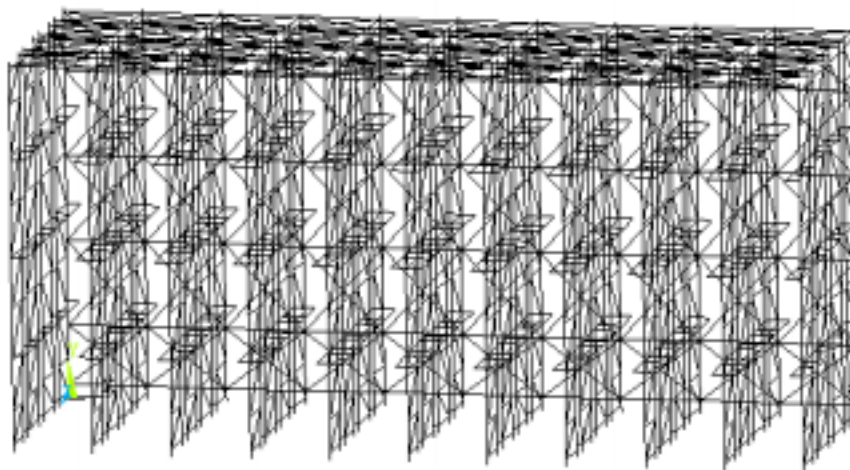


Figura 6.3 – Vista tridimensional da estrutura modelada no ANSYS (2001).

Quatro estruturas foram modeladas, uma considerada perfeita, sem nenhuma rotação dos seus membros, e com todos os dados experimentais obtidos incluídos em sua análise, a segunda também perfeita, porém sem considerar os dados experimentais obtidos, utilizando apenas dados nominais de projeto, a outra com os dados experimentais, mas com todos os seus membros rotacionados na direção do plano XY e a última também com dados experimentais, mas com os seus membros rotacionados na direção do plano ZY. A seguir a tabela 6.5 apresenta um resumo destas estruturas e a tabela 6.6 apresenta os dados experimentais e nominais de projeto utilizados.

Tabela 6.5 – Resumo das características das estruturas modeladas.

<b>Tipo de estrutura</b>	<b>Grau de inclinação (rad)</b>
Perfeita com dados experimentais	0
Perfeita sem dados experimentais	0
Imperfeita no plano XY com dados experimentais	0,004 no plano XY
Imperfeita no plano ZY com dados experimentais	0,004 no plano ZY

Tabela 6.6 – Dados experimentais e nominais de projeto utilizados.

Propriedades	Valores experimentais (AISI (1996))	Valores experimentais (NBR-14762 (2001))	Valores nominais de projeto
Área da seção transversal da coluna (cm <sup>2</sup> )	4,16 <sup>(1)</sup>	4,33 <sup>(1)</sup>	4,79 <sup>(2)</sup>
I <sub>y</sub> <sup>(3)</sup> (cm <sup>4</sup> )	19,98	19,98	21,04
I <sub>z</sub> <sup>(3)</sup> (cm <sup>4</sup> )	43,07	43,07	41,51
Momento de inércia a torção (cm <sup>4</sup> )	0,126	0,126	0,130
Rigidez da ligação braço–coluna (kNm/rad)	73,86	73,86	engaste
Rigidez da ligação longarina-coluna (kNm/rad)	75,19	75,19	rótula
Rigidez da ligação placa de base-coluna (kNm/rad)	10,44	10,44	engaste
Propriedades do aço da coluna (Mpa)	F <sub>y</sub> =337,52	F <sub>y</sub> =337,52	F <sub>y</sub> =250
	F <sub>u</sub> =455,85	F <sub>u</sub> =455,85	F <sub>u</sub> =370
Propriedades do aço da longarina e do braço (Mpa)	F <sub>y</sub> =385,32	F <sub>y</sub> =385,32	F <sub>y</sub> =180
	F <sub>u</sub> =486,77	F <sub>u</sub> =486,77	F <sub>u</sub> =300
(1) área efetiva da seção transversal da coluna calculada considerando o fator redutor de forma Q;			
(2) área líquida da seção transversal da coluna descontando o valor dos furos;			
(3) momento de inércia relativo ao eixo local do elemento que compõem a coluna.			

Em todas as estruturas modeladas, os dados geométricos das demais peças componentes do sistema *Drive-in* são aqueles apresentados na tabela 6.1.

As figuras 6.4 e 6.5 apresentam o aspecto das estruturas imperfeitas no plano XY e ZY respectivamente através da representação de um painel destas, onde  $\theta$  representa o ângulo de 0,004 rad especificado pelo RMI (1997).

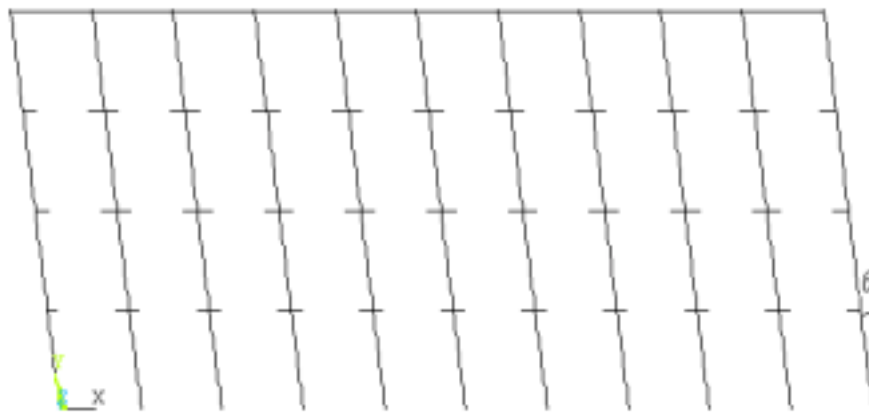


Figura 6.4 – Painel representativo da estrutura imperfeita no plano XY.

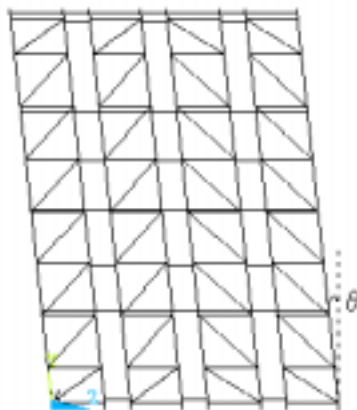


Figura 6.5 – Painel representativo da estrutura imperfeita no plano ZY.

### 6.6.1. Configurações do carregamento

Foram considerados três tipos de cargas, que dependendo da análise realizada foram aplicadas ou não. A carga de armazenagem foi imposta em todos os tipos de estruturas modeladas, enquanto as forças horizontais e as cargas verticais de impacto só foram aplicadas nas estruturas modeladas chamadas perfeitas. Para todas as estruturas modeladas as cargas foram impostas nos mesmos pontos, para poder comparar os resultados encontrados. Lembrando que as forças horizontais  $F_x$  e  $F_z$  são aplicadas separadamente em cada uma das suas respectivas direções.

A carga de armazenagem foi calculada partindo da informação do fabricante de que cada palete representa uma carga  $w = 8,82 \text{ kN}$  apoiada em duas vigas do túnel, o que gera uma carga “ $q$ ” distribuída ao longo desta de  $4,41 \text{ kN/m}$ , conforme ilustra a

figura 6.6, nos três níveis de carregamento. Em todas as análises foi considerada uma estrutura totalmente carregada.

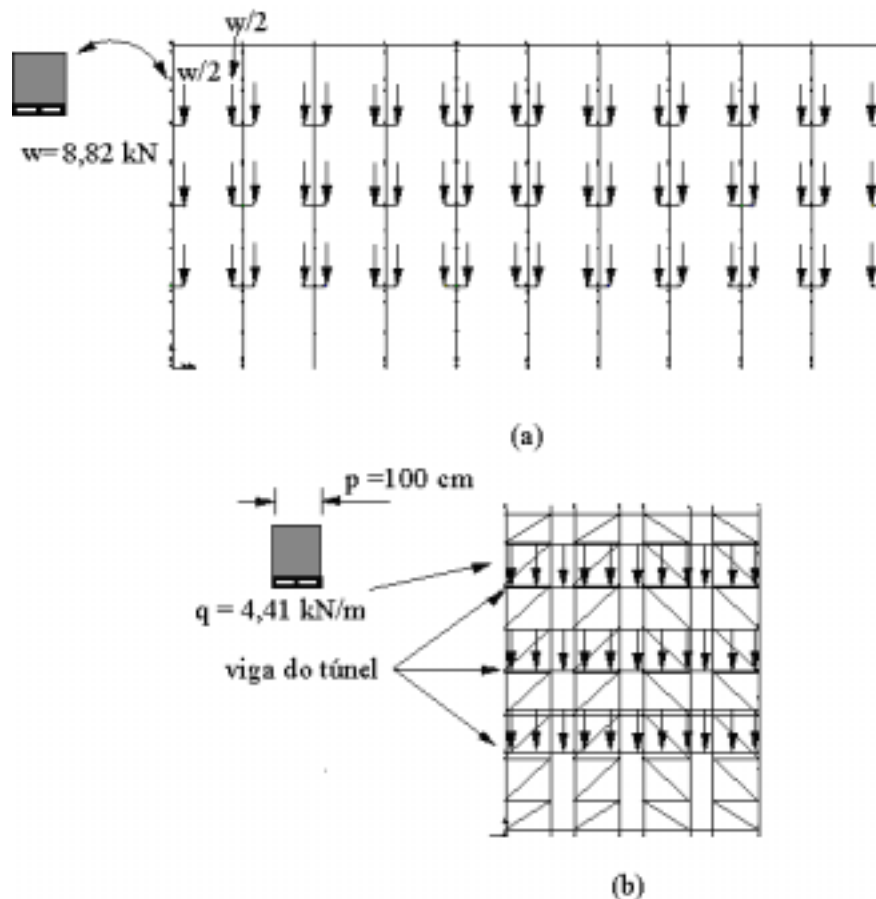


Figura 6.6 – Distribuição da carga de armazenagem na estrutura:

- (a) vista frontal com indicação do peso dos paletes e sua distribuição;
- (b) vista lateral com indicação da carga  $q$  nas vigas do túnel.

As forças horizontais, atribuídas como forma de representar a estrutura imperfeita foram aplicadas separadamente nas direções  $z$  e  $x$  das estruturas chamadas perfeitas. Para facilitar a compreensão da distribuição das forças horizontais na estrutura, a figura 6.7 apresenta a localização de alguns planos que serão citados abaixo.

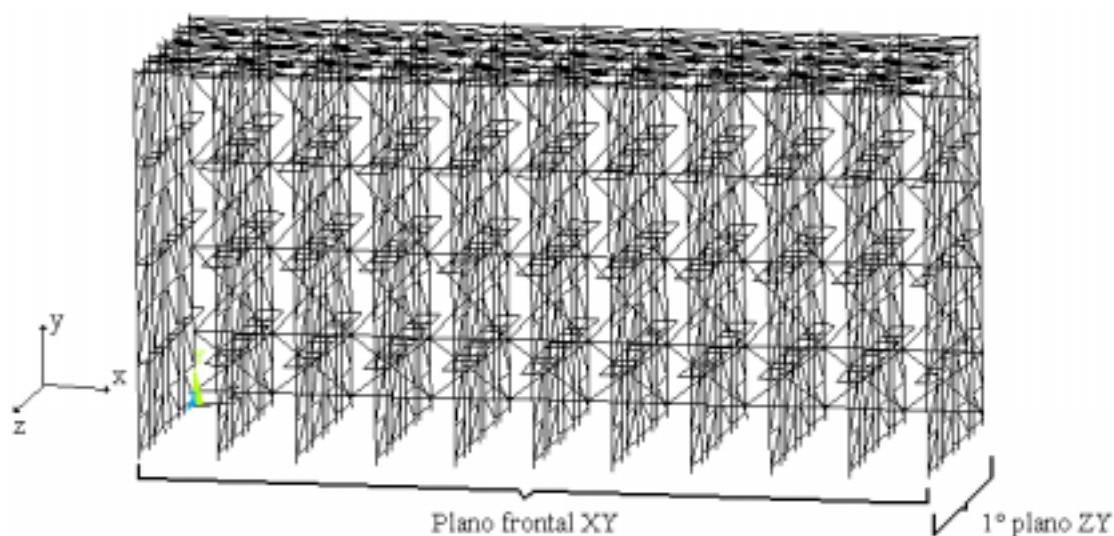


Figura 6.7 – Definição dos planos de aplicação das forças horizontais.

O RMI, como dito anteriormente, especifica que as forças horizontais correspondem a 1,5% da carga total de armazenagem mais o peso próprio de toda a estrutura, porém, não faz referência a distribuição dessas cargas na estrutura. Hancock et al baseados na porcentagem de carga definida pelo RMI determinaram a magnitude das forças horizontais e utilizaram a norma australiana de *rack* (AS 4084 (1993)) para a determinação da forma de distribuição das mesmas (Hancock et al. (2001)). Essa determinação de força horizontal considera uma estrutura do tipo *Porta-pallets*, sendo neste trabalho realizada uma adequação desse procedimento para uma estrutura do tipo *Drive-in*.

Na direção do eixo global z, para representar a imperfeição no plano ZY, as forças horizontais  $F_z$  foram aplicadas nos pontos de conexão dos braços com as colunas do plano frontal, e foram calculadas a partir da expressão  $\theta \Sigma W_{ij}$ , onde  $\theta = 0,015$  e  $W$  corresponde às cargas concentradas no nível i na coluna j devido ao peso próprio e à carga de armazenagem. As cargas de armazenagem são as mesmas nos três níveis, diferenciando apenas que as colunas de extremidade são menos solicitadas do que as colunas do interior devido à geometria da estrutura com braços conectados somente de um lado. As cargas de peso próprio variam tanto no nível em que estão, quanto na localização da coluna, o que gera valores diferentes de peso próprio. Logo, as forças horizontais assumem valores diferenciados dependendo do ponto de aplicação. A figura 6.8 ilustra os pontos de aplicação e a tabela 6.7 apresenta os valores dessas

forças. A figura 6.8 mostra apenas o primeiro plano da estrutura para a simplificação do desenho. Lembrando que as forças são aplicadas com sentido contrário do eixo global z.

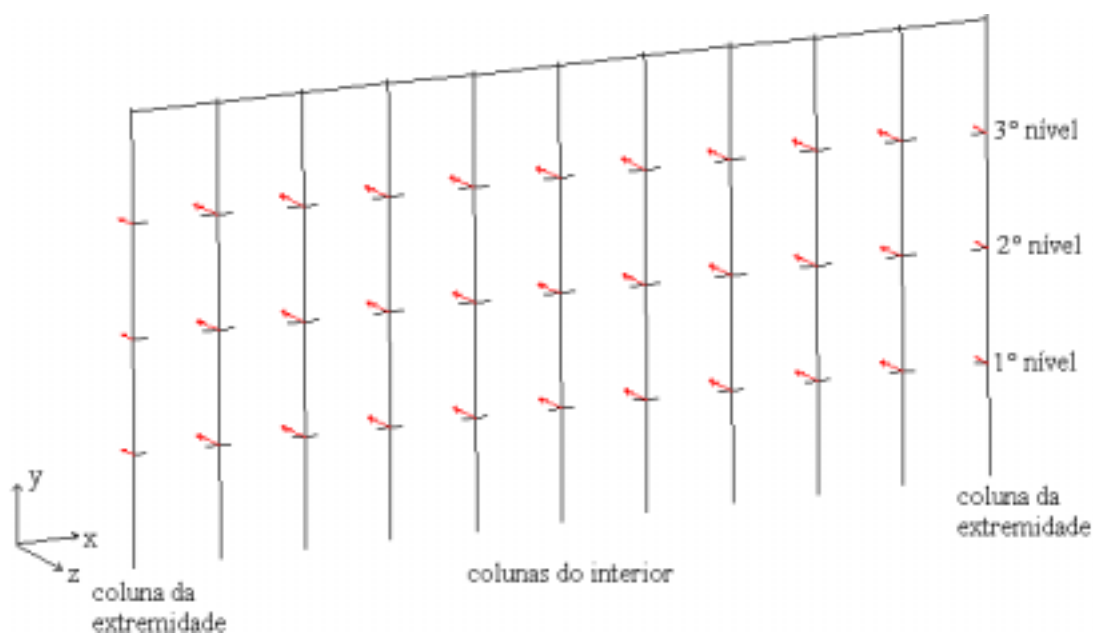


Figura 6.8 –Pontos de aplicação da força horizontal  $F_z$  no plano frontal.

Tabela 6.7 – Forças horizontais de  $F_z$  aplicadas na direção do eixo global z.

Altura	Colunas da extremidade (kN)	Colunas do interior (kN)
1º nível	0,418	0,856
2º nível	0,473	0,848
3º nível	0,518	0,847

Na direção do eixo global x, como forma de representar a imperfeição no plano XY, as forças horizontais  $F_x$  foram aplicadas no primeiro plano ZY nas mesmas alturas correspondentes aos pontos de conexão dos braços com as colunas. Porém, como estão sendo utilizadas prescrições do sistema *Porta-pallets* para o sistema *Drive-in*, e para esse na direção global x não há elementos para fazer a conexão entre as colunas, exceto as longarinas superiores, foi proposta uma outra distribuição das forças horizontais. Essa nova distribuição consiste de uma estrutura com a força horizontal  $F_x$  distribuída em todos os planos ZY, como forma de melhor representar a imperfeição no plano XY na estrutura do tipo *Drive-in*.

Assim na direção global  $x$ , as forças horizontais  $F_x$  foram posicionadas de duas maneiras: a primeira em que as forças  $F_x$  foram impostas somente no primeiro plano ZY, e a outra em que as forças  $F_x$  foram divididas para serem aplicadas em todos os planos ZY. A figura 6.9 apresenta os pontos de aplicação dessas forças para um plano padrão. As tabelas 6.8 e 6.9 se referem respectivamente aos valores das forças  $F_x$  para a estrutura em que apenas o 1º plano ZY é carregado e para a estrutura em que todos os planos são carregados. Recordando que o sentido de  $F_x$  é contrário ao do eixo global  $x$ .

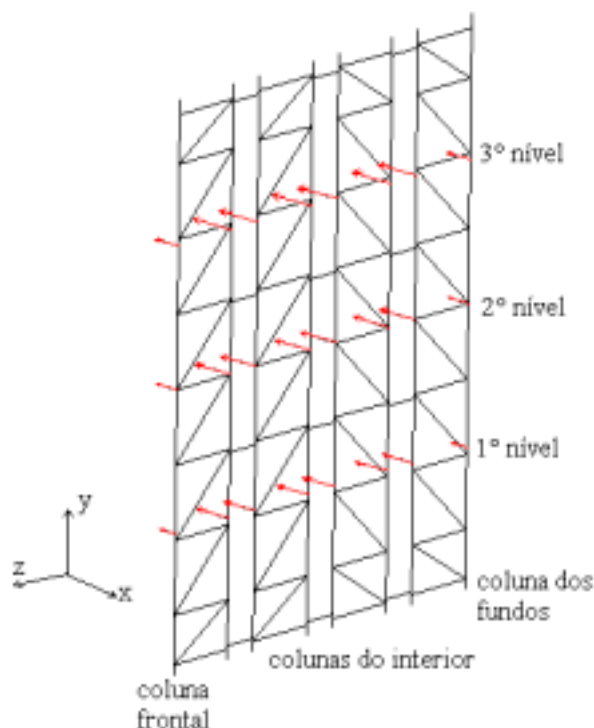


Figura 6.9 – Pontos de aplicação das forças horizontais  $F_x$  no plano padrão.

Tabela 6.8 – Valores das forças horizontais de  $F_x$  aplicadas apenas nos pontos do primeiro plano da estrutura na direção do eixo global  $x$ .

Altura	Coluna frontal	Colunas do interior	Coluna dos fundos
1º nível	0,740 kN	1,178 kN	0,799 kN
2º nível	0,705 kN	1,188 kN	0,772 kN
3º nível	0,755 kN	1,267 kN	0,824 kN

Tabela 6.9 – Valores das forças horizontais  $F_x$  aplicadas nos pontos de todos os planos da estrutura na direção do eixo global x.

Altura	Coluna frontal	Colunas do interior	Coluna dos fundos
1° nível	0,067 kN	0,107 kN	0,073 kN
2° nível	0,064 kN	0,108 kN	0,070 kN
3° nível	0,069 kN	0,115 kN	0,075 kN

Para que as estruturas com forças horizontais possam ser consideradas representativas da falta de prumo na estrutura tanto no plano XY como no plano ZY, os resultados encontrados nas colunas do sistema *Drive-in* para a estrutura perfeita com  $F_x$  e para a estrutura perfeita com  $F_z$ , devem ser maiores ou iguais aos resultados encontrados respectivamente para a estrutura imperfeita no plano XY e para a estrutura imperfeita no plano ZY.

As cargas de impacto vertical, provenientes do ato de armazenagem, só são consideradas no projeto para o dimensionamento das vigas e das suas ligações como especificado pelo RMI (1997). Como as análises a serem realizadas neste trabalho se concentram na verificação da estabilidade da estrutura como um todo, não será considerada a aplicação das cargas de impacto vertical.

Para realizar a análise bidimensional e comparar com os dados obtidos da análise tridimensional, foi modelado o primeiro plano do sistema *Drive-in* com todos os dados experimentais e sem utilizar as forças horizontais. A configuração do carregamento da estrutura bidimensional é equivalente ao esquema de carregamento da figura 6.10, sendo que as cargas concentradas representam o carregamento imposto pelos paletes que resulta em um valor concentrado de 1,751 kN na extremidade de cada braço.

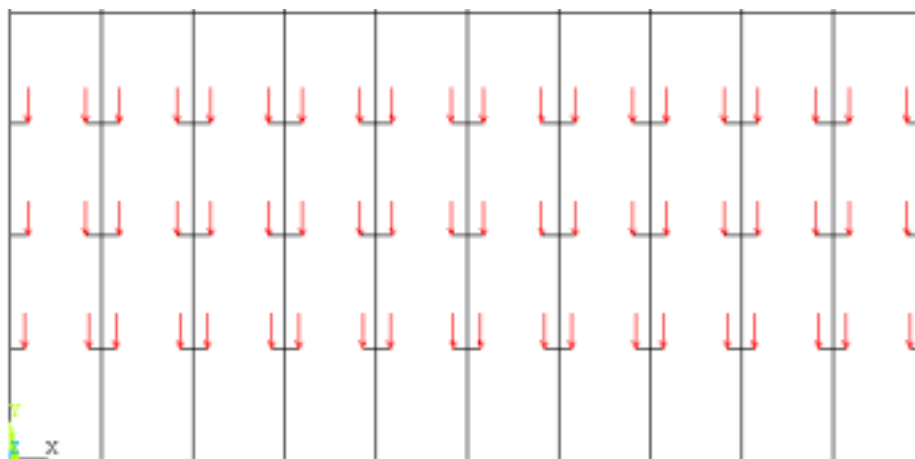


Figura 6.10 – Configuração de carregamento da estrutura bidimensional.

### 6.7. Avaliação da carga crítica da coluna do sistema *Drive-in*

Conforme apresentado no item 4.3, de acordo com as prescrições de norma, a determinação da carga crítica de flambagem elástica para a coluna do sistema *Drive-in* na direção longitudinal deve ser determinada através da análise utilizando as reais condições de carga do elemento.

Para avaliar a necessidade deste procedimento, foi modelada uma coluna do *Drive-in* considerando duas situações gerais: a primeira a coluna com carregamento aplicado na extremidade (Figura 6.11(a)), e a segunda, com as condições reais de carregamento (Figura 6.11(b)). Em ambas as colunas foram utilizadas as verdadeiras condições de apoio, considerando os valores reais de rigidez das ligações. Com estas colunas foi feita a resolução de um problema de autovalor para determinar a carga crítica das mesmas considerando duas condições de carregamento diferentes.

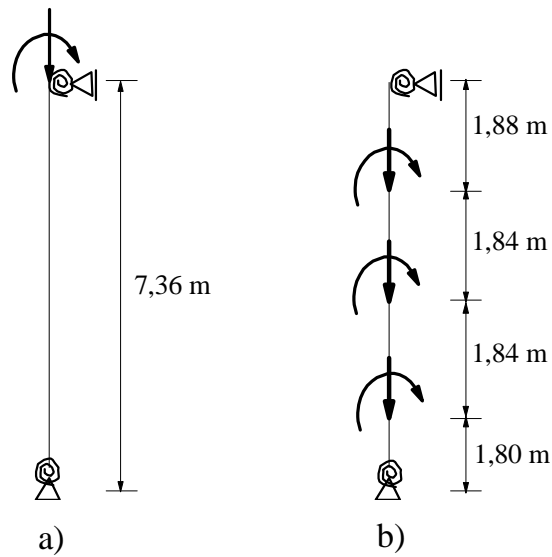


Figura 6.11 – Configuração de carregamento das colunas: (a) Carregamento apenas na extremidade; (b) Configuração real de carregamento.

A indicação dos momentos aplicados se referem aos momentos provenientes da carga aplicada na extremidade dos braços.

Os valores das cargas críticas encontrados nestas análises foram os menores valores de autovalor determinados na resolução do problema. A figura 6.12 apresenta um esquema das cargas críticas de cada coluna.

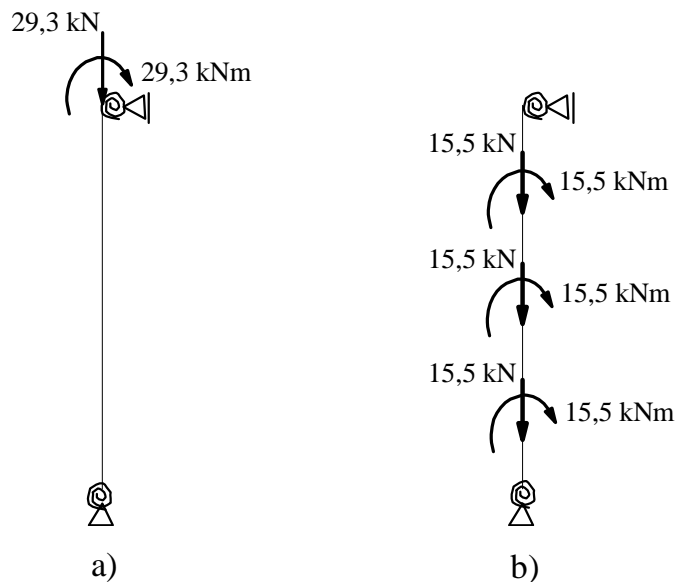


Figura 6.12 – Valores das cargas críticas para cada tipo de configuração de carregamento.

Os resultados obtidos indicam que a carga crítica total da situação de carregamento real é maior que aquela determinada para a coluna com carregamento apenas na extremidade. Estes resultados levam a estruturas mais econômicas e são mais consistentes com as formulações da teoria da estabilidade. Ressalta-se ainda que a determinação do coeficiente de flambagem pode ser obtida através da dedução analítica (Timoshenko e Gere (1963)).

## **Análise dos Resultados**

Para realizar as comparações entre os diferentes tipos de estruturas modeladas escolheram-se as colunas das extremidades direita e esquerda e a coluna central localizadas no 1° e no 7° plano. A numeração dos planos foi feita de modo crescente no sentido do aumento da profundidade da estrutura, sendo o painel contraventado dos fundos de número 8. Os esforços utilizados nas comparações das análises foram na maioria das vezes os resultados encontrados de momento fletor em torno do eixo global z, deslocamento sofrido na direção global x e os esforços axiais divididos pela área da seção transversal onde estes estão atuando. No corrente texto essa relação será chamada de relação esforço axial/área transversal. A figura 7.1 ilustra o posicionamento das colunas nos planos da estrutura tridimensional.

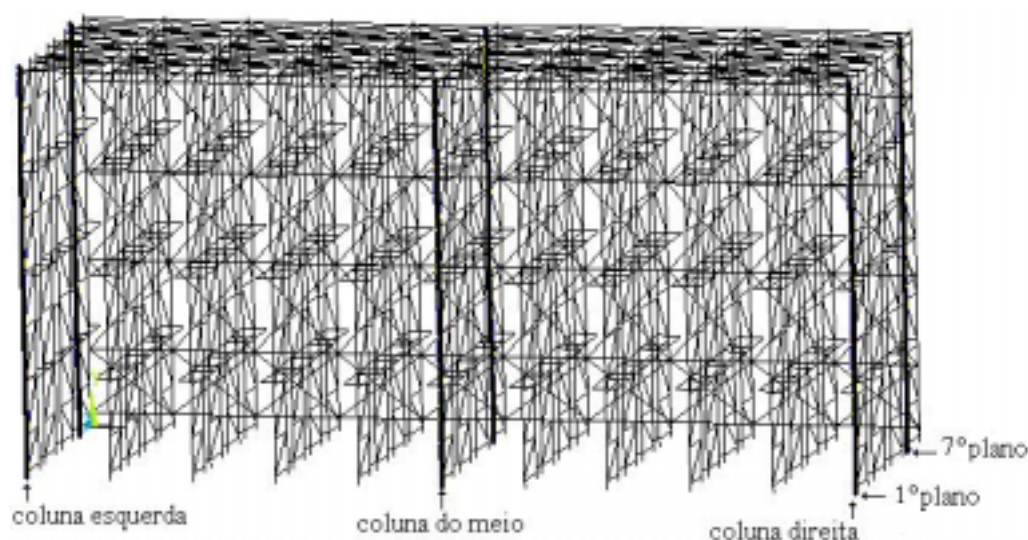


Figura 7.1 – Localização das colunas e dos planos na estrutura tridimensional.

A figura 7.2 apresenta a localização das colunas no plano utilizado para a análise bidimensional.

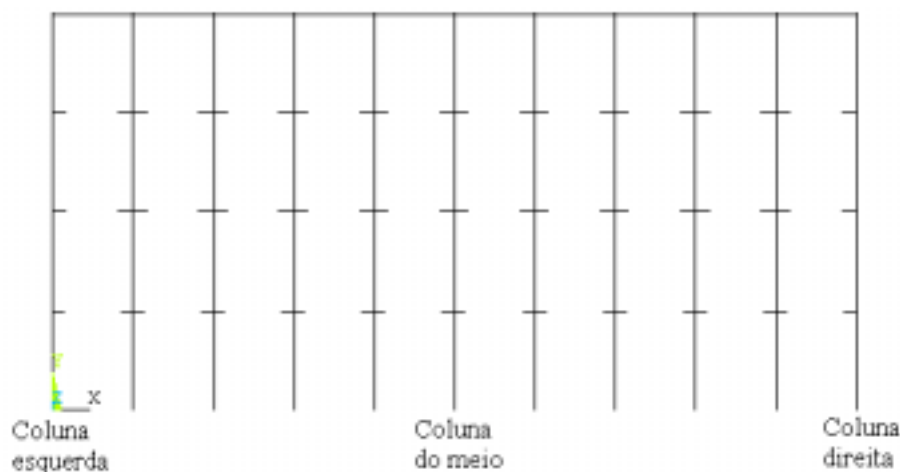


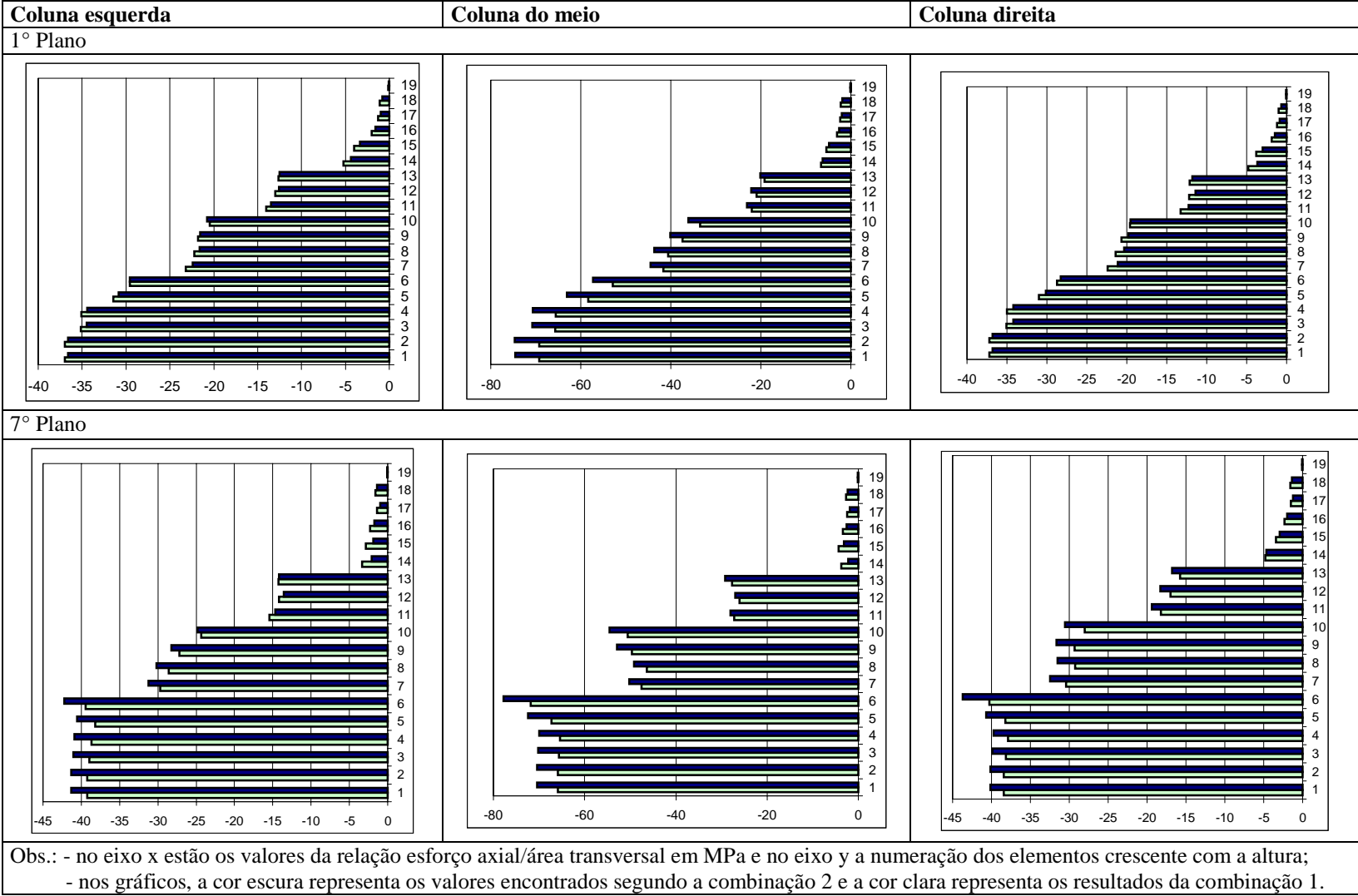
Figura 7.2 – Localização das colunas no plano da estrutura bidimensional.

### 7.1. Análise das combinações de carga

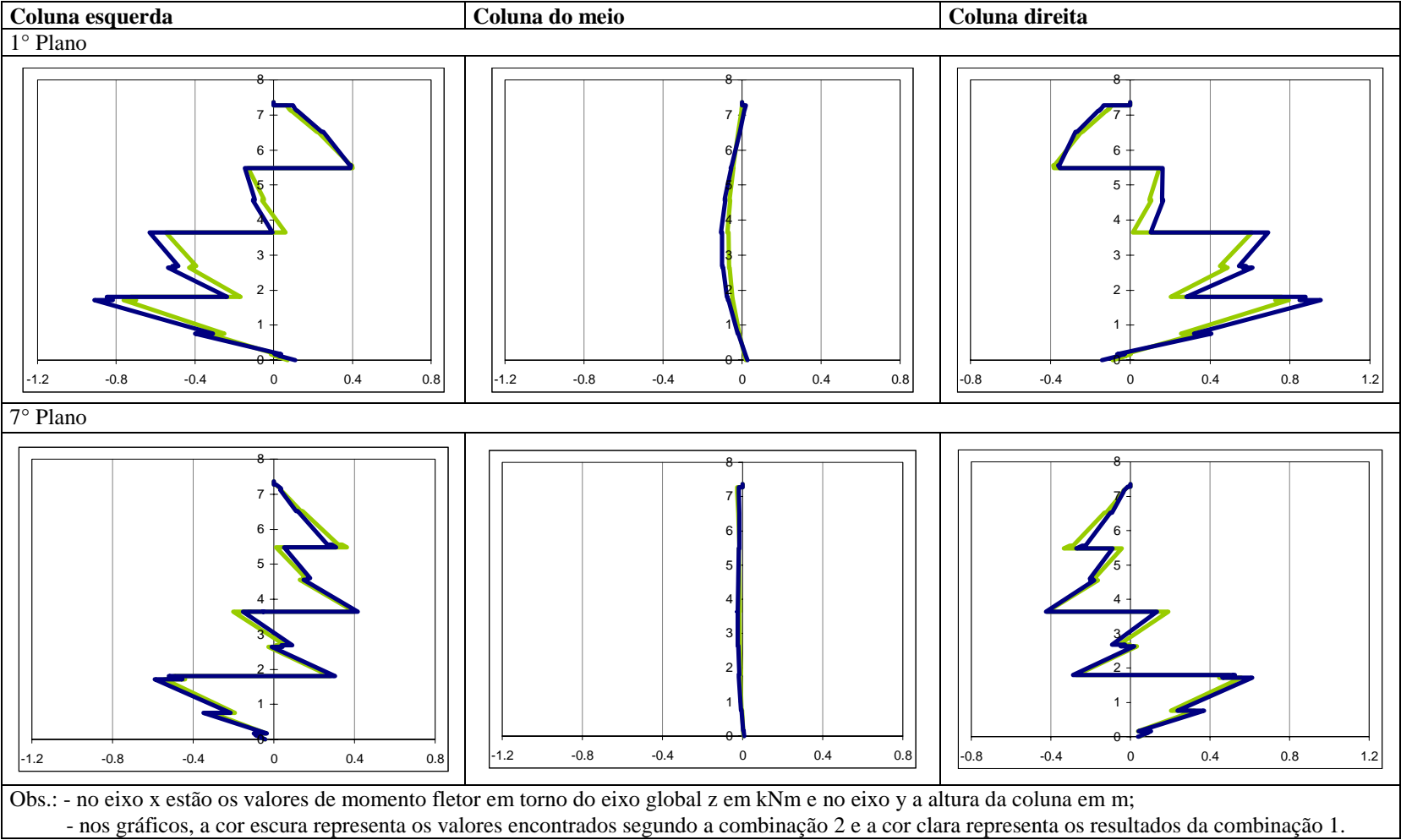
Das três combinações de carga especificadas pelo RMI (1997), apenas a de número 1 ( $1.4DL + LL + 1.2PL$ ) e a de número 2 ( $1.2DL + 1.6LL + 1.4PL$ ) foram consideradas para as análises, pois a de número 3 ( $1.2DL + 1.6LL + 1.4PL + 1.4Imp.$ ) só é admitida para o dimensionamento das vigas e suas conexões. É oportuno lembrar que em todas as três combinações as forças horizontais, quando utilizadas, são somadas com o seu valor nominal e que a carga de sobrecarga (LL) não é considerada.

Para se conhecer a combinação que impõe esforços de maior magnitude, como também para fazer um mapeamento da distribuição desses esforços nos elementos da estrutura, foi feita uma comparação entre os valores da relação esforço axial/área transversal e momento fletor em torno do eixo global z nas colunas da estrutura perfeita tridimensional com dados experimentais e a área efetiva calculada de acordo com a AISI (1996). Os dados experimentais aqui citados estão descritos na tabela 6.6. Os resultados utilizados nesta comparação são provenientes de uma análise não linear, tridimensional considerando as cargas de armazenagem e peso próprio multiplicadas pelos fatores da combinação de número 1 e de número 2. Foram feitos gráficos comparativos da relação esforço axial/área transversal e de momento fletor em torno do eixo global z para cada uma das colunas especificadas na figura 7.1. O quadro 7.1 apresenta os gráficos da relação esforço axial/área transversal e o quadro 7.2 apresenta os gráficos de momento fletor em torno do eixo global z.

Quadro 7.1 – Distribuição da relação esforço axial/área transversal nas colunas do 1º e 7º plano da estrutura 3D após análise não linear.



Quadro 7.2 – Distribuição de momento fletor em torno do eixo global z nas colunas do 1° e do 7° plano da estrutura tridimensional após análise não linear.



Os valores da relação esforço axial/área transversal encontrados para as estruturas modeladas com os dois tipos de combinação foram bem próximos, porém na maioria das vezes, principalmente nas colunas do sétimo plano, os valores dessa relação correspondentes à estrutura modelada com a combinação 2 são maiores. Em termos de momento fletor, em todas as colunas analisadas, a combinação de número 2 é a que impõe esforços de maior magnitude, por esse motivo todas as análises a seguir apresentadas foram considerando a combinação de cargas de número 2.

Outros fatos a considerar pela análise dos quadros 7.1 e 7.2 são que as colunas da direita e da esquerda possuem comportamento semelhante e o nível de momento fletor é considerável; a coluna do meio possui valores da relação esforço axial/área transversal de maior magnitude, mas o nível de momento fletor é muito baixo já que esta coluna recebe carregamento devido aos braços de ambos os lados o que serve para equilibrar os esforços de momento, e o sétimo plano possui valores da relação esforço axial/área transversal um pouco maior do que o do primeiro plano, porém o nível de momento fletor é mais baixo do que no primeiro. Em praticamente todas as análises a seguir apresentadas, serão sempre apresentados os resultados da coluna direita do primeiro plano, uma vez que esta possui comportamento semelhante ao da coluna esquerda, é mais afetada pela falta de estabilidade e a escolha do primeiro plano é devido aos valores maiores de esforços de flexão.

## **7.2. Estudo das análises linear e não linear**

Como apresentado no capítulo 6, a análise não linear realizada neste estudo considera a não linearidade geométrica e a não linearidade física, através da consideração do comportamento bilinear elasto-plástico do aço.

Para ressaltar a importância de uma análise não linear em relação a uma análise linear, a estrutura perfeita tridimensional com dados experimentais e a área efetiva calculada de acordo com a AISI (1996) que constam na tabela 6.6, foi analisada de forma linear e não linear considerando a carga de armazenagem e a ação do peso próprio. Os resultados da relação esforço axial/área transversal, de momento fletor em torno do eixo global z e de deslocamentos na direção global x nas colunas do 1º e 7º plano em cada análise foram comparados. Serão apresentados aqui apenas os resultados

referentes à coluna direita do 1º plano, uma vez que esta possui comportamento semelhante ao da coluna esquerda e apresenta maiores esforços. A figura 7.3 apresenta os valores da relação esforço axial/área transversal na coluna direita resultantes de uma análise linear e uma análise não linear. A numeração dos elementos cresce de acordo com a altura da coluna.

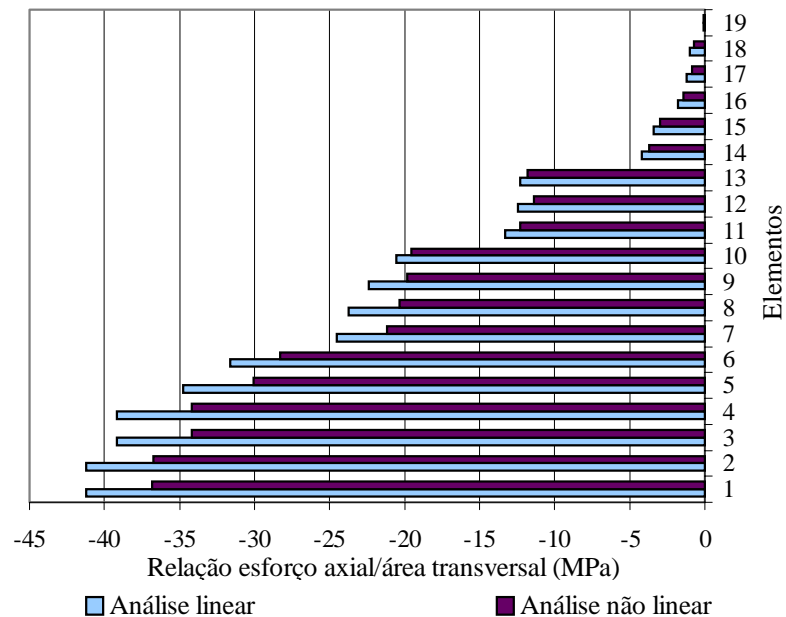


Figura 7.3 – Comparação das análises linear e não linear através da relação esforço axial/área transversal na coluna direita no 1º plano da estrutura tridimensional.

Pela análise da figura 7.3 observa-se que os resultados encontrados para a relação esforço axial/área transversal segundo a análise não linear são menores. Nos elementos onde os níveis dessa relação são mais elevados, o valor encontrado para a análise não linear corresponde a 89% do valor encontrado para a análise linear.

Nas figuras 7.4 e 7.5 estão representados respectivamente os resultados de momento fletor em torno do eixo global z e os deslocamentos na direção global x da coluna direita do 1º plano.

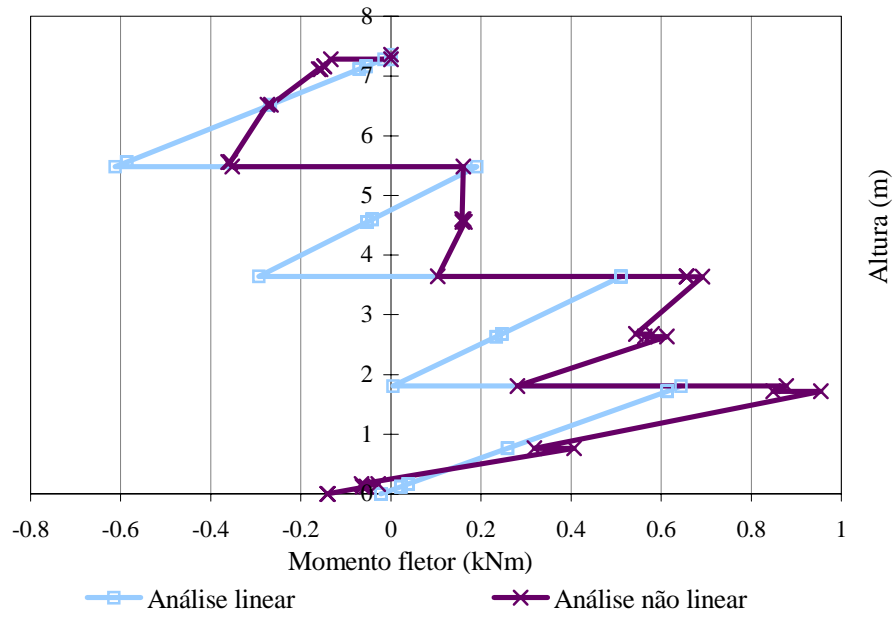


Figura 7.4 – Comparação dos resultados de momento fletor em torno do eixo global z da coluna direita do 1º plano da estrutura tridimensional.

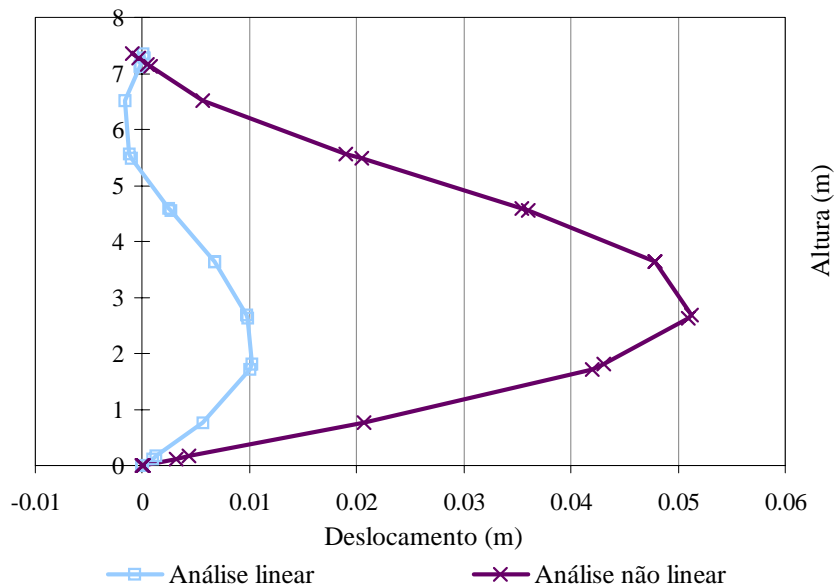


Figura 7.5 – Comparação dos deslocamentos na direção global x da coluna direita do 1º plano da estrutura tridimensional.

Nas figuras 7.4 e 7.5 nota-se que tanto os valores de momento fletor em torno do eixo global z, como os deslocamentos na direção global x, são maiores quando se trata

de uma análise não linear. Isto é devido ao fato da análise não linear considerar os efeitos de segunda ordem, o que gera um aumento no nível de deslocamentos e por consequência maiores níveis de momento fletor.

As figuras 7.6 e 7.7 apresentam respectivamente a configuração deformada em relação ao eixo global x da estrutura tridimensional feita através de uma análise linear e de uma análise não linear. Ambas as figuras estão com os deslocamentos ampliados em 80 vezes.

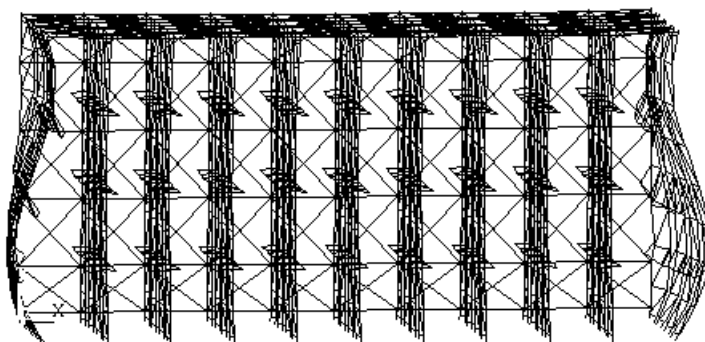


Figura 7. 6 – Configuração deformada em relação ao eixo global x da estrutura sob uma análise linear.

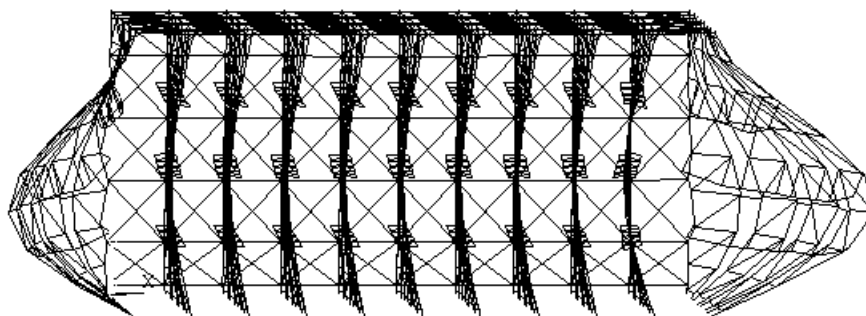


Figura 7. 7 – Configuração deformada em relação ao eixo global x da estrutura sob uma análise não linear.

Pela comparação das duas configurações da estrutura deformada na direção do eixo global x (Figura 7.6 e 7.7), pode-se observar a grande diferença entre os dois tipos de análises.

Analisou-se ainda se o comportamento da estrutura atingiu o limite elástico do aço sendo observado que este limite não foi ultrapassado. Assim a não linearidade significativa nas análises da estrutura em estudo é a não linearidade geométrica.

A figura 7.8 apresentada um gráfico carga versus deslocamento que ilustra o comportamento não linear da estrutura. Os deslocamentos são correspondentes a um ponto na coluna direita do 1º plano que mais se deslocou na direção global x.

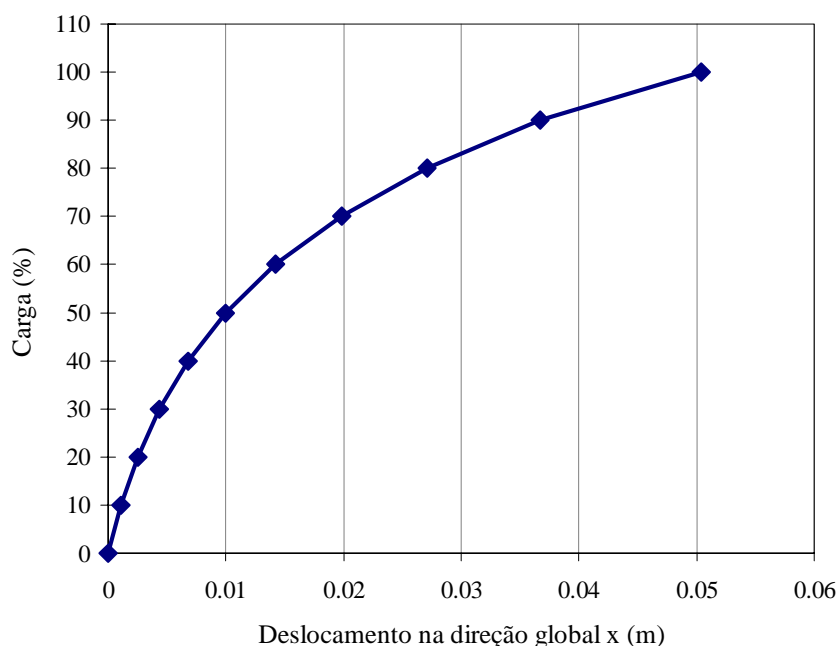


Figura 7.8 – Gráfico carga versus deslocamento.

Por este gráfico observa-se que o comportamento não linear da estrutura é devido a sua não linearidade geométrica concluindo-se que a análise não linear se faz obrigatória.

### 7.3. Estudo das análises bidimensional e tridimensional

Foi realizada uma comparação entre uma análise tridimensional e uma bidimensional através dos resultados da relação esforço axial/área transversal e momento fletor em torno do eixo global z da coluna direita do primeiro plano da estrutura tridimensional (Figura 7.1), com a coluna direita da estrutura bidimensional (Figura 7.2). Essas análises foram não linear considerando uma estrutura perfeita com

dados experimentais e área efetiva da coluna calculada de acordo com a AISI, sendo que o carregamento foi a carga de armazenagem distribuída em toda a estrutura e o peso próprio. Os dados experimentais, juntamente com o valor da área efetiva da coluna, constam na tabela 6.6. A figura 7.9 apresenta as comparações da relação esforço axial/área transversal na coluna direita, sendo que a numeração dos elementos cresce de acordo com a altura da coluna. Na figura 7.10 estão representados os resultados de momento fletor em torno do eixo global z para a coluna direita.

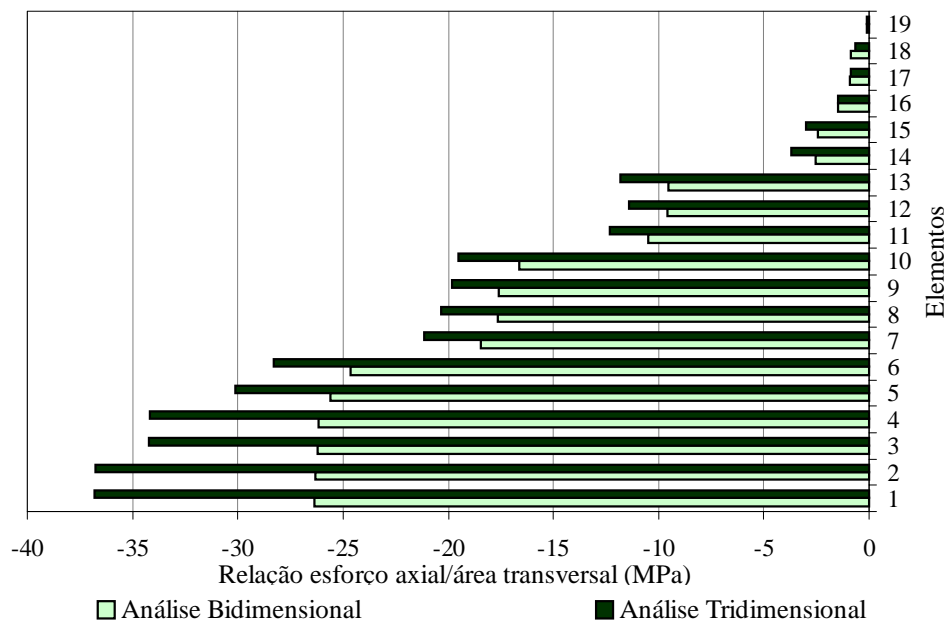


Figura 7.9 – Comparação das análises bidimensional e tridimensional através dos resultados da relação esforço axial/área transversal na coluna direita.

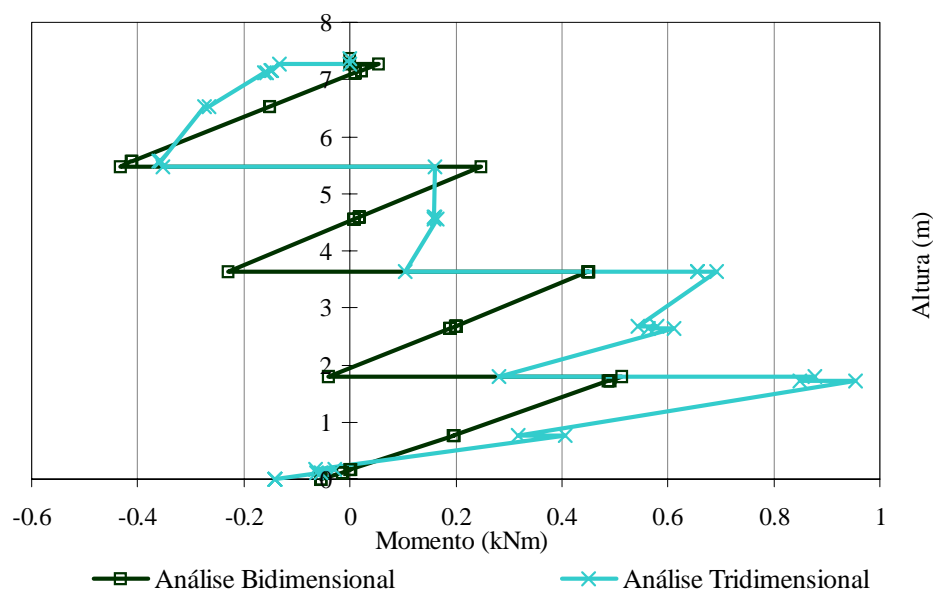


Figura 7.10 – Comparação das análises bidimensional e tridimensional através dos resultados de momento fletor em torno do eixo global z na coluna direita.

Em ambas as comparações acima citadas, é facilmente percebido que os resultados tanto da relação esforço axial/área transversal como de momento fletor são maiores quando a análise é tridimensional. Nos elementos da coluna que são mais solicitados, os valores encontrados para a análise bidimensional são de 72% e 51%, respectivamente, dos valores encontrados da relação esforço axial/área transversal e do momento fletor para a estrutura tridimensional. Isto é compreensível já que o sistema *Drive-in* possui uma grande interação entre os seus elementos, o que gera uma transferência de esforços entre os mesmos. Logo a análise tridimensional fornece resultados mais realistas.

#### 7.4. Eficiência do plano de contraventamentos dos fundos

A perda de eficiência do plano de contraventamentos dos fundos na estabilidade das colunas à medida que aumenta a profundidade do *rack* foi analisada comparando o deslocamento na direção do eixo global x de uma coluna direita localizada no primeiro plano e no sétimo plano. Para fazer este estudo foi analisada não linearmente uma estrutura perfeita com dados experimentais e área efetiva da coluna calculada de acordo

com a AISI, sendo que as cargas consideradas foram a carga de armazenagem distribuída em toda a estrutura e o peso próprio. Os dados experimentais citados estão referenciados na tabela 6.6. A figura 7.11 apresenta a comparação entre os deslocamentos na direção global x para a coluna direita do primeiro e do sétimo plano.

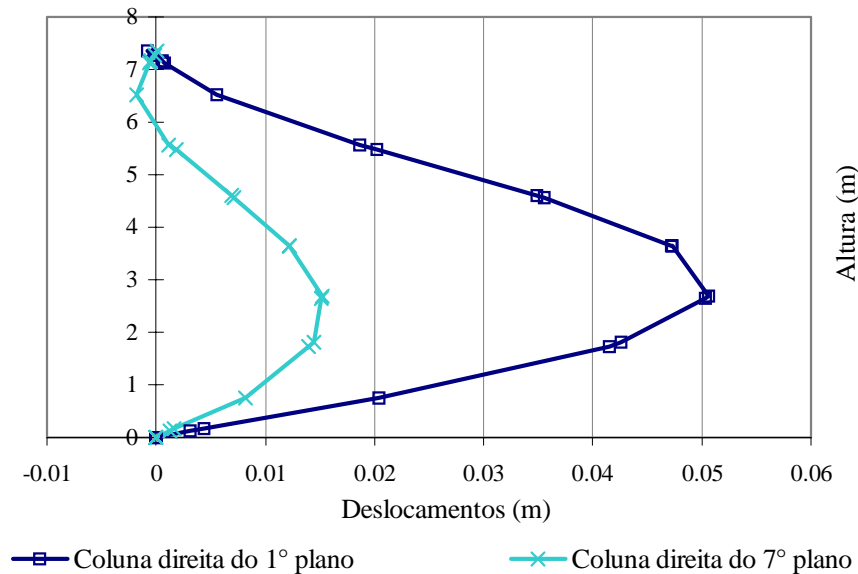


Figura 7.11 – Comparação dos deslocamentos na direção do eixo global x entre as colunas direitas do 1º plano e do 7º plano.

A diferença no deslocamento na direção x da coluna no 1º plano para a coluna no 7º plano confirma a perda de influência do plano de contraventamento dos fundos nas colunas frontais.

### 7.5. Análise dos dados experimentais

Primeiramente foi feita uma análise tridimensional não linear de forma a adaptar as prescrições do RMI à norma brasileira NBR-14672. Para isso foi analisada uma estrutura perfeita com todos os dados experimentais obtidos (Tabela 6.6), ora utilizando o valor da área calculada de acordo com a AISI, ora utilizando o valor da área calculada segundo a NBR-14672. A área calculada de acordo com a norma brasileira foi maior em relação à área calculada pela AISI, isso porque a tensão nominal calculada pela NBR-14672 é menor devido à consideração da flambagem por distorção, a qual é

desconsiderada no cálculo através da AISI. A figura 7.12 apresenta a comparação da relação esforço axial/área transversal e a figura 7.13 a comparação da distribuição do momento fletor em torno do eixo global z, ambas na coluna direita do 1º plano.

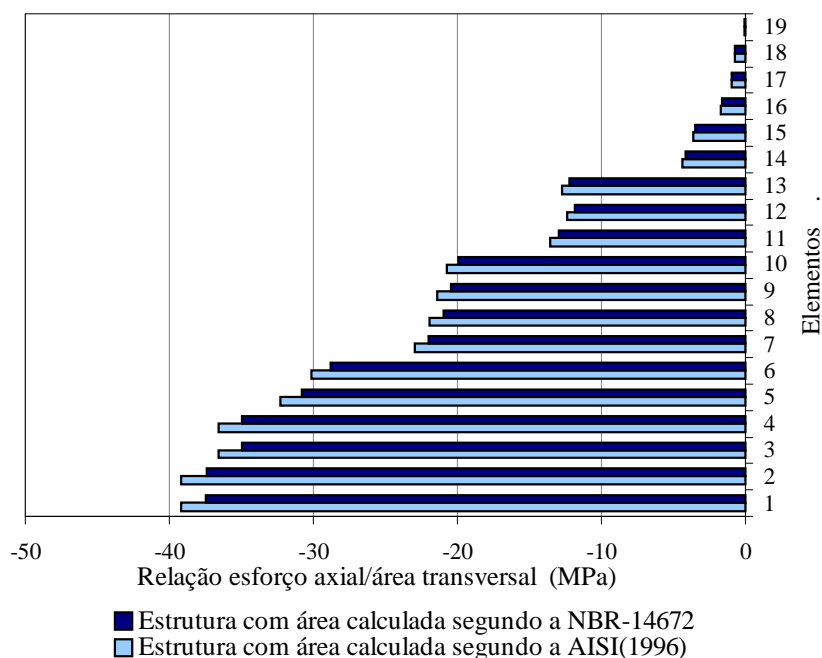


Figura 7.12 – Comparação da relação esforço axial/área transversal na coluna direita do 1º plano de estruturas com áreas calculadas segundo a NBR-14672 e a AISI (1996).

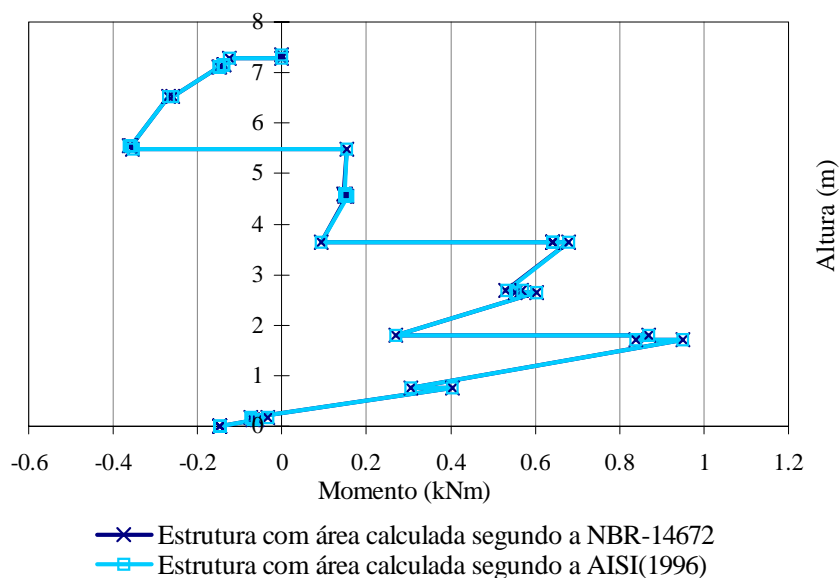


Figura 7.13 – Comparação dos esforços de flexão no eixo global z na coluna direita do 1º plano de estruturas com áreas calculadas segundo a NBR-14672 e a AISI (1996).

A pequena diferença nos valores das áreas, de 4% em relação à área calculada pela AISI, conduz como era previsto, a uma desigualdade no nível da maior relação esforço axial/área transversal de 4,5% em relação à estrutura calculada com a área segundo a AISI (Figura 7.12). No nível de momento fletor os resultados são praticamente idênticos, a diferença está na faixa de 0,4% (Figura 7.13). Os valores menores da relação esforço axial/área transversal na estrutura com a área efetiva calculada de acordo com a NBR-14672 se justificam devido ao valor maior da área efetiva. Embora esses valores dessa relação serem menores, a consideração da norma brasileira NBR-14672 é válida, pois considera o modo distorcional de flambagem.

Posteriormente à análise de adaptação das prescrições do RMI à norma brasileira NBR-14672, foi avaliada a importância da consideração dos dados experimentais na análise de estruturas do tipo *Drive-in* pela comparação dos resultados de análises feitas considerando a estrutura com todos os dados experimentais e a estrutura com dados nominais de projeto. A estrutura com os dados experimentais utiliza a área calculada de acordo com a NBR-14672. Todos os valores correspondentes aos dados experimentais e nominais de projeto estão referenciados na tabela 6.6.

As análises feitas foram não linear, tridimensional considerando o peso próprio da estrutura e toda a carga de armazenagem. As figuras 7.14 e 7.15 apresentam respectivamente as comparações da relação esforço axial/área transversal e de momento fletor em torno do eixo global z da coluna direita do primeiro plano.

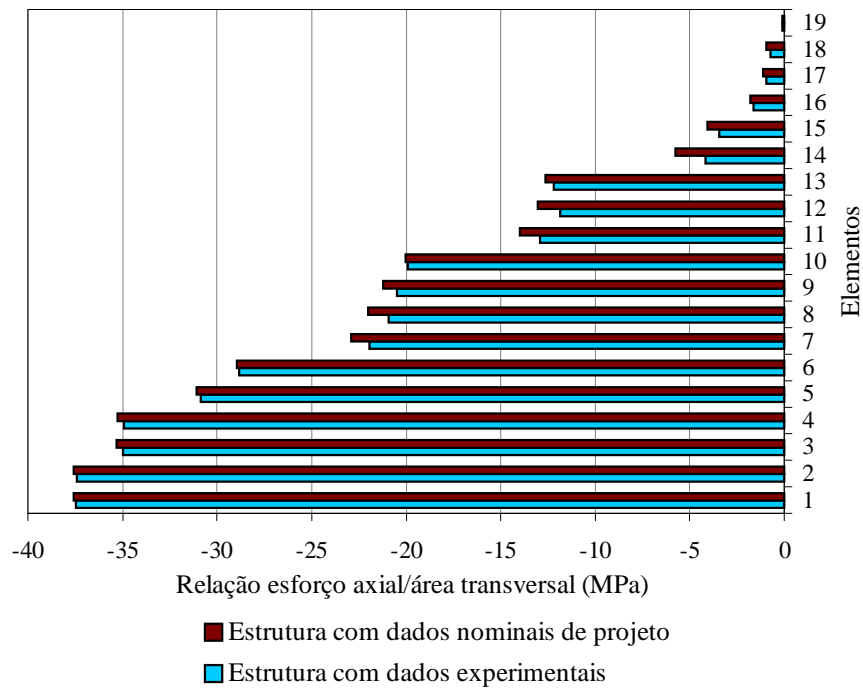


Figura 7.14 – Gráfico comparativo da relação esforço axial/área transversal da coluna direita do 1º plano da estrutura com dados experimentais e com dados nominais de projeto.

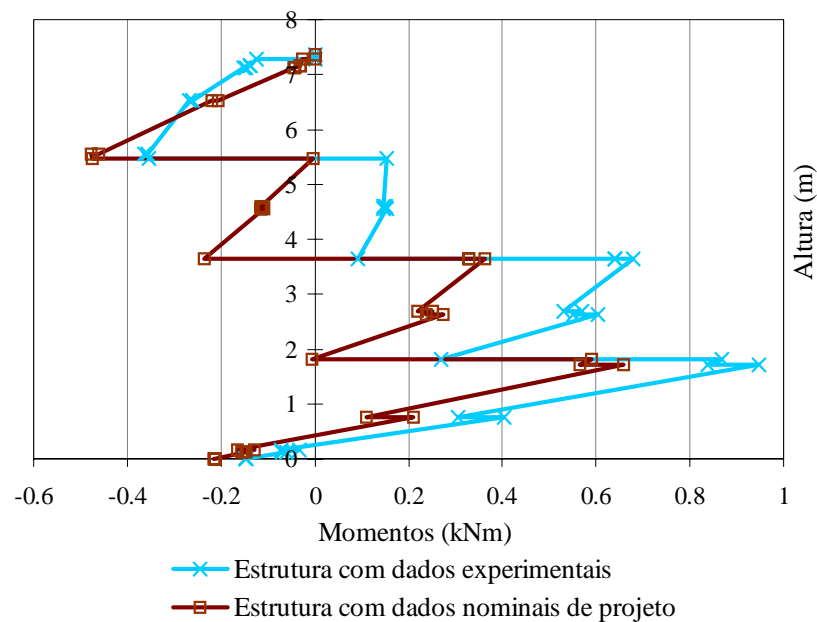


Figura 7.15 – Gráfico comparativo de momento fletor em torno do eixo global z da coluna direita do 1º plano da estrutura com dados experimentais e com dados nominais de projeto.

Da comparação entre os resultados experimentais e de projeto, observa-se que em termos da relação esforço axial/área transversal a diferença é de 0,3% nos elementos de maior esforço (Figura 7.14). Já quando comparados os níveis de momento fletor, os resultados relativos à estrutura com dados experimentais são 44% maiores do que os resultados da estrutura com dados experimentais (Figura 7.15). Desta análise observa-se a importância de se considerar os dados experimentais no cálculo da estrutura, pois o momento fletor é um esforço preponderante no dimensionamento.

## **7.6. Análise das forças horizontais**

Para validar as forças horizontais como forma de considerar a falta de prumo na estrutura, os resultados encontrados na análise da estrutura imperfeita e os resultados da estrutura com forças horizontais devem ser semelhantes. Para isso, foi feita uma análise linear tridimensional das estruturas imperfeitas e das estruturas perfeitas com as forças horizontais. As características das estruturas chamadas perfeitas e imperfeitas estão na tabela 6.5. Em todas as análises as estruturas estudadas estavam com os dados de projeto (Tabela 6.6), sendo que a ligação coluna-placa de base foi considerada rotulada. Em todas as estruturas foram considerados o seu peso próprio e a carga de armazenagem, sendo que nas estruturas perfeitas foram aplicadas as forças horizontais, o que não aconteceu nas estruturas imperfeitas. Lembrando que as forças horizontais são empregadas em seu valor nominal.

### **7.6.1. Forças horizontais na direção do eixo global z**

As forças horizontais aplicadas na direção do eixo global z, como forma de representar a estrutura fora do prumo no plano ZY, foram aplicadas apenas no plano frontal XY (Figura 6.8). A aplicação das forças  $F_z$  apenas no plano frontal se deve ao fato de que na direção do eixo global z existem elementos interligando uma coluna a outra que fazem a transferência das forças horizontais para as colunas posteriores. Devido a esta transferência de esforços, as estruturas perfeitas com as forças horizontais aplicadas possuem distribuição diferenciada dos níveis de esforço axial de acordo com o plano em estudo. Em termos de esforços de flexão em torno do eixo z não existe essa

diferença de plano para plano. As figuras 7.16 e 7.17 apresentam respectivamente uma comparação da relação esforço axial/área transversal para a coluna direita situada no 1° e no 2° plano, já as figuras 7.18 e 7.19, mostram a distribuição de momento fletor em torno do eixo global z para essa mesma coluna nos dois planos.

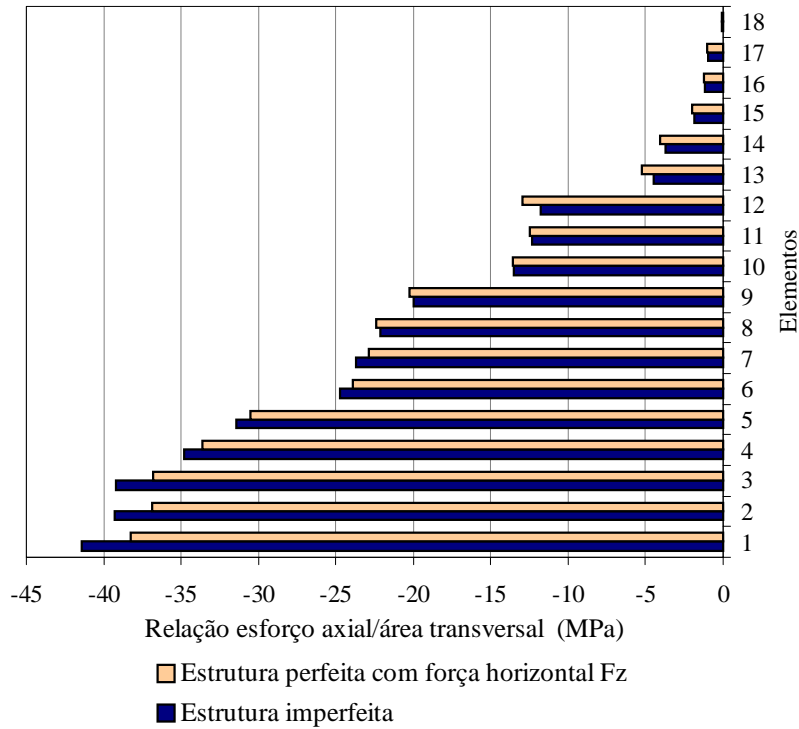


Figura 7.16 – Comparação da relação esforço axial/área transversal na coluna direita do 1° plano para estruturas representando a falta de prumo no plano ZY.

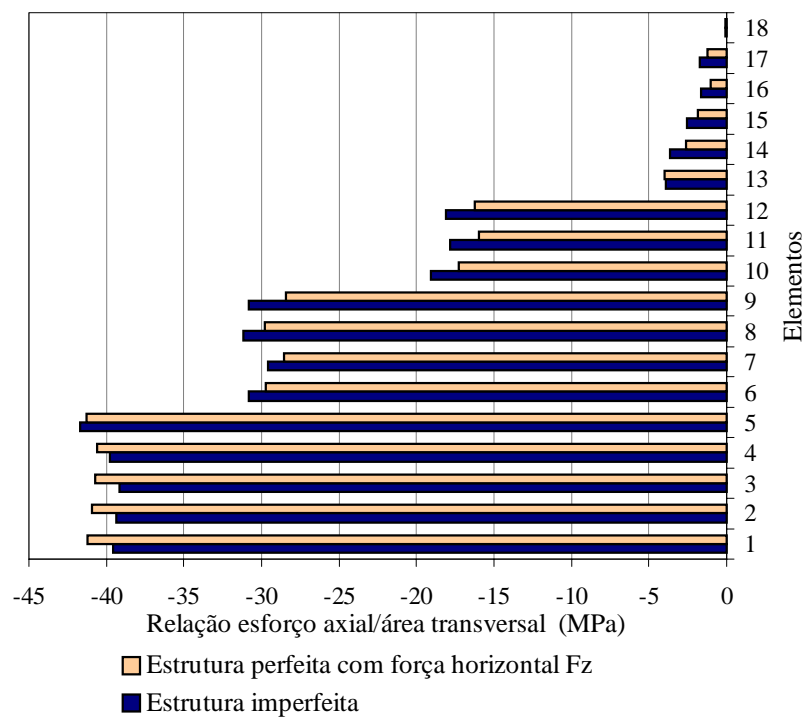


Figura 7.17 – Comparação da relação esforço axial/área transversal na coluna direita do 2º plano para estruturas representando a falta de prumo no plano ZY.

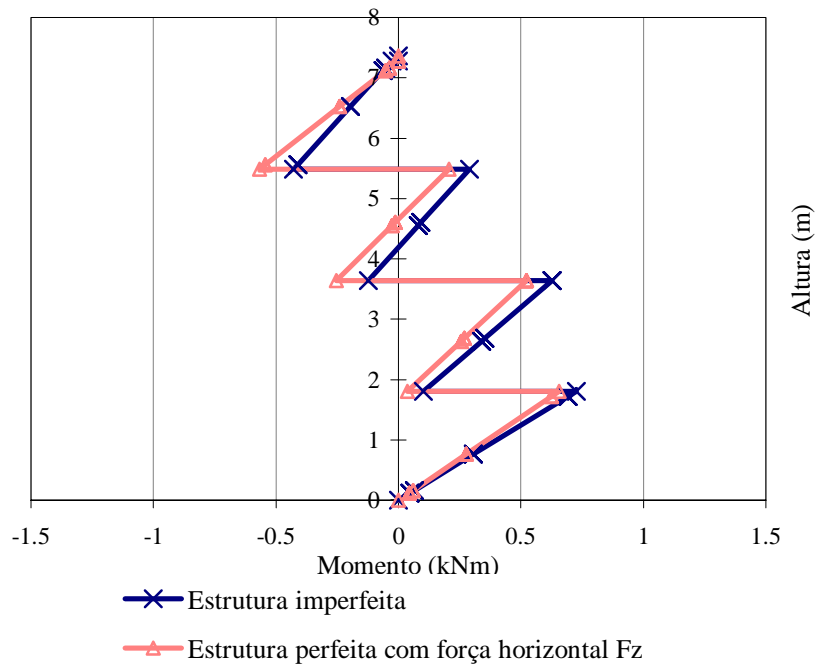


Figura 7.18 – Comparação de momento fletor em torno do eixo global z na coluna direita do 1º plano para estruturas representando a falta de prumo no plano ZY.

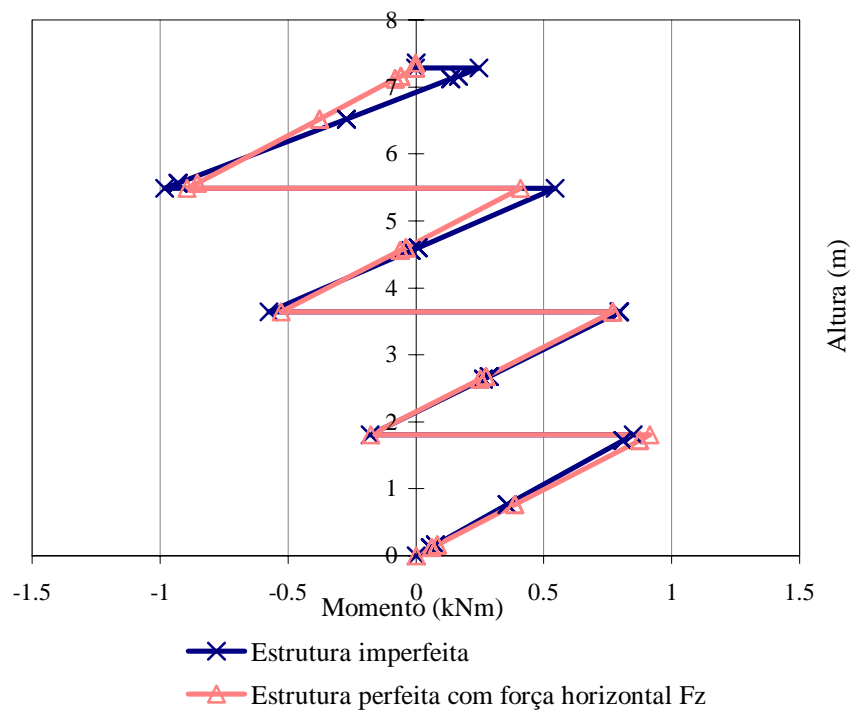


Figura 7.19 – Comparação de momento fletor em torno do eixo global z na coluna direita do 2º plano para estruturas representando a falta de prumo no plano ZY.

Com estas análises percebe-se que a estrutura perfeita com força horizontal  $F_z$ , não forneceu resultados muito semelhantes aos valores encontrados para a estrutura imperfeita no plano ZY. Houve uma variação na relação esforço axial/área transversal dependendo do plano analisado. Isto se justifica através da transferência de esforços entre os elementos de contraventamento. Essa diferença nos níveis da relação esforço axial/área transversal das estruturas perfeitas com força horizontal  $F_z$ , ora eram maiores, ora eram menores do que os valores encontrados para a estrutura imperfeita (Figura 7.16 e 7.17). Em termos de esforços de flexão em torno do eixo global z (Figura 7.18 e 7.19) os resultados encontrados mostram uma variação menor no nível de esforços que aquela relativa a relação esforço axial/área transversal. Nos dois planos a estrutura perfeita com força horizontal forneceu valores menores de momento fletor em torno do eixo global z do que os resultados encontrados para a estrutura imperfeita. No primeiro plano, considerando o maior valor de esforço na coluna, o valor do momento fletor da estrutura perfeita com força horizontal foi de 9,7% menor em relação ao momento fletor da

estrutura imperfeita. Destas análises concluiu-se que as forças horizontais  $F_z$  não bem representam as imperfeições no plano ZY.

### 7.6.2. Forças horizontais na direção do eixo global x

As forças horizontais  $F_x$  foram primeiramente impostas apenas no 1º plano ZY. Os resultados encontrados dessa análise foram comparados com os valores obtidos da análise da estrutura imperfeita no plano XY. A figura 7.20 apresenta uma comparação dos resultados de momento fletor em torno do eixo global z da coluna direita do 1º plano.

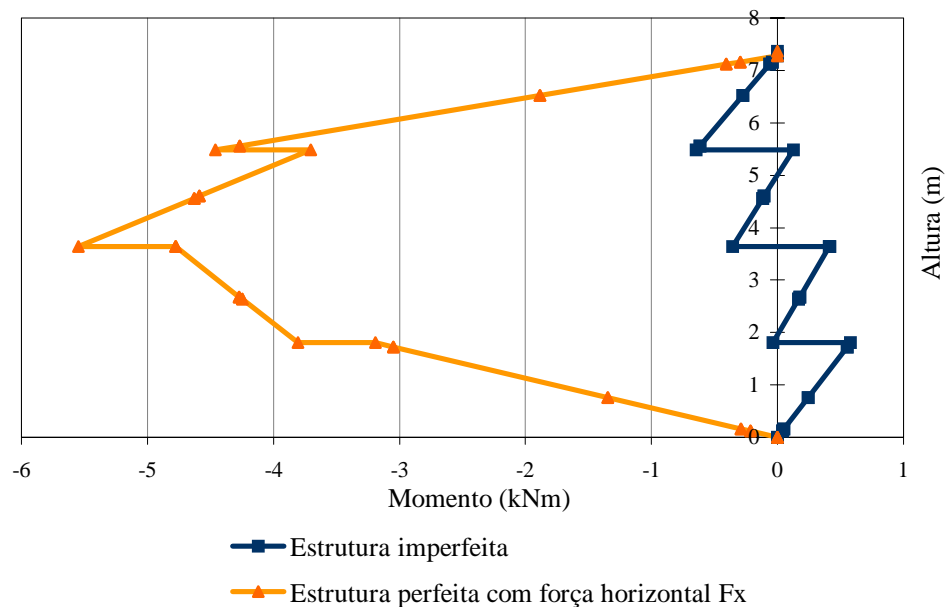


Figura 7.20 – Comparação de momento fletor em torno do eixo global z da coluna direita do 1º plano para estruturas representando a imperfeição no plano XY - forças horizontais  $F_x$  dispostas apenas no 1º plano.

Pela análise do gráfico acima, nota-se que a aplicação das forças horizontais apenas no 1º plano ZY não permite uma resposta da estrutura semelhante aos resultados encontrados para a estrutura imperfeita. Isto ocorre devido à ausência de vigas interligando as colunas, o que levou a se considerar uma distribuição das forças horizontais em todos os planos para melhor representar a falta de prumo na estrutura.

Essas forças horizontais  $F_x$  distribuídas em todos os planos geram uma configuração de esforços axiais e de flexão diferenciada para a coluna da extremidade direita e da extremidade esquerda. Isto ocorre porque nesta situação de forças horizontais com sentido contrário ao sentido do eixo, a coluna direita terá os seus valores de momento aumentados devido à superposição dos esforços de flexão transmitidos dos braços com os esforços de flexão provenientes das forças horizontais. Já a coluna esquerda estará em situação oposta, pois as forças horizontais geram momento em sentido contrário aos momentos transmitidos pelos braços. A figura 7.21 apresenta um plano da estrutura deslocada na direção do eixo global  $x$  que ajuda a entender a diferença nos esforços das colunas da extremidade direita e da esquerda.

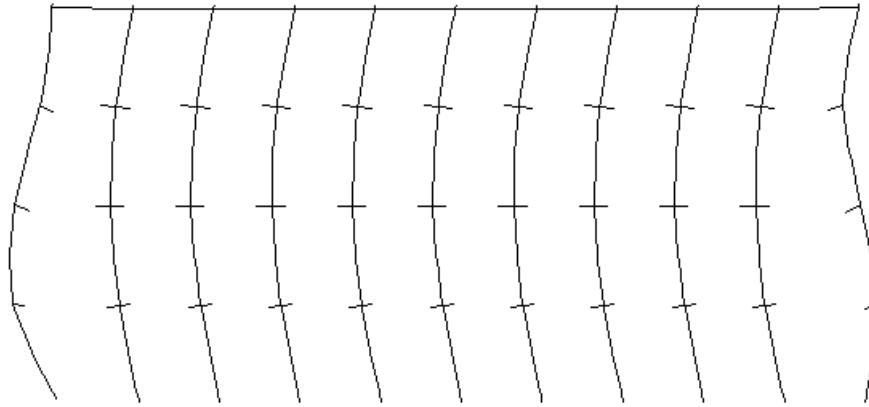


Figura 7.21 – Plano da estrutura deslocada na direção global  $x$  após a aplicação das forças horizontais em todos os planos.

As figuras a seguir apresentam uma comparação dos valores da relação esforço axial/área transversal calculados para a estrutura imperfeita e para a estrutura perfeita com as forças horizontais  $F_x$  dispostas em todos os planos. As figuras 7.22 e 7.23 apresentam os resultados da coluna da extremidade direita e da extremidade esquerda do 1º plano, respectivamente.

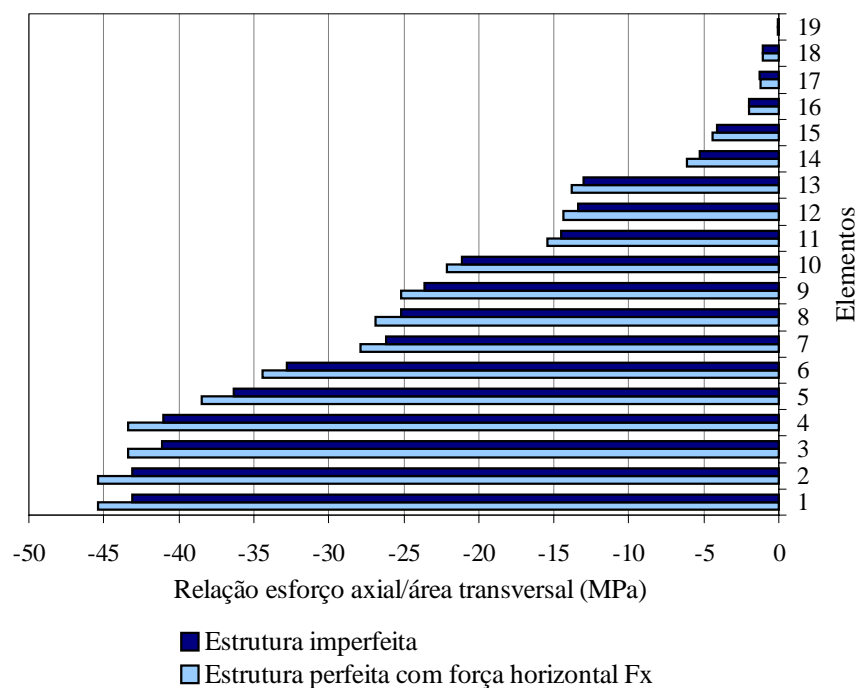


Figura 7.22 – Comparação da relação esforço axial/área transversal na coluna direita do 1º plano para estruturas representando a falta de prumo no plano XY - forças horizontais Fx dispostas em todos os planos.

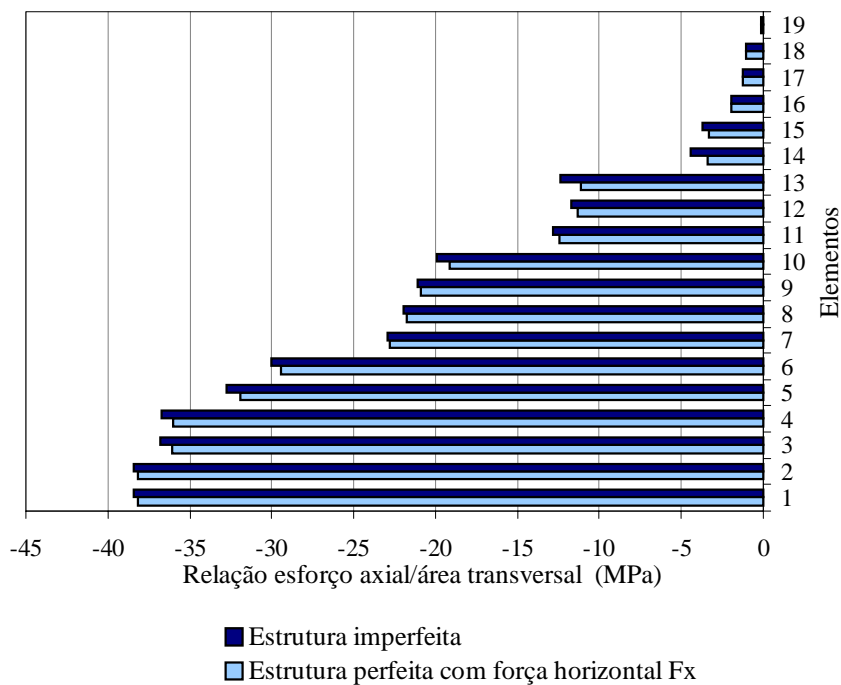


Figura 7.23 – Comparação da relação esforço axial/área transversal na coluna esquerda do 1º plano para estruturas representando a falta de prumo no plano XY - forças horizontais Fx dispostas em todos os planos.

Comparando os resultados da relação esforço axial/área transversal, nota-se que para a coluna direita, a estrutura perfeita com força horizontal forneceu valores maiores na ordem de 5% em relação à estrutura imperfeita. Já na coluna esquerda os maiores valores da relação esforço axial/área transversal foram da estrutura imperfeita, porém essa diferença é muito pequena, da ordem de 0,6%.

As próximas comparações são entre esforços de flexão em torno do eixo global z calculados para a estrutura imperfeita e para a estrutura perfeita com as forças horizontais  $F_x$  dispostas em todos os planos. As figuras 7.24 e 7.25 apresentam, respectivamente, os valores encontrados para a coluna da extremidade direita e da extremidade esquerda.

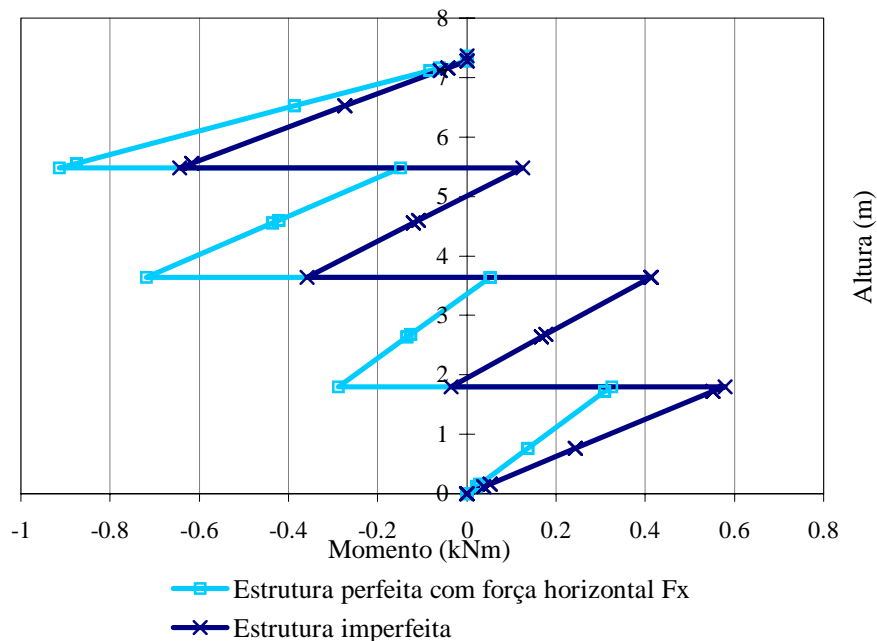


Figura 7.24 – Comparação de momento fletor em torno do eixo global z na coluna direita do 1º plano para estruturas representando a falta de prumo no plano XY - forças horizontais  $F_x$  dispostas em todos os planos.

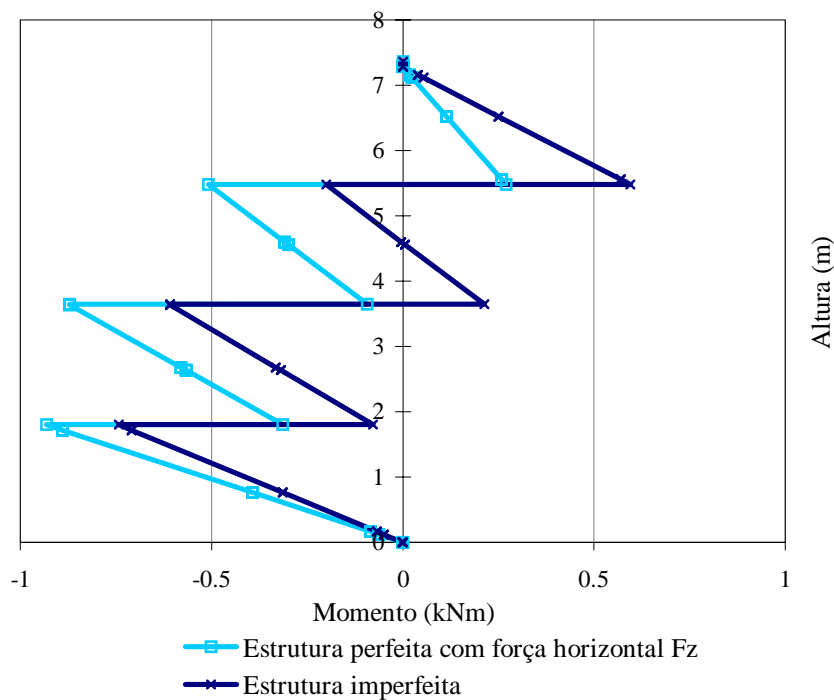


Figura 7.25 – Comparação de momento fletor em torno do eixo global z na coluna esquerda do 1º plano para estruturas representando a falta de prumo no plano XY - forças horizontais  $F_x$  dispostas em todos os planos.

Na comparação dos momentos fletores em torno do eixo global z, tanto na coluna direita quanto na coluna esquerda a estrutura perfeita com a força horizontal aplicada forneceu resultados maiores do que a estrutura imperfeita. Nas duas colunas, nos elementos mais solicitados, a diferença nos maiores valores está na faixa de 42% e 26% para a coluna direita e para a esquerda, respectivamente em relação aos resultados encontrados para a estrutura imperfeita.

Portanto, da análise dos resultados da relação esforço axial/área transversal e de esforço de flexão, conclui-se que as forças horizontais  $F_x$  são adequadas para representar a estrutura imperfeita no plano ZY, ressaltando, porém que essas forças devem ser distribuídas em todos os planos perpendiculares a direção do eixo global x, sendo esta uma recomendação deste trabalho.

## **Considerações Finais**

O principal objetivo deste trabalho foi fazer um estudo do sistema de armazenagem industrial do tipo *Drive-in* adaptando as prescrições do RMI a este sistema. Além disso, houve um estudo para avaliar a norma brasileira NBR-14672 em relação às prescrições da norma americana do RMI. Essa modificação se refere ao cálculo da tensão nominal de acordo com a norma brasileira para a determinação da área efetiva da coluna.

Para avaliar o comportamento do sistema *Drive-in* segundo as prescrições do RMI foram feitos vários estudos, tais como: a determinação da combinação mais crítica para a estrutura, a variação de resultados entre as hipóteses de análise linear ou não linear, tridimensional ou bidimensional, influência do plano de contraventamentos dos fundos nas colunas frontais, comportamento da estrutura com a área calculada com a tensão nominal da NBR-14762, importância da consideração dos dados experimentais em relação aos dados nominais de projeto e validação das forças horizontais como forma de representar a falta de prumo na estrutura.

Para atingir os objetivos citados foi necessário também realizar um programa experimental que consistiu da determinação da rigidez da ligação coluna-placa de base. O valor médio encontrado para a rigidez da ligação coluna-placa de base, embora pequeno, teve influência na análise das estruturas, uma vez que ao considerar nula a rigidez da ligação coluna-placa de base, as estruturas analisadas não linearmente não convergiam, ou seja, a estrutura entrava em colapso antes da aplicação total do carregamento, ao passo que ao considerar o valor encontrado para a rigidez o carregamento real foi totalmente aplicado.

A seguir serão mostradas as conclusões desses estudos.

A combinação que conduziu a maiores esforços na estrutura foi a combinação que considera como estado limite a carga de armazenagem. Os resultados da relação

esforço axial/área transversal e esforços de flexão em torno do eixo global z segundo essa combinação são maiores.

A importância de uma análise não linear foi observada pela comparação entre uma análise linear e não linear de uma mesma estrutura. Desta comparação conclui-se que a análise não linear para o sistema de armazenagem do tipo *Drive-in* é mais adequada em função da não linearidade do comportamento desta estrutura.

A consideração de uma análise tridimensional ao invés de uma análise bidimensional é recomendada pelos resultados maiores tanto da relação esforço axial/área transversal como de momento fletor devido à interação entre os elementos componentes da estrutura.

Pela grande diferença dos deslocamentos da coluna frontal em relação à coluna localizada no 7º plano percebeu-se que o plano de contraventamento dos fundos tem reduzida importância nos deslocamentos do plano frontal.

A adaptação das prescrições do RMI à norma brasileira NBR-14672 foi adequada. Embora a estrutura com área efetiva calculada segundo a NBR-14762 tenha valores menores da relação esforço axial/área transversal em suas colunas, a consideração da estrutura com essa área é adequada, uma vez que a AISI não considera o efeito da flambagem por distorção.

A utilização dos dados experimentais se justifica em função da proximidade com a estrutura real e ainda o momento fletor obtido é mais elevado quando a análise é feita com estes dados.

As forças horizontais calculadas de acordo com Hancock et al. (2001) como forma de representar a estrutura fora do prumo não representam bem a simulação da estrutura imperfeita no plano ZY. Já para simular estrutura imperfeita no plano XY, constatou-se que as forças horizontais devem ser dispostas em todos os planos perpendiculares a direção global x, sendo esta conclusão uma recomendação deste trabalho a ser adotada para o sistema *Drive-in*.

Por ter cargas axiais e momentos fletores distribuídos em sua altura, a determinação da carga crítica de flambagem elástica da coluna do sistema *Drive-in* é melhor obtida através da resolução do problema de auto valor, onde é comprovado que para esta configuração de carregamento a coluna suporta um nível de carga superior quando comparado com a situação de uma única carga concentrada em sua extremidade.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se o ensaio de um pórtico do sistema *Drive-in* para melhor avaliar o seu comportamento, especialmente o comportamento das colunas, estudar a situação de carregamento que impõe uma situação mais crítica para a estrutura e uma análise analítica para a dedução do valor do coeficiente de flambagem.

Ressalta-se ainda que as análises obtidas neste trabalho utilizam uma seção transversal em que a área efetiva que considera ou não o modo distorcional possui pequena variação. No entanto os resultados finais das tensões já sofrem esta influência. Assim a avaliação de seções com maior influência do modo distorcional devem ser analisadas bem como a consideração da contribuição dos furos ao longo do comprimento da coluna neste modo.

## Referências Bibliográficas

ABML. Associação Brasileira de Movimentação e Logística. – <http://www.abml.org.br> - 06/11/2002.

ABML (2001). Especificação para Projeto, Testes e Utilização de Sistemas de Armazenagem. Associação Brasileira de Movimentação e Logística.

Águia (1999). Projeto de Sistemas de Armazenagem Industrial tipo *Drive-in*.

Águia (2002). Águia Sistemas de Armazenagem Ltda. – <http://www.aguiasistemas.com.br> - 06/11/2002.

AISC (1994). Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design, 2nd ed. Volumes 1 and 2. Chigaco: American Institute of Steel Construction.

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

Allen, H.G. e Bulson, P.S. (1980). Frameworks In Background to Buckling, Chapter 3, McGraw-Hill Book Company, p.199-338.

Altamira (2002). Altamira Indústria Metalúrgica – <http://www.altamira.com.br> - 09/11/2002.

Andrade, F. R. C. (2003). – Comunicação pessoal.

ANSYS (2001). User's Manual for Revision 6. Swanson Analysis Systems Inc., Houston, PA.

AS 4084 (1993). Steel Storage Racking. Standards Association of Australia.

AS/NZ 4600 (1996). Australian/New Zealand Standard for Cold-formed Steel Structures. Sydney: Standards Australia.

ASTM (1995). E8M-95A-Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (Metric). American Society for Testing and Materials.

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

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

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

BS 499 (1975). Specifications for the Use of Cold Formed Steel in Building. British Standards Institution, Addendum N°1.

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

Esmena (2002). Esmena do Brasil S/A. – <http://www.esmena.com.br> - 09/11/2002.

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

FEM (1986). Recommendations for the Design of Steel Static Pallet Racking. Federation Europeenne de la Manutention, 10.2.02, Draft.

FEM (1997). Recommendation for the Design of Steel Pallet Racking and Shelving, Section X of the Federation Europeenne de la Manutention.

Fiel (2002). Fiel S.A. Móveis e Equipamentos Industriais. – <http://www.fiel.com.br> - 30/10/02.

Freitas, A. M. S., Oliveira, A. M., Ribeiro, L. F. L (2000a) Análise Teórica Experimental de Sistemas de Armazenagem Industrial (Racks). XXIX Jornadas Sudamericanas de Engenharia Structural. Punta del Este – Uruguai (CD-rom).

Freitas, A. M. S., Oliveira, A. M., Ribeiro, L. F. L (2000b) "Um Estudo Teórico Experimental de Ligações de Sistemas Estruturais de Sistemas de Armazenagem Industrial. III Seminário Internacional – O Uso do Aço na Construção Civil, Belo Horizonte – MG (CD-rom).

Freitas, A. M. S.; Freitas, M. S. R.; Oliveira, A. M.; Cabral, J. B. e Souza, F. T. (2001). Análise Teórica-Experimental de Colunas Metálicas Perfuradas de Perfis Formados a Frio. Contribuição técnica apresentada no IV Seminário Internacional O Uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil / I Congresso Internacional da Construção Metálica (I CICOM) – novembro, 2001 – São Paulo, SP, Brasil.

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.

Godley, M. H. R.; Beale, R. G. e Feng, X. (1998). Rotational stiffnesses of semi-rigid baseplates, Fourteenth International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures. St. Louis, Missouri U.S.A., October 15-16, 1998.

Godley, M.H.R.; Beale, R.G. e Feng, X. (2000). Analysis and Design of Down-Aisle Pallet Rack Structures. *Computers e Structures*, v. 77, p. 391-401.

Hancock, G. J., Murray, T. M. e Ellifritt, D. S. (20001). Steel Storage Racking in Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification, Chapter 11, Ed Marcel Dekker, p. 353-374.

Isma (2002). Isma S/A Indústria Silveira de Móveis de Aço. – <http://www.isma.com.br> - 09/11/2002.

Kesti, J. e Davies, J.M. (1999). Local and distortional buckling of thin-walled short columns. *Thin-Walled Structures*, v. 34, p. 115-134.

Markazi, F. D.; Beale, R. G. e Godley, M.H. R. (1997). Experimental Analysis of Semi-Rigid Boltless Connectores. *Thin Walled Structures*, v. 28, p. 57-87.

Markazi, F.D.; Beale, R.G. e Godley, M.H.R. (2001). Numerical modelling of semi-rigid boltless connectors. *Computers e Structures*, v. 79, p. 2391-2402.

NBR-14762 (2001) – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – procedimento.

Oliveira, A. M. (2000). Análise Teórico-Experimental de Sistemas Industriais de Armazenagem (“Racks”). Dissertação de mestrado. UFOP, Ouro Preto, MG.

Parmatec (2000). Armazenagem com tecnologia, catálogo, Guarulhos, SP.

Peköz T. (1987). Development of a Unified Approach to the Design of Cold-Formed Steel Members. Report CF 81-1, March, Advisory Group on the Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, American Iron and Steel Structure Washigton, DC.

RMI (1990). Specification for the Design, Testing, and Utilization of Industrial Steel Storage Racks, Materials Handling Institute, Chicago, Illinois, 1990 Edition.

RMI (1997). Specification for the Design, Testing, and Utilization of Industrial Steel Storage Racks, Racks Manufactures Institute, Charlote, North Carolina.

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

Shanmugam, N.E. e Dhanalakshmi, M. (2001). Design for openings in cold-formed steel channel stub columns. *Thin-Walled Structures*, v. 39, p. 961-981.

Sofima (2002). Sofima S/A. Divisão Metalúrgica – <http://www.indusa.com.br> - 09/11/2002.

Steel King (2002). Steel King Industries. – <http://www.steelking.com> - 09/11/2002.

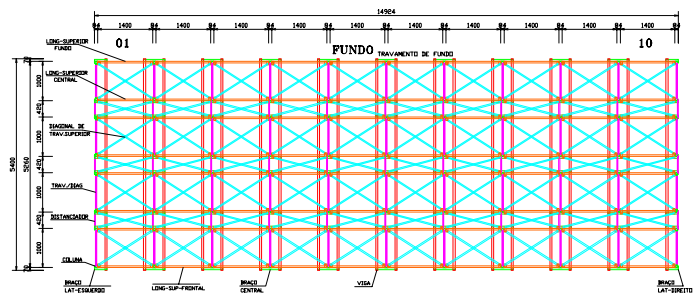
Timoshenko, S.P. e Gere, J.M. (1963). Elastic Buckling of Bars and Frames in Theory of Elastic Stability, Chapter 2, McGraw-Hill Book Company, p. 46-162.

## **Anexo I**

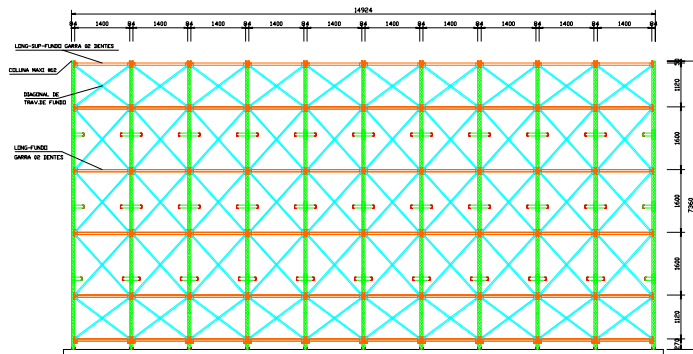
### **Projeto do Sistema de Armazenagem Industrial do Tipo *Drive-in***

Folha 1/2: Layout/Vistas;

Folha 2/2: Detalhamento.

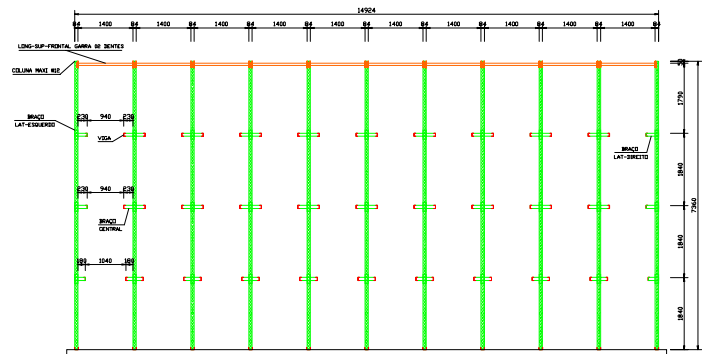


FRENTE  
PLANTA BAIXA  
ESCALA ..... 1/50

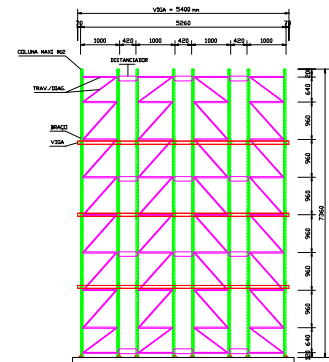


VISTA DE FUNDO  
TRAVAMENTO DE FUNDO  
ESCALA ..... 1/50

INFORMAÇÕES TÉCNICAS  
PALLET = 1200 x 1000 x 1600 mm  
CARGA POR PALLET = 900 KG  
CARGA POR TONEL = 12000 KG  
ESTRUTURA = 1400 x 5050 x 7360 mm  
ESTRUTURA = 1400 x 5050 x 7360 mm



VISTA FRONTAL  
TONEL ENTRADA/SADA  
ESCALA ..... 1/50

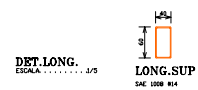
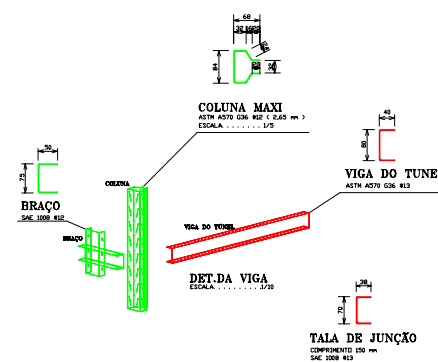
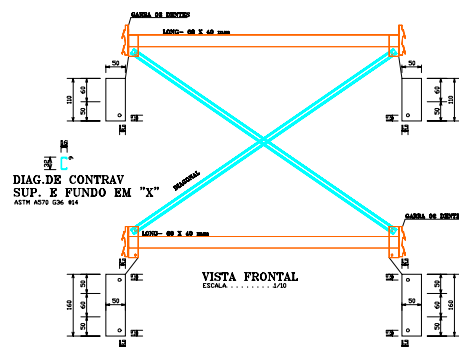
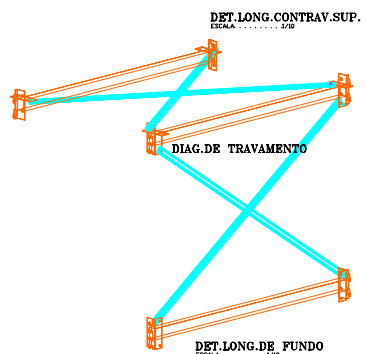


VISTA LATERAL  
COP DO PALLETE NA PROFUNDIDADE  
ESCALA ..... 1/50

REVISÕES - ALTERAÇÕES			
NR.	DATA	DESENHO	DESCRIÇÃO
1		●	
2		■	
3		▲	
4		○	
5		□	

PROJETO PROSA - PROJETOS E ACESSÓRIOS EM SISTEMAS DE ARMAZENAGEM

TÍTULO		PRODUTO	
DRIVE-IN		AGUIA	
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO		UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO	
DESIGNADO		DATA	
09/10/99		09/10/99	
APPROVADO DO CLIENTE		INDICADO	
APPROVADO DO CLIENTE		ADM	
FIM: RESP.		NÚMERO	
MARCOS VINÍCIUS JENSEN		PR-C15077/99	
CREA 25.453 D-09		SUBSTITUI	



LONGARINA SUPERIOR CENTRAL E FUNDO

LONGARINA SUPERIOR CENTRAL

LONG.FUNDO  
SAC 1008 #14

LONGARINA DE FUNDO

LONGARINA SUPERIOR FRONTAL  
LONGARINA SUPERIOR FUNDO

TRAV./DIAG.  
ASTM A570 G36 #14

REVISÕES - ALTERAÇÕES			
TP:	DATA:	DESENHO:	DESCRIÇÃO:
1		A	
2		B	
3		A	
4		C	
5		D	

PROJETO: PROASA - PROJETOS E ACESSÓRIOS EM SISTEMAS DE ARMAZENAGEM

TÍTULO		PROJETO	
DESENVOLVIMENTO		AGUIA	
CLIENTE:	UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO	DATA:	09/03/99
PROJETO:	PROJETO DE ARMAZENAGEM	USO:	INDICADO
APPROVAÇÃO DO CLIENTE:		REVISOR:	ADM
PROJETO:	PR-C15077/99	PROJETO:	2/2
MARCOS VINÍCIUS JANSSEN - CREA 25.453 D-496		SUBSTITUIÇÃO	