

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

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SISTEMAS INDUSTRIAIS DE  
ARMAZENAGEM (“RACKS”)**

**ADRIANO MAGELA DE OLIVEIRA**

ORIENTADORES: Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Arlene Maria Sarmanho Freitas.  
Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro.

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, junho de 2000.

*“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, se não tiver amor, sou como o bronze que soa, ou como o tímpano que retine. Mesmo que eu tivesse o dom da profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência; mesmo que tivesse toda a fé, a ponto de transportar montanhas, se não tiver amor, não sou nada.” (1Cor 13, 1-2) .*

*A meus amados pais, Manoel e Efigênia;  
Aos meus irmãos Simone, José Maria e  
Elenice Maria;  
A minha noiva Arianne.*



## **AGRADECIMENTOS**

- A minha família pela compressão e apoio em toda a minha vida.
- A querida Arianne, pela paciência e motivação durante todo este trabalho, principalmente nos últimos meses.
- Aos professores e orientadores Arlene Maria Sarmanho Freitas e Luiz Fernando Ribeiro Loureiro, pelo apoio motivação e orientação ao longo deste trabalho;
- Aos técnicos do Laboratório de Estruturas Metálicas da Escola de Minas: João, Carlos, Geraldo e Wilson (Dequinha), pela boa vontade e empenho demonstrado durante a realização dos ensaios experimentais;
- Às secretárias Silvana e Róvia sempre atenciosas e eficientes ao atendimento aos alunos;
- Ao professor Walter Dornelas, responsável pelo laboratório de computação do DECIV, que com profissionalismo esteve sempre com disposição para solucionar problemas nos equipamentos de informática, e ainda os ocasionados em meu computador ao final desta pesquisa;
- A todos os amigos que me apoiaram ;
- À USIMINAS e Fundação Gorceix pelo apoio financeiro;
- À Águia Sistemas de Armazenagem, pelo material cedido para realização dos ensaios experimentais.

## RESUMO

Os sistemas de armazenagem industriais também conhecidos como “racks” são amplamente utilizados no país. Existe uma variedade desses sistemas, utilizados na armazenagem dos mais variados tipos de produtos, empregados em depósitos de fábricas, supermercados, atacados, etc. Normalmente esses sistemas são constituídos de perfis de aço formados a frio, sendo que as colunas possuem perfurações, para o encaixe de ligações semi-rígidas dos tipos parafusada e não-parafusada.

Nestes sistemas é necessário observar várias considerações relativas à estabilidade influenciada por folga na ligação, estrutura fora do prumo e solicitações horizontais e verticais impostas acidentalmente pelos equipamentos de transporte ou movimentação, entre outros.

Todas essas características fazem com que as estruturas dos sistemas “racks” apresentem considerações adicionais ao serem dimensionadas, não consideradas nas normas existentes de perfis de aço formados a frio. Para verificação estrutural desses sistemas, foram desenvolvidas prescrições pelos fabricantes dessas estruturas, tais como a “Storage Equipment Manufacturers’ Association”, SEMA (1980), o “Rack Manufacturers Institute”, RMI (1997) e “Federation Européenne de la Manutention”, FEM (1996), respectivamente empregadas na Inglaterra, Estados Unidos e Europa. Cada fabricante em suas prescrições apresentam procedimentos específicos para dimensionamento desses elementos.

Neste trabalho são apresentadas as características de vários tipos de sistemas de armazenagem fabricados no país, com maior ênfase para o sistema de armazenagem “drive-in”. Para um modelo comercial deste sistema, foi realizado um estudo teórico-experimental em colunas curtas e nas ligações. O estudo das colunas curtas avaliou a influência das perfurações na capacidade de carga das colunas do sistema, e quanto as ligações o programa experimental determinou a real rigidez das mesmas. Os resultados experimentais foram avaliados por estudos teóricos baseados nas prescrições do RMI e utilizando método numérico em elementos finitos através do software LUSAS (1999a,b). O estudo numérico envolveu avaliação do modo de ruína, deformações e tensões nas colunas curtas, e da influência da rigidez da ligação semi-rígidas comparando-se com a rígida na capacidade de carga da estrutura e estabilidade do sistema.

## **ABSTRACT**

Pallet racking systems are widely used in Brazil. There is a variety of these systems, for the storage of several kinds of products, employed in warehouses, supermarkets and factories. These systems usually consist of thin cold-formed steel sections, and the columns possess holes, for the assemblage of semi-rigid bolt and boltless connections.

In the stability analysis of these systems it is necessary to consider, for instance, the influence of loose connections, plumbness and extra vertical and horizontal forces caused by operation of the loading equipment.

All these features of pallet racking structures pose additional design requirements, not covered by the existing cold formed steel structures design codes. For structural verification and design of these systems, some manufacturers, such as the Storage Equipment Manufacturers Association (SEMA, England,1980), the Rack Manufacturers Institute (RMI,USA,1997) and the Federation Européenne de la Manutention (FEM, 1996), have developed specific procedures.

This work presents the characteristics of some types of manufactured pallet racking systems used in Brazil, with emphasis on the drive-in storage system. A theoretical-experimental study on stub columns and semi-rigid connections was carried out for a commercial model of the system. The experiments evaluated the influence of the holes in the load-carrying capacity of the stub columns and the real stiffness of the connections. The results were assessed by theoretical evaluations based in the RMI and by numerical analyses using the finite element based LUSAS software. The numerical study involved determination of the failure mode and associated stress and deformation state of the stub columns. It also helped determine the influence of the semi-rigid connection on the load-carrying capacity and stability of the system.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XIX</b>
<b>LISTA DE FOTOS .....</b>	<b>XXVI</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2. SISTEMAS INDUSTRIAIS DE ARMAZENAGEM .....</b>	<b>6</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	6
2.2. SISTEMAS DE ARMAZENAGEM .....	6
2.3. HISTÓRICO .....	7
2.4. TIPOS DE SISTEMAS.....	8
2.4.1. SISTEMAS ESTÁTICOS.....	10
2.4.1.1. Sistema “Porta-Pallets” .....	10
2.4.1.2. Sistemas ”drive-in” e “drive-through” .....	12
2.4.2. SISTEMAS DINÂMICOS .....	13
2.4.2.1. Sistema de armazenagem dinâmica .....	14
2.4.2.2. Sistema “push back” (por impulsão) .....	15
<b>CAPÍTULO 3. COMPONENTES DOS SISTEMAS INDUSTRIAIS DE ARMAZENAGEM .....</b>	<b>16</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	16
3.2. ELEMENTOS COMPONENTES .....	16
3.2.1. VIGAS .....	17
3.2.2. COLUNA.....	20
3.2.3. CONTRAVENTAMENTOS .....	22
3.2.4. DISTANCIADORES.....	23
3.2.5. PLACAS DE BASE.....	24
3.2.6. LIGAÇÕES.....	25

3.3. ESTABILIDADE.....	26
3.3.1. ELEMENTOS ESTABILIZANTES.....	27
3.3.2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS E DE OPERACIONALIZAÇÃO.....	28
3.3.3. CRITÉRIOS DE SEGURANÇA.....	30
<b>CAPÍTULO 4. COLUNA .....</b>	<b>32</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	32
4.2. ESPECIFICAÇÕES DE NORMAS .....	33
4.2.1. PRESCRIÇÕES DA SEMA E FEM .....	34
4.2.2. PRESCRIÇÕES DO RMI.....	34
<b>CAPÍTULO 5. LIGAÇÕES .....</b>	<b>42</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	42
5.2. LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS.....	42
5.3. ENSAIO DA VIGA EM BALANÇO (“CANTILEVER TEST”).....	43
5.4. DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA LIGAÇÃO ATRAVÉS DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	44
5.4.1. DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA LIGAÇÃO.....	45
5.4.2.DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ PELO RMI .....	47
<b>CAPÍTULO 6. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>50</b>
6.1. INTRODUÇÃO .....	50
6.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	50
6.3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO E IMPERFEIÇÕES .....	52
6.4. COLUNAS.....	53
6.4.1. ENSAIO DA COLUNA LONGA .....	54
6.4.1.1. Esquema de montagem .....	56
6.4.1.2. Instrumentação.....	57
6.4.1.3. Metodologia .....	58
6.4.2. ENSAIO DAS COLUNAS CURTAS .....	58
6.4.2.1. Metodologia .....	60
6.5. LIGAÇÕES.....	61
6.5.1. ENSAIO DAS LIGAÇÕES DO BRAÇO .....	62



6.5.1.1. Esquema de montagem .....	64
6.5.1.2. Instrumentação .....	66
6.5.1.3. Metodologia .....	68
6.5.2. ENSAIO DAS LIGAÇÕES DA LONGARINA .....	68
6.5.2.1. Esquema de montagem .....	70
6.5.2.2. Instrumentação .....	72
6.5.2.3. Metodologia .....	73
<b>CAPÍTULO 7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	
<b>EXPERIMENTAIS DAS COLUNAS .....</b>	<b>74</b>
7.1 INTRODUÇÃO .....	74
7.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	74
7.2.1. COLUNA CURTA .....	74
7.2.1.1. Protótipo CCMAX-1.....	75
7.2.1.2. Protótipo CCMAX-2.....	75
7.2.1.3. Protótipo CCMAX-3.....	77
7.2.1.4. Protótipo CCMAX-4.....	78
7.2.2. COLUNA LONGA.....	79
7.2.2.1. Protótipo CMAX-1 .....	79
7.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	82
<b>CAPÍTULO 8. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	
<b>EXPERIMENTAIS DAS LIGAÇÕES.....</b>	<b>85</b>
8.1. INTRODUÇÃO .....	85
8.2. LIGAÇÃO DO BRAÇO .....	85
8.2.1. PROTÓTIPO LBMAX-1.....	86
8.2.2. PROTÓTIPO LBMAX-2.....	89
8.2.3. PROTÓTIPO LBMAX-3.....	93
8.2.4. PROTÓTIPO LBMAX-4.....	93
8.2.5. PROTÓTIPO LBMAX-5.....	96
8.3. LIGAÇÕES DA LONGARINA .....	98
8.3.1. PROTÓTIPO LLMAX-1 .....	98

8.3.2. PROTÓTIPO LLMAX-2.....	101
8.3.3. PROTÓTIPO LLMAX-3.....	105
8.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	106
<b>CAPÍTULO 9. ANÁLISE NUMÉRICA DA COLUNA CURTA.....</b>	<b>109</b>
9.1. INTRODUÇÃO .....	109
9.2. SIMULAÇÃO DO ENSAIO DA COLUNA CURTA .....	109
9.3. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS .....	110
9.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	113
9.5. RESULTADOS .....	114
9.5.1. HISTÓRICO DOS NÍVEIS DE TENSÃO NO MODELO DA COLUNA	114
9.5.2. DESLOCAMENTOS DO MODELO.....	115
<b>CAPÍTULO 10. ANÁLISE NUMÉRICA SISTEMA “DRIVE-IN” .....</b>	<b>127</b>
10.1. INTRODUÇÃO .....	127
10.2. SIMULAÇÃO DO MODELO TRIDIMENSIONAL DE UMA ESTRUTURA “DRIVE-IN” .....	127
10.3. MALHA EM ELEMENTOS FINITOS.....	130
10.4. CARREGAMENTO .....	135
10.5. CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	136
10.6. RESULTADOS .....	136
10.6.1. DESLOCAMENTOS DOS MODELOS .....	136
10.6.2. SOLICITAÇÕES DOS MODELOS.....	140
10.6.2.1. Contraventamentos .....	141
10.6.2.2. Colunas .....	143
<b>CAPÍTULO 11. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>149</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO I. PROJETO DO SISTEMA DE ARMAZENAGEM “DRIVE-IN” .....</b>	<b>157</b>

# LISTA DE SÍMBOLOS

## CAPÍTULO 4

$P$  = carga axial atuante;

$P_a$  = carga axial resistente;

$M_x$  = momento atuante na direção  $x$ , da seção transversal;

$M_{ax}$  = momento resistente na direção  $x$ , da seção transversal;

$M_y$  = momento atuante na direção  $y$ , da seção transversal;

$M_{ay}$  = momento resistente na direção  $y$ , da seção transversal;

$P_n$  = carga nominal axial;

$A_e$  = área efetiva da seção transversal da coluna, admitida como a área líquida mínima 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;

$A_{netmin}$  = 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 4.4 com espessura mínima ( $t_{mín}$ );

$Q_{máx}$  = fator  $Q$  determinado pelo ensaio de coluna curta, segundo a equação 4.4 com espessura máxima ( $t_{máx}$ );

$L_p$  = distância de eixo a eixo das perfurações de colunas, utilizadas pelo AISI para avaliação do comprimento mínimo da coluna;

$W$  = maior largura da seção transversal bruta da coluna;

$W_e$  = 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;

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

$f_y$  = tensão do escoamento do aço;

## **CAPÍTULO 5**

$L_c$  = 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;

$L$  = comprimento da viga;

$k$  = rigidez da ligação (kNm/rad);

$\theta$  = rotação da ligação (radianos);

$F$  = constante da mola, ou rigidez da ligação (kNm/rad);

$M$  = momento da ligação (kNm);

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

$F$  = rigidez da ligação (kNm/rad);

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

R.F. = fator de minoração para levar em consideração a dispersão dos resultados experimentais;

$A1$  e  $A2$  = áreas hachuradas, definidas por uma reta, de modo a se ter as áreas entre a curva momento rotação e a reta iguais;

## **CAPÍTULO 6**

$W$  = largura do corpo de prova para o ensaio de caracterização do aço;

$G$  = comprimento inicial;

$A$  = comprimento da parte útil;  
 $R$  = raio de concordância;  
 $B$  = comprimento da cabeça de fixação do corpo de prova;  
 $L$  = comprimento total do corpo de prova;  
 $C$  = largura da cabeça de fixação do corpo de prova;  
 $T$  = espessura do corpo de prova;  
 $f_{ya}$  = tensão limite de escoamento do aço obtida por meio de ensaio de caracterização do aço;  
 $F_u$  = tensão limite de resistência à tração;  
 $CG_{\min}$  = centro de gravidade correspondente a seção transversal de área líquida mínima;  
 $L1$  = largura da alma da seção transversal do perfil tipo "rack" ou "garrafa";  
 $L2$  = largura do flange superior;  
 $L3$  = largura do flange inferior;  
 $L4$  = largura do flange de ligação inferior;  
 $L5$  = largura do flange de ligação superior;  
 $L6$  = comprimento do enrijecedor superior;  
 $L7$  = comprimento do enrijecedor inferior;  
 $G$  = comprimento da abertura da seção transversal do perfil, (garganta);  
 $L_s$  = comprimento total superior;  
 $L_i$  = comprimento total inferior;  
 $CG$  = centro de gravidade da seção transversal;  
 $L_b$  = comprimento do braço de alavanca da viga;  
 $L$  = comprimento da viga;  
 $t$  = espessura da chapa do perfil;  
 $d$  = diâmetro dos parafusos;

## **CAPÍTULO 7**

$CG_{\min}$  = centro de gravidade correspondente a seção transversal de área líquida mínima;  
 $Q$  = fator redutor de forma, obtido através do ensaio de coluna curta;  
 $P_{uexp}$  = carga última experimental obtida no ensaio da coluna curta;  
 $P_{ua}$  = carga última média, obtida no ensaio da coluna curta;  
 $A_{netmin}$  = área líquida mínima de cada protótipo;

$A_e$  = área efetiva de cada protótipo calculada pelo fator  $Q=0,914$ ;

$P_{ny}$  = resistência nominal considerando a tensão de escoamento  $f_y=250$  MPa;

$P_{nya}$  = resistência nominal considerando a tensão de escoamento obtida experimentalmente;

$f_{ya}$  = tensão de escoamento, obtida pelo ensaio de caracterização do aço igual 320,229 MPa;

## **CAPÍTULO 8**

$L_c$  = 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;

$L$  = comprimento da viga;

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

$F$  = rigidez da ligação (kNm/rad);

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

R.F. = fator de minoração para levar em consideração a dispersão dos resultados experimentais;

$k$  = rigidez da ligação (kNm/rad) segundo o método da Inclinação a 50% do Momento Último;

$F$  = rigidez da ligação segundo o procedimento do RMI;

$M_u$  = momento último obtido nos ensaios da ligações;

$P_u$  = carga última obtida nos ensaios das ligações;

$k_m$  = Média das rigidezes dos protótipos das ligações ensaiadas segundo o Método da Inclinação a 50% do Momento Último;

$F_m$  = Média das rigidezes dos protótipos das ligações ensaiadas segundo o procedimento do RMI;

## CAPÍTULO 9

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

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$e_z$  = excentricidade do eixo de elemento em relação ao eixo xy local;

$U, V, W$  = translações nos eixos x, y e z, respectivamente;

$\theta_x, \theta_y, \theta_z$  = rotações nos eixos x, y e z, respectivamente;

## CAPÍTULO 10

$A$  = área da seção transversal de cada elemento;

$I_{yy}, I_{zz}$  = momento de Inércia em torno das direções locais dos eixos y e z;

$K_t$  = Constante de torção de “Saint Venant” da seção transversal;

$A_{sz}, A_{sy}$  = áreas efetivas cisalhantes nos plano locais nas direções z e y respectivamente;

$U, V, W$  = translações nos eixos x, y e z, respectivamente;

$\theta_x, \theta_y, \theta_z$  = rotações nos eixos x, y e z, respectivamente;

$q$  = carga distribuída;

$W$  = peso do palete;

$p$  = profundidade do palete;

$\delta_{ys}, \delta_{yr}$  = deslocamentos médios internos dos braços ao longo da viga do túnel obtidos nos modelos numéricos, respectivamente com ligações semi-rígidas e rígidas;

$\delta_r$  = deslocamento vertical na extremidade de uma viga engastada e livre provocado por uma carga concentrada  $P$ ;

$\delta_s$  = deslocamento vertical na extremidade livre de uma viga com um apoio elástico de rigidez  $F$ , provocada por uma carga concentrada  $P$ ;

$P$  = carga axial aplicada na extremidade da coluna;

$E$  = módulo de elasticidade;

$I_{zzc}$  = momento de inércia da coluna;

$L$  = comprimento total da coluna;

$T_n$  = esforços nominal de tração;

$P_n$  = esforço nominal de compressão;

$M_n$  = momento nominal;

$F_{xc}$  e  $F_{xt}$  = esforços normais de compressão e tração respectivamente, obtidos nos modelos numéricos;

$M_{fc}$  e  $M_{ft}$  = momentos fletores considerados respectivamente o esforço normal de compressão e tração pela excentricidade de carregamento na extremidade externa da alma;

$K$  = coeficiente de flambagem;

$K_t$  = coeficiente de flambagem por torção;

$K_y$  e  $K_z$  = coeficientes de flambagem nas direções locais dos eixos da seção transversal da coluna;

$P_n$  = carga nominal;

$M_{nz}$  = momento nominal da direção local z da seção transversal;

$M_{ny}$  = momento nominal da direção local y da seção transversal;

$F_{xc}$  = esforço normal de compressão obtido nos modelos numéricos;

$M_{zc}$  = momento fletor em torno do eixo local z obtido nos modelos numéricos;

$M_{yc}$  = momento fletor em torno do eixo local y obtido nos modelos numéricos.



# LISTA DE TABELAS

## CAPÍTULO 6

Tabela 6.1. Dimensões dos corpos de prova ensaiados. ....	51
Tabela 6.2. Valores médios de $f_{ya}$ , $f_u$ e do alongamento residual após a ruptura.....	52
Tabela 6.3. Dimensões da linha média da seção transversal do protótipo CMAX-1, de acordo com a nomenclatura adotada na figura 6.2 (b).....	55
Tabela 6.4. Dimensões da seção transversal dos protótipos ensaiados, de acordo com a nomenclatura adotada na figura 6.2 (b). ....	59
Tabela 6.5. Posição do centro de gravidade considerando área líquida mínima ( $CG_{mín}$ ) dos protótipos CCMAX. ....	60

## CAPÍTULO 7

Tabela 7.1. Carga última experimental ( $P_{uexp}$ ) e carga última média ( $P_{ua}$ ) dos ensaios realizados. ....	79
Tabela 7.2. Comparação dos resultados teóricos e experimentais dos protótipos.....	83
Tabela 7.3. Comparação dos resultados teóricos e experimentais do protótipo CMAX-1 .....	84

## CAPÍTULO 8

Tabela 8.1.Pares ordenados obtidos nas curvas momento-rotação e nas curvas carga-deslocamento para cada protótipo.....	107
Tabela 8.2. Resultados da rigidez da ligação do braço e ligação da longarina.....	108

## CAPÍTULO 9

Tabela 9.1. Características dos elementos finitos utilizados na análise.....	111
Tabela 10.1. Propriedades dos elementos finitos utilizados no modelo do sistema “drive-in” .....	132
Tabela 10.2. Propriedades geométricas de cada membro que compõe o modelo do sistema “drive-in”. ....	134

## **CAPÍTULO 10**

Tabela 10.3. Resultados dos deslocamentos dos braços ao longo da viga do túnel, para os modelos com ligações semi-rígidas e ligações rígidas.....	140
Tabela 10.4. Resistência dos contraventamentos.....	141
Tabela 10.5. Solicitações de compressão, tração e momento fletor, obtidos nas análises numéricas de ambos os modelos.....	142
Tabela 10.6. Verificação dos contraventamentos pelas equações de interação.....	143
Tabela 10.7. Resistência da coluna à compressão e ao momento fletor nas direções y e z locais da seção transversal da coluna.....	147
Tabela 10.8. Resultados dos esforços máximos de compressão ( $F_{xc}$ ), momento fletor ( $M_z$ ) e momento fletor ( $M_y$ ), das colunas nos modelos com ligações semi-rígidas e ligações rígidas. ....	147

# LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Elementos dos sistemas de armazenagem industriais: (a) coluna de seção tipo “rack” ou “garrafa” com perfurações; (b) Ligação não-parafusada constituída de garra dentada para fixação na coluna..... 1

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1. 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 (1999a))..... 11

Figura 2.2. Configuração dos sistemas “drive-in” e “drive-through”: (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 (1999a)). 13

Figura 2.3. Princípio de funcionamento do sistema de armazenagem dinâmica, Steel King (1999a). ..... 14

Figura 2.4. Configuração do sistema “push back”: (a) Vista lateral com indicação do sentido de carregamento, Dexion (1999); (b) Trilho deslizante utilizado para carga e descarga dos paletes, (Dexion (1999))..... 15

## CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Elementos componentes dos sistemas de armazenagem industriais estáticos: (a) Sistema “porta-pallets”; (b) Sistema “drive-in”. ..... 17

Figura 3.2. Seções transversais de vigas do sistema “porta-pallets”: (a) Fechada; (b) Semi-aberta; (c) Seção U simples; (d) Seção I; (e) Seção sigma. .... 18

Figura 3.3. Configuração do carregamento de viga utilizados no sistema “porta-pallets”. ..... 18

Figura 3.4. Configuração do braço e viga do túnel, (Águia (1999b)): (a) Braço; (b) Viga do túnel. .... 19

Figura 3.5. Longarina com ligação de garra com dois dentes, Águia (1999b). ..... 19

Figura 3.6. Configuração do sistema “drive-in” com um paleta por nível. .... 20

Figura 3.7. Tipos de colunas de sistemas industriais de armazenagem utilizadas no país. ....	21
Figura 3.8. Tipos de seção transversal de colunas:(a) Seção tipo “rack” ou “garrafa”; b) Seção U enrijecido.....	21
Figura 3.9. Sistema “drive-through” com contraventamentos na face lateral e no plano horizontal superior, (Isma (2000)). ....	23
Figura 3.10. Detalhe da posição e seção transversal de distanciadores na face lateral do sistema, (Águia (1999b)). ....	24
Figura 3.11. Placas de base de sistemas de armazenagem.....	25
Figura 3.12. Ligação parafusada com fixação no flange da coluna.....	25
Figura 3.13. Faces do sistema de armazenagem “porta-pallets” com detalhe dos elementos estabilizantes:(a) Face frontal; (b) Face lateral.....	27
Figura 3.14. Faces do sistema de armazenagem “drive-in” com detalhe dos sistemas estabilizantes:(a) Face frontal; (b) Face lateral.....	28
Figura 3.15. Detalhe do dispositivo de segurança horizontal na ligação.....	29
Figura 3.16. Barra horizontal para proteção de colunas, (Dexion (1999)). ....	30
Figura 3.17. Protetor de colunas. ....	30

## **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 “rack” com a identificação de W; (b) Vista frontal da coluna com as dimensões de W e $L_p$ .....	37
Figura 4.2. Tipos de perfurações com a indicação do comprimento mínimo da coluna curta, AISI (1996).....	38
Figura 4.3. Esquema do ensaio da coluna curta.....	39

## **CAPÍTULO 5**

Figura 5.1. Esquema do ensaios da viga em balanço (“Cantilever Test”) segundo as prescrições do RMI. ....	43
Figura 5.2. Resultados momento-rotação obtidos por ensaio experimental da ligação..	44
Figura 5.3. Método da Inclinação Inicial.....	46
Figura 5.4. Método das Áreas Iguais. ....	46

Figura 5.5. Método da Inclinação a 50% do Momento Último. ....	47
Figura 5.6. Curva carga-deslocamento de uma ligação com indicação da carga última ( $P_u$ ) e do par ordenado ( $\delta_{0,85}$ ; $P_{0,85}$ ). ....	49

## CAPÍTULO 6

Figura 6.1. Nomenclatura adotada pela ASTM (1995) para o corpo de prova do ensaio de tração. ....	51
Figura 6.2. Identificação e nomenclatura da seção transversal dos protótipos ensaiados: (a) Identificação das faces componentes da seção transversal; (b) Nomenclatura utilizada considerando as dimensões da linha média da seção transversal.....	53
Figura 6.3. Seção transversal considerando a área líquida mínima com a indicação da posição do $CG_{min}$ . ....	54
Figura 6.4. Vista geral do protótipo CMAX-1: (a) Vista em perspectiva do protótipo CMAX-1; (b) Vista frontal com o comprimento do protótipo CMAX-1 e detalhe do semicírculo na extremidade da seção da alma da coluna.....	55
Figura 6.5. Esquema de ensaio do protótipo CMAX-1, com detalhe da montagem da rótula na parte superior. ....	57
Figura 6.6. Vista geral dos protótipos ensaiados: (a) Vista em perspectiva dos protótipos ensaiados; (b) Vista com as dimensões da largura máxima da seção W, distância entre furos $L_p$ e comprimento total L.....	59
Figura 6.7. Esquema geral de montagem ensaio de coluna curta, posicionada na prensa hidráulica KRATOS. ....	60
Figura 6.8. Ligação do braço central: (a) Vista frontal do sistema “drive-in” com o posicionamento de uma ligação do braço central; (b) Detalhe da ligação e coluna; (c) Detalhe dos elementos componentes da ligação do braço central.....	63
Figura 6.9. Dimensões da ligação do braço: (a) Dimensões dos elementos; (b) Dimensões da seção transversal do braço. ....	64
Figura 6.10. Dimensões dos elementos utilizados no esquema de montagem da ligação do braço: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.....	66
Figura 6.11. Esquema de geral de montagem do ensaio da ligação do braço com o posicionamento da instrumentação: (a) Vista lateral da montagem; (b) Detalhe frontal do posicionamento do carregamento na seção transversal do braço.....	67

Figura 6.12. Ligação da longarina: (a) Vista frontal do sistema “drive-in” com o posicionamento de uma ligação da longarina; (b) Detalhe da ligação e da coluna; (c) Detalhe do suporte da ligação da longarina.....	69
Figura 6.13. Dimensões da ligação da longarina: (a) Dimensões dos elementos; (b) Dimensões da seção transversal da longarina. ....	70
Figura 6.14. Dimensões dos elementos utilizados no esquema de montagem da ligação da longarina: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.....	72
Figura 6.15. Esquema geral de montagem do ensaio da ligação da longarina com o posicionamento da instrumentação.....	73

## **CAPÍTULO 8**

Figura 8.1. Deslizamento dos parafusos pelo furo de formato oval e alongado existente na ligação do braço. ....	86
Figura 8.2. Curva momento-rotação do protótipo LBMAX-1.....	89
Figura 8.3. Curva momento-rotação do protótipo LBMAX-2.....	92
Figura 8.4. Curva carga-deslocamento do protótipo LBMAX-2.....	93
Figura 8.5. Curva momento-rotação do protótipo LBMAX-4.....	95
Figura 8.6. Curva carga-deslocamento protótipo LBMAX-4.....	95
Figura 8.7. Curva momento-rotação protótipo do LBMAX-5.....	97
Figura 8.8. Curva carga-deslocamento do protótipo LBMAX-5.....	97
Figura 8.9. Curva momento-rotação protótipo do LLMAX-1.....	100
Figura 8.10. Curva carga-deslocamento do protótipo LLMAX-1.....	101
Figura 8.11. Curva momento-rotação do protótipo LLMAX-2.....	104
Figura 8.12. Curva carga-deslocamento do protótipo LLMAX-2.....	104
Figura 8. 13. Curva momento-rotação do protótipo LLMAX-3.....	105
Figura 8.14. Curva carga-deslocamento do protótipo LLMAX-3.....	106

## **CAPÍTULO 9**

Figura 9.1. Esquema geral do modelo do ensaio da coluna curta.....	110
Figura 9.2. Elementos tipo “shell” (TS3 e QSI4) utilizados na modelagem da coluna, LUSAS (1999a). ....	110

Figura 9.3. Elemento tipo “3 D continuum”(HX8M) utilizado na modelagem das placas de reação, LUSAS (1999a). .....	111
Figura 9.4. Malha de elementos finitos utilizada no modelo de coluna curta: .....	112
(a) Nomenclatura da seção transversal da coluna; (b) Vista geral da coluna; (c) Face da alma; (d) Face dos flanges; (e) Face dos enrijecedores; (f) Face dos flanges de ligação.	
Figura 9.5. Malha de elementos finitos nas placas de reação superior e inferior. ....	113
Figura 9.6. Níveis de tensões no modelo da coluna para diversos carregamentos:	
(a) P = 70 kN; (b) P = 80 kN, (c) P=90 kN; (d) P=100 kN; (e) P=110 kN; (f) P=120 kN; (g) P=130 kN; (h) P =140 kN; (i) P = 150 kN. ....	115
Figura 9.7. Vista das deformações da coluna para o carregamento de 100 kN, com a indicação das regiões de aproximação dos flanges de ligação, e de afastamento dos flanges para uma ampliação de 300 vezes. ....	116
Figura 9.8. Orientação dos eixos na coluna e nomenclatura utilizada para cada face:	
(a) Vista em perspectiva da coluna; (b) Vista da seção transversal, com orientação dos eixos e nomenclatura das faces. ....	118
Figura 9.9. Deslocamento na direção x, normal à face da alma. ....	118
Figura 9.10. Curva deslocamento das seções AB, A'B' e A''B'', na direção x , normal à face da alma. ....	119
Figura 9.11. Deslocamentos na direção z, normal à face dos flanges: (a) Flange inferior; (b) Flange superior. ....	120
Figura 9.12. Curvas de deslocamentos, na direção z, para as seções CD e EF, respectivamente nos flanges inferior e superior. ....	121
Figura 9.13. Deslocamentos na direção x, na face dos enrijecedores: (a) Enrijecedor inferior; (b) Enrijecedor superior. ....	122
Figura 9.14. Curvas de deslocamentos, na direção x, para as seções intermediárias GH e IJ (enrijecedor inferior e superior). ....	123
Figura 9.15 Deslocamentos na direção z, na face dos enrijecedores: (a) Enrijecedor inferior; (b) Enrijecedor superior. ....	124
Figura 9.16. Curvas de deslocamentos na direção z nas seções intermediárias LM e NO (enrijecedor inferior e superior). ....	124
Figura 9.17 Deslocamentos, na direção z, na face normal aos flanges de ligação;	
(a) Flange de ligação inferior; (b) Flange de ligação superior. ....	125

Figura 9.18. Curvas de deslocamentos na direção z nas seções intermediárias PQ e RS, (flange de ligação inferior e superior).....	126
---	-----

## CAPÍTULO 10

Figura 10.1. Vista geral do modelo em elementos finitos do sistema de armazenagem “drive in”.....	128
Figura 10.2. Vista frontal do modelo gerado do sistema “drive-in” com a indicação de seus componentes. ....	128
Figura 10.3. Vista de fundo do modelo gerado do sistema “drive-in” com a indicação de seus componentes. ....	129
Figura 10.4. Vista superior do modelo gerado do sistema “drive-in” com a indicação de seus componentes. ....	129
Figura 10.5. Vista lateral do modelo gerado do sistema “drive-in” com a indicação de seus componentes. ....	130
Figura 10.6. Elemento de viga BMS3, LUSAS (1999a). ....	130
Figura 10.7. Elemento “joint” JSH4, LUSAS (1999a). ....	131
Figura 10.8. Vista frontal dos modelos com o detalhe do posicionamento dos elementos de viga e joints para simulação das ligações.....	133
Figura 10.9. Posicionamento do carregamento imposto pelos paletes nos modelos:	
(a) Vista frontal com indicação do peso dos paletes e sua distribuição;	
(b) Vista lateral com indicação da carga q nas vigas do túnel. ....	135
Figura 10.10. Vista frontal da deformada dos modelos com ligações rígidas e semi-rígidas, com um fator de ampliação de 400 vezes: (a) Deformada do modelo com ligações rígidas; (b) Deformada do modelo com ligações semi-rígidas. ....	137
Figura 10.11. Vista de painéis internos e externos dos modelos com ligações rígidas e semi-rígidas: (a) Vista dos painéis com ligações rígidas; (b) Vista dos painéis com ligações semi-rígidas.....	138
Figura 10.12. Vista frontal do modelo com ligações rígidas com a indicação do comprimento da coluna e coeficientes de flambagem adotado nesta direção. ....	144
Figura 10.13. Vista frontal do modelo com ligações semi-rígidas com a indicação do comprimento da coluna e coeficientes de flambagem adotados para o cálculo da carga nominal de compressão.....	144



Figura 10.14. Vista lateral dos modelos com indicação dos comprimento da coluna e coeficientes de flambagem adotado nesta direção. .... 146

## LISTA DE FOTOS

### CAPÍTULO 2

Foto 2.1. Sistema de armazenagem automatizado, (Águia (1999a)).	7
Foto 2.2. Sistemas de armazenagem de produtos de formato variado, (Águia (1999a)).	8
Foto 2.3. Sistema de armazenagem de produtos volumosos, bobinas de aço, (Redirac (1999)).	9
Foto 2.4. Paleta metálico, (Parmatec (1999a)).	9
Foto 2.5. Transporte manual de paleta carregado, (Parmatec (1999b)).	9
Foto 2.6. Sistema de armazenagem industrial “porta-pallets”, (Águia (1999a)).	11
Foto 2.7. Sistema de armazenagem “drive-in”, (Águia (1999a)).	12

### CAPÍTULO 3

Foto 3.1. Coluna com seção transversal tipo “rack” ou “garrafa”, com flanges adicionais para conexão dos contraventamentos, (Águia (1999a)).	22
Foto 3.2. Coluna de seção transversal U enrijecido com cantoneira adicionais para instalação dos contraventamentos, (Isma (2000)).	22
Foto 3.3. Ligação parafusada com fixação na alma da coluna, (Águia (1999a)).	26
Foto 3.4. Ligação com garras dentadas (não-parafusada) utilizada em sistemas de armazenagem industrial, (Isma (2000)).	26

### CAPÍTULO 6

Foto 6.1. Esquema geral de montagem do ensaio da coluna longa.	56
Foto 6.2. Esquema Geral de Montagem do ensaio da coluna curta.	61
Foto 6.3. Esquema geral de montagem do ensaio da ligação do braço.	65
Foto 6.4. Detalhe dos equipamentos para aquisição de dados.	68
Foto 6.5. Esquema geral de montagem do ensaio da ligação da longarina.	71

### CAPÍTULO 7

Foto 7.1. Vista da coluna CCMAX-2, ao final do ensaio, onde observa-se as deformadas nas extremidades da coluna na alma da seção transversal.	76
---	----

Foto 7.2. Vista das distorções nas extremidades da coluna pelo afastamento dos flanges de ligação e aproximação dos mesmos a meia altura da coluna (130 mm). ....	77
Foto 7.3. Vista do protótipo CCMAX-3, com deformação na extremidade inferior da alma da coluna. ....	78
Foto 7.4. Variação da dimensão da garganta na extremidade superior do protótipo.....	80
Foto 7.5. Plastificação da alma da seção transversal ao final do ensaio.....	81
Foto 7.6. Flambagem por flexo-torção, na parte inferior da coluna. ....	82

## **CAPÍTULO 8**

Foto 8.1. Efeito de flexão no braço do protótipo LBMAX-1 ao final do ensaio.....	87
Foto 8.2. Vista frontal da extremidade do braço com o detalhe da torção e deformação da mesa superior da seção.....	88
Foto 8.3. Detalhe da extremidade do braço com o enrijecimento da seção.....	90
Foto 8.4. Vista do protótipo LBMAX-2 ao final do ensaio com os modos de flexo-torção. ....	91
Foto 8.5. Vista da ligação do braço com a torção na extremidade de aplicação do carregamento.....	94
Foto 8.6. Vista frontal do braço do protótipo LBMAX-4, sendo visível a torção ao final do ensaio. ....	96
Foto 8.7.Deslocamentos obtidos ao final do ensaio do protótipo LLMAX-1. ....	99
Foto 8.8. Deformação do suporte da ligação do lado oposto aos dentes. ....	102
Foto 8.9 Torção no suporte da ligação da longarina. ....	103

## **CAPÍTULO 9**

Foto 9.1. Deslocamento nos flanges de ligação a meia altura da coluna.....	117
Foto 9.2. Deslocamento na face da alma. ....	120

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Os sistemas de armazenagem industrial, também conhecidos como “racks”, são utilizados no armazenamento de produtos e mercadorias de fábricas, supermercados, atacados entre outros. Existe uma variedade de tipos desses sistemas que atendem as diversas características dos produtos armazenados.

Os sistemas de armazenagem utilizam normalmente elementos perfurados para colunas, e ligações semi-rígidas parafusadas e não-parafusadas, que facilitam na montagem da estrutura. Um dos tipos de seções transversais utilizadas é a do tipo “rack” ou “garrafa”, (figura 1.1 (a)) que possui uma configuração que possibilita a instalação de contraventamentos. Quanto às ligações, são muito empregadas as não-parafusadas, (figura 1.1 (b)) constituídas de garras dentadas que se encaixam nas perfurações das colunas. A utilização desses elementos leva a particularidades no dimensionamento das colunas, devido às perfurações, necessitando de avaliações experimentais da capacidade de carga, e das ligações semi-rígidas, onde é necessária a determinação da rigidez experimentalmente.

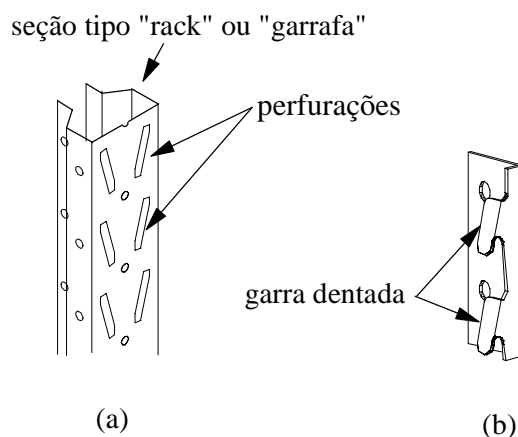


Figura 1.1. Elementos dos sistemas de armazenagem industriais: (a) coluna de seção tipo “rack” ou “garrafa” com perfurações; (b) Ligação não-parafusada constituída de garra dentada para fixação na coluna.

A estabilidade do sistema deve ser avaliada considerando-se a influência das ligações semi-rígidas e do uso de contraventamentos. Os aspectos construtivos e operacionais também influenciam na estabilidade do sistema. O primeiro devido às imperfeições iniciais oriundas da instalação da estrutura fora do prumo, e por folga na ligação, e o segundo pelo uso de empilhadeiras, que podem danificar o sistema, através de cargas acidentais, verticais e na base da coluna.

Como pode-se observar, os “racks” apresentam diversas características distintas das outras estruturas que levaram os fabricantes a desenvolverem estudos visando a elaboração de prescrições específicas para estes tipos de sistemas.

Nos Estados Unidos, várias pesquisas contribuíram para avaliação do comportamento de elementos perfurados e ligações semi-rígidas, (Peköz (1975), (1978a), (1978b), (1987), (1988), (1992)) visando a avaliação dos sistemas de armazenamento. As prescrições adotadas pelo “Rack Manufacturers Institute” (RMI (1997)) basearam-se nestas pesquisas e são utilizadas em conjunto com a 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 Manufacturers’ Association”, SEMA (1980), que é empregada conjuntamente com a norma britânica BS-499 (1969), (1975). Existem ainda vários estudos (Godley (1991), Markazi et al. (1997), Godley (1997), Lewis (1991), (1997)) quanto ao comportamento e estabilidade dos sistemas de armazenagem, a avaliação experimental das ligações semi-rígidas, e o comportamento de vigas e ligações na fase plástica.

Na Europa tem-se a prescrição da “Federation Européenne de la Manutention”, FEM (1996), utilizada em conjunto com as prescrições da norma de dimensionamento de estruturas de aço, Eurocode 3 (1992). Na literatura tem-se pesquisas desenvolvidas para estudos de elementos perfurados e relativos à estabilidade, (Davies (1992) e (1997)).

Há ainda diversos trabalhos desenvolvidos em vários países (Moll e Rossbach (1984), Abdel-Rahman e Sivakumaran (1998), Stark e Tilburgs (1978), (1979) Rhodes e Schneider (1994) e Rhodes e MacDonald (1996)) sobre os sistemas de armazenagem, elementos perfurados, estabilidade e sobre os sistemas “drive-in” e “drive-through”.

A maioria desses estudos levaram as normas ao emprego de testes experimentais para avaliação da capacidade de carga da coluna, utilizando o “stub column test”, ensaio da coluna curta, e estimativa da rigidez das ligações, por meio do “cantilever test”, ensaio da viga em balanço. No entanto nas prescrições tem-se o procedimento necessário para dimensionamento do sistema de armazenagem tipo “porta-pallets” e similares, sendo ainda pouco estudado o sistema tipo “drive-in”, principalmente relativo à sua estabilidade.

No Brasil ainda não há normas sobre a utilização, dimensionamento ou montagem desses sistemas, apesar de existirem diversas empresas nacionais, situadas nos estados do Paraná e São Paulo, que fabricam e montam essas estruturas em todo o país e no exterior. Essas empresas apresentam características próprias para a fabricação das colunas, ligações, bem como no tipo de montagem utilizadas.

Devido a esta ausência de literatura nacional, faz-se necessário o uso das normas existentes mencionadas anteriormente, avaliando-se sua eficiência à realidade brasileira.

Neste trabalho são apresentadas as principais características dos tipos de sistemas de armazenagem industriais mais utilizados no país, com maior ênfase no sistema “porta-pallets” e “drive-in”, sendo o segundo, objeto de estudo dessa pesquisa.

O estudo foi baseado em alguns procedimentos da SEMA, FEM, com o enfoque maior nas prescrições do RMI, que utiliza o AISI (1996). As avaliações utilizaram um sistema de armazenagem comercial tipo “drive-in”, fabricado pela empresa Águia Sistemas de Armazenagem, restringindo-se a elementos de colunas e dois grupos de ligações existentes no sistema.

Neste trabalho, foram ensaiados 5 protótipos de colunas tipo “rack”, sendo um de coluna longa e os demais de colunas curtas, visando a determinação da influência das perfurações na capacidade de carga da coluna calculada de acordo com os procedimentos do RMI. Para as ligações foi determinada a rigidez de dois tipos de ligações empregadas no sistema “drive-in”: parafusada e não-parafusada, de acordo com os procedimentos do RMI e utilizando o Método da Inclinação a 50% do Momento Último, totalizando 8 ensaios. Foi desenvolvido também um estudo numérico em elementos finitos utilizando o software LUSAS (1999a,b), para avaliação do comportamento da coluna curta que foi comparado aos resultados experimentais obtidos. Quanto as ligações, através dos resultados experimentais da rigidez, foi

avaliada, com modelo numérico em três dimensões do sistema “drive-in”, a influência destas na estabilidade do sistema e comparada com a consideração de um outro modelo com ligações rígidas.

No capítulo 2 é apresentado um breve histórico dos sistemas de armazenagem industriais. Em seguida faz-se a descrição dos tipos mais utilizados no país com suas principais características. Esta descrição está dividida segundo uma classificação quanto ao tipo de armazenagem, chamadas de estática e dinâmica.

No capítulo 3 são descritos os principais componentes dos sistemas de armazenagem estáticos: “porta-pallets” e “drive-in”, com maior ênfase neste último. É apresentado também um estudo sobre a estabilidade, os principais aspectos construtivos e de operacionalização, e alguns critérios de segurança para garantir a vida útil da estrutura.

No capítulo 4 descreve-se os procedimentos das prescrições da SEMA, FEM, e RMI, para determinação da capacidade de carga da coluna, através de ensaios experimentais de coluna curta. É apresentado também o procedimento proposto pelo RMI, para determinação do momento fletor resistente dessas colunas.

No capítulo 5 apresenta-se os métodos existentes nas prescrições do RMI e em pesquisas anteriores, (Godley (1991), Markazi et al. (1997)) para estimativa da rigidez de ligações através do ensaio experimental de viga em balanço, “cantilever test”, para a obtenção das curvas momento-rotação e carga-deslocamento.

No capítulo 6 é relatado o procedimento empregado nos programas experimentais das colunas longa e curtas, e dos dois grupos de ligações ensaiadas segundo os procedimentos do RMI. Neste capítulo também é descrito o processo de fabricação e as avaliações quanto às imperfeições dos elementos.

No capítulo 7 tem-se a avaliação dos resultados experimentais das colunas, com a apresentação dos resultados obtidos quanto aos modos de ruína e carga última. Em seguida, os resultados experimentais são comparados com as prescrições do RMI.

No capítulo 8 é apresentado e analisado os dois grupos de ligações, através dos modos de ruína, das curvas momento-rotação e carga-deslocamento de cada protótipo ensaiado. Através dessas curvas tem-se os resultados da estimativa da rigidez de cada protótipo, e em seguida de cada grupo de ligações. A rigidez da ligação foi obtida de

acordo com os procedimentos do RMI e pelo Método da Inclinação a 50% do Momento Último.

No capítulo 9 é descrita a análise numérica da coluna curta, utilizando-se o software de elementos finitos LUSAS (1999a,b), apresentando-se a discretização e as condições de contorno utilizadas. São apresentados também os resultados dessa análise, aos níveis de tensão resultante nas paredes da coluna e os tipos de deslocamentos no modelo, estes comparados com os resultados experimentais obtidos.

No capítulo 10 apresenta-se a simulação numérica em elementos finitos de dois modelos de um sistema tipo “drive-in” utilizando-se o software LUSAS (1999a,b). O primeiro modelo considera todas as ligações do sistema “rack” como rígidas. No segundo modelo, foram considerados os valores da rigidez das ligações obtidos através dos ensaios experimentais dos dois grupos de ligações. Em seguida são apresentados e comparados os resultados quanto aos deslocamentos e as solicitações máximas obtidas para os componentes dos contraventamentos e das colunas de ambos os modelos.

No capítulo 11 são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, bem como sugestões para trabalhos futuros.



## **CAPÍTULO 2**

### **SISTEMAS INDUSTRIAIS DE ARMAZENAGEM**

#### **2.1. INTRODUÇÃO**

Os sistemas industriais de armazenagem são de fundamental importância nos depósitos de armazenagem de produtos. De acordo com o tipo de item armazenado é mais adequado um determinado tipo de sistema e a versatilidade dos mesmos consegue atender as diferentes características existentes. Neste capítulo são apresentadas estas características, dando ênfase aos sistemas paletizados, e ainda o histórico e uma breve descrição de alguns dos tipos de “racks” mais usuais no país.

#### **2.2. SISTEMAS DE ARMAZENAGEM**

Os sistemas de armazenagem são amplamente utilizados para estocagem de produções de fábricas, redes atacadistas, supermercados, etc. O meio onde são armazenados os produtos pode ser denominado de depósito de armazenagem. Este ambiente deve apresentar uma grande versatilidade, pois tem que permitir a estocagem de produtos por períodos variados, devendo atender à produção das fábricas e demanda dos mercados (Godley (1991)). O armazenamento tem que ter uma utilização eficiente do espaço caracterizado pela densidade de armazenagem, e permitir o fácil acesso aos produtos, descrito como acessibilidade.

Visando a atender estas características, foram desenvolvidos sistemas industriais de armazenagem denominados “racks”. Há uma infinidade de tamanhos e tipos que se adaptam às características dos produtos armazenados. Estes sistemas podem variar de simples estantes, a sistema automatizados de mais de 30 metros de altura, (foto 2.1).

Uma das principais características dos sistemas “racks” é a conexão de elementos através de peças perfuradas e parafusos visando facilitar e agilizar a montagem nos depósitos.



Foto 2.1. Sistema de armazenagem automatizado, (Águia (1999a)).

### **2.3. HISTÓRICO**

Os primeiros registros desses sistemas de armazenagem datam da década de 30 (Godley (1991)) e os elementos que os compunham eram de cantoneiras de aço constituídas por perfis formados a frio com furos ao longo de seu comprimento. A princípio, apenas as colunas eram perfuradas e o único meio de ligação entre os elementos utilizava parafusos. Para garantir a estabilidade do sistema, utilizava-se uma grande quantidade de contraventamentos devido à baixa resistência à torção das cantoneiras.

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

seções tipo “rack”. Essas seções possuem rasgos ao longo do comprimento e faces adicionais para instalação dos contraventamentos.

Atualmente, no Brasil, existem diversas empresas que fabricam sistemas de armazenagem industrial como a Águia Sistemas de Armazenagem (Águia (1999a,b)), situada no Paraná, a Parmatec (1999a,b), Sofima-Indusa (2000a,b) e Isma (2000), situadas no estado de São Paulo. Essas empresas desenvolveram seus sistemas utilizando tipos variados de ligações e colunas.

## **2.4. TIPOS DE SISTEMAS**

Os tipos de sistemas variam de acordo com o tipo de produto a ser armazenado. Para produtos de formato variados, e volumosos, pode-se destacar os apresentados nas fotos 2.2 e 2.3, respectivamente. Por outro lado, os produtos de formato regular ou que possam ser embalados em caixas, podem ser armazenados por meio de paletes. O palete é um gradil de madeira, metálico ou de plástico no qual são empilhados uma determinada quantidade de produto de formato regular, foto 2.4. Na base deste há duas aberturas para que os garfos das empilhadeiras possam elevar, transportar e armazená-los no sistema, foto 2.5. Este sistema paletizado é amplamente utilizado no país.



Foto 2.2. Sistemas de armazenagem de produtos de formato variado, (Águia (1999a)).

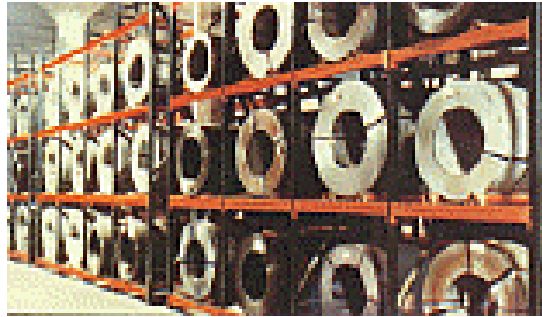


Foto 2.3. Sistema de armazenagem de produtos volumosos, bobinas de aço, (Redirac (1999)).



Foto 2.4. Palete metálico, (Parmatec (1999a)).



Foto 2.5. Transporte manual de palete carregado, (Parmatec (1999b)).

A armazenagem nos sistemas paletizados 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 a

forma dinâmica, onde sistemas de roletes são inseridos para a movimentação dos paletes no interior do sistema.

A seguir são apresentadas as principais características de alguns tipos de sistemas paletizados estáticos e dinâmicos.

#### **2.4.1. SISTEMAS ESTÁTICOS**

Os sistemas estáticos mais utilizados no país são o sistema “porta-pallets”, “drive-in” e “drive-through”.

##### **2.4.1.1. Sistema “Porta-Pallets”**

O sistema “porta-pallets”, ilustrado na foto 2.6, é um dos tipos de sistemas mais utilizados em depósitos. Como na maioria desses sistemas, o pé direito está associado com o alcance de empilhadeiras que atingem uma altura média de 6 metros, Godley (1991). São utilizados corredores que fornecem acesso direto a cada produto armazenado com o mínimo de operações da empilhadeira. A figura 2.1 ilustra a configuração do sistema “porta-pallets” observando a vista frontal, com a indicação das vigas de apoio dos paletes; a vista superior, com a indicação dos corredores de acesso e a vista lateral, esta indicando através de setas, o sentido de acesso para estocagem utilizando as empilhadeiras. Por outro lado, estes corredores diminuem a densidade de armazenagem do depósito.



Foto 2.6. Sistema de armazenagem industrial “porta-pallets”, (Águia (1999a)).

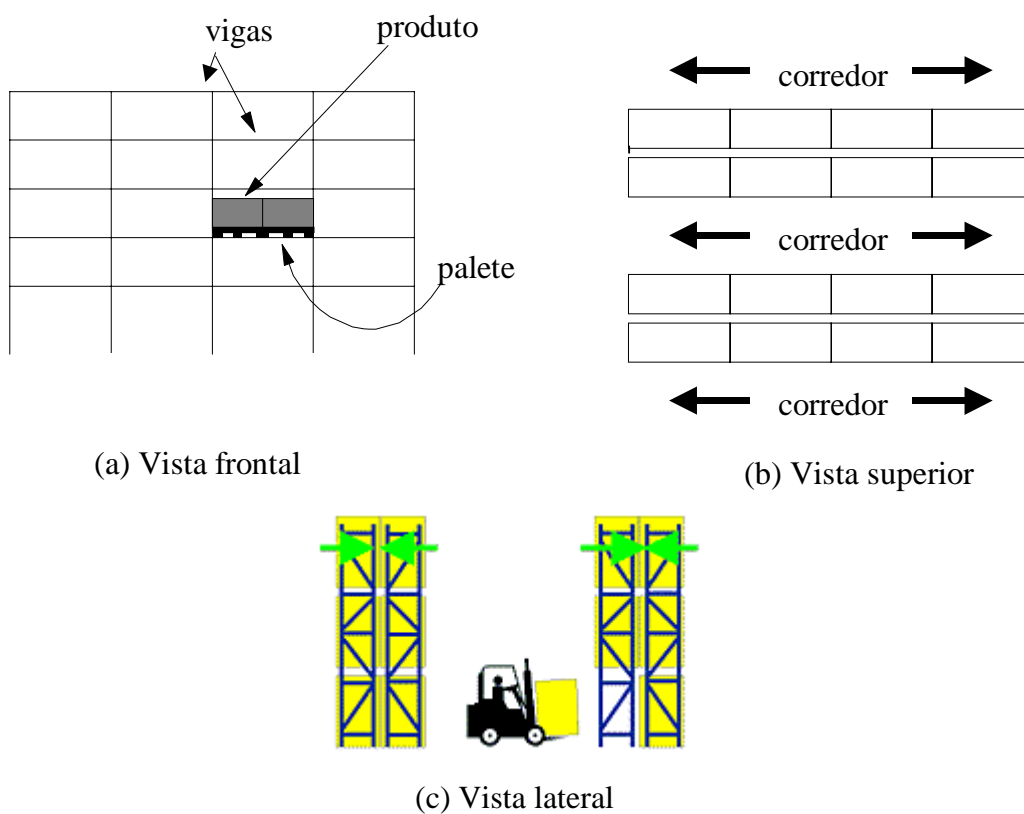


Figura 2.1. Configuração do sistema “porta-pallets”: (a) Vista frontal; (b) Vista superior; (c) Vista lateral com o esquema de armazenamento através de empilhadeira, e indicação de sentido de acesso para estocagem, (Steel King (1999a)).

#### **2.4.1.2. Sistemas “drive-in” e “drive-through”**

Nos sistemas “drive-in” e “drive-through”, foto 2.7, o uso do espaço do depósito é mais eficiente. No entanto, há o inconveniente do difícil acesso aos itens armazenados, sendo sua utilização ideal para produtos não perecíveis e com pouca variedade de itens. O número de corredores é menor em relação ao sistema “porta-pallets” em função de utilizar-se vários paletes ao longo da profundidade do sistema. Os paletes são armazenados em trilhos, também denominados de vigas do túnel, que são ligados a vigas curtas em balanço, chamadas de braços. Os braços possibilitam um túnel para o acesso de empilhadeiras no interior do sistema, como detalhado na figura 2.2. Observa-se na figura 2.2 (a) 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 2.2 (b) tem-se a vista superior do sistema com a visão dos trilhos e túnel de acesso de empilhadeiras com as faces de operação das mesmas. Na figura 2.2 (c) observa-se a vista lateral do sistema com a ilustração da empilhadeira e a indicação por setas do sentido de acesso das mesmas.

São denominados “drive-in” os sistemas que apresentam o acesso em apenas uma face de operação e “drive-through” quando este acesso é permitido pelas duas faces.



Foto 2.7. Sistema de armazenagem “drive-in”, (Águia (1999a)).

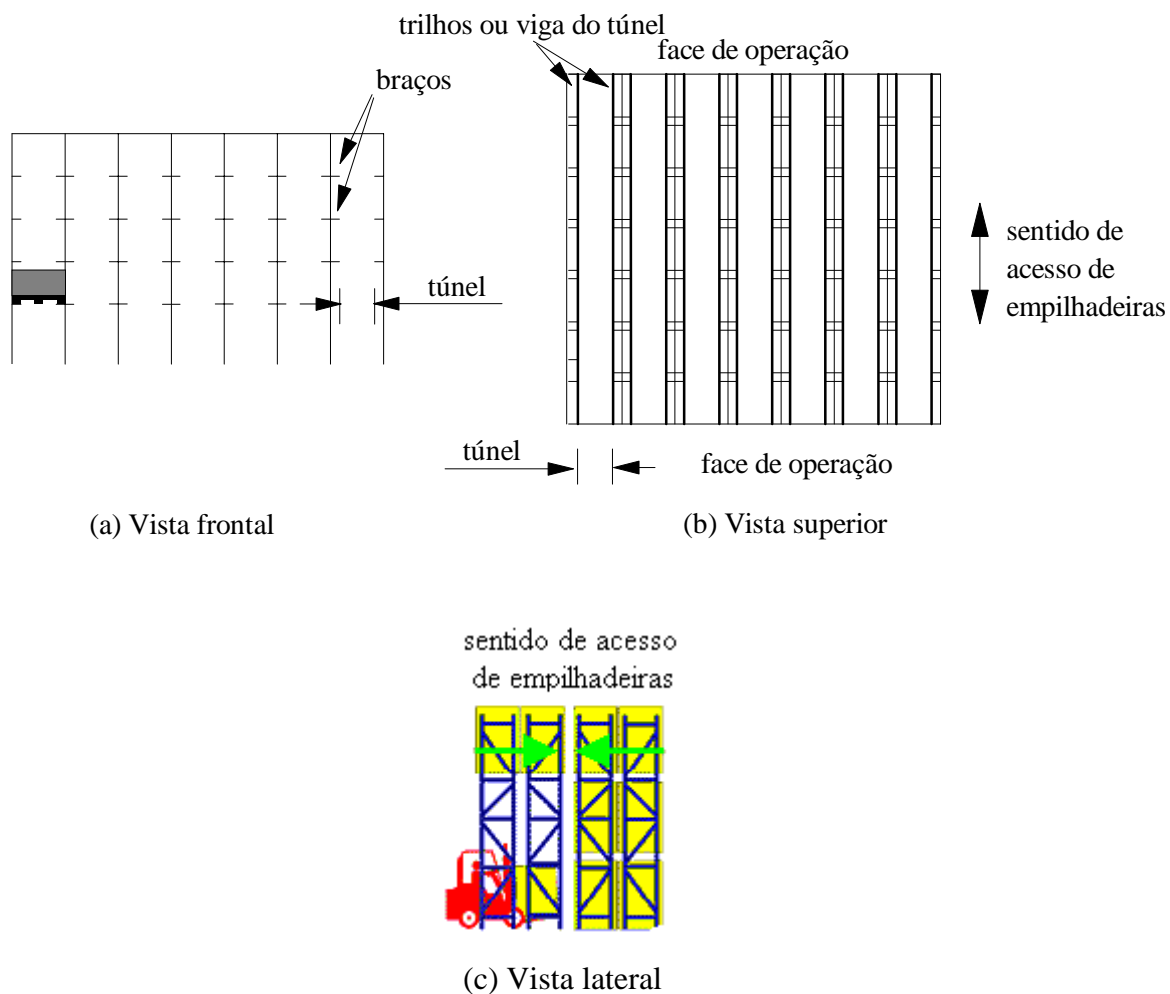


Figura 2.2. Configuração dos sistemas “drive-in” e “drive-through”: (a) Vista frontal; (b) Vista superior; (c) Vista lateral com o esquema de armazenamento através de empilhadeira, e indicação de sentido de acesso para estocagem, (Steel King (1999a)).

## 2.4.2. SISTEMAS DINÂMICOS

Neste item são apresentados dois sistemas dinâmicos empregados no país: sistema de armazenagem dinâmica e “push back”.



#### **2.4.2.1. Sistema de armazenagem dinâmica**

O sistema de armazenagem dinâmica é apropriado 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. O sistema de rolos ou trilhos de roletes promove o movimento dos paletes para o interior do sistema por ação da gravidade e por meio de controladores de velocidade. O princípio de funcionamento da armazenagem dinâmica está ilustrado na figura 2.3. Nesta figura observa-se as faces de carregamento e descarregamento, a carga armazenada, os elementos principais do sistema e o fluxo de carregamento.

O número dos corredores de acesso é reduzido, sendo necessário apenas dois nas faces de operação para carga e descarga dos paletes. O número de paletes ao longo da profundidade desse sistema é limitado apenas pelo espaço disponível dos depósitos, promovendo uma alta densidade de armazenagem.

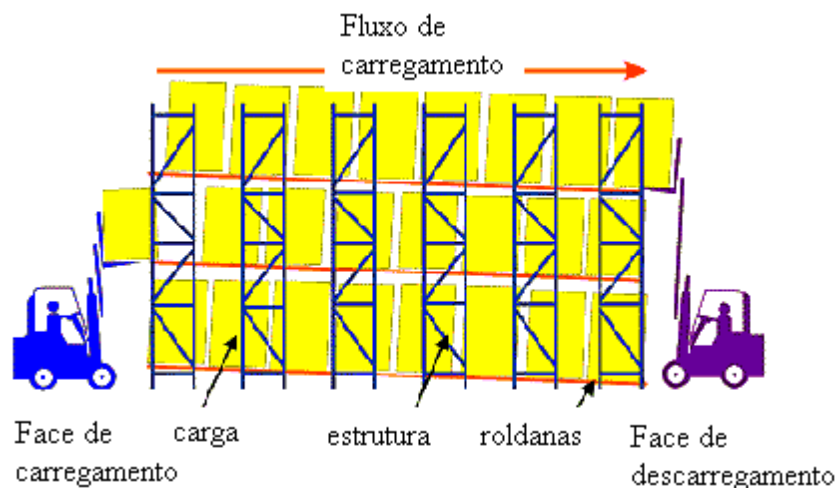
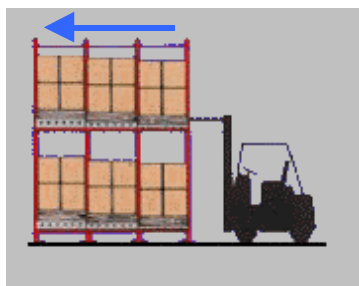


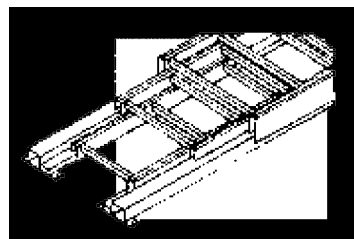
Figura 2.3. Princípio de funcionamento do sistema de armazenagem dinâmica, Steel King (1999a).

#### **2.4.2.2. Sistema “push back” (por impulsão)**

O sistema “push back” é um variante do sistema de armazenagem dinâmica. A diferença entre os sistemas é que há um número limitado de paletes de profundidade, geralmente até quatro e apenas um corredor de acesso responsável pela carga e descarga. Os paletes são colocados nos trilhos e empurrados a pique acima até o último. Ao retirá-lo por ação da gravidade todos os paletes descem uma posição. A figura 2.4 (a) ilustra o princípio de carga e descarga do sistema “push back”. Observa-se a mesma face de operação para carga e descarga dos paletes. O sistema possui roletes ou carrinhos deslizantes, figura 2.4 (b), que são responsáveis pela movimentação dos paletes. Por essas características, esse sistema é da filosofia LIFO “last-in first-out” (O último que entra é o primeiro que sai), ideal para itens com as mesmas características do “drive-in”, mas com pouca acessibilidade e pouca variedade.



(a)



Trilhos deslizantes  
que facilitam a  
movimentação dos  
palets

(b)

Figura 2.4. Configuração do sistema “push back”: (a) Vista lateral com indicação do sentido de carregamento, Dexion (1999); (b) Trilho deslizante utilizado para carga e descarga dos paletes, (Dexion (1999)).

## **CAPÍTULO 3**

### **COMPONENTES DOS SISTEMAS INDUSTRIAIS DE ARMAZENAGEM**

#### **3.1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo são apresentados os diversos elementos que compõem os sistemas de armazenagem estáticos tipo “porta-pallets” e “drive-in”, enfatizando as principais características e finalidades dos mesmos. Apresentam-se também considerações relativas à estabilidade dos sistemas estáticos, aos aspectos construtivos e algumas recomendações para garantir a vida útil dessas estruturas.

#### **3.2. ELEMENTOS COMPONENTES**

O sistema de armazenagem estático é composto de colunas, contraventamentos, distanciadores, ligações, além de elementos sujeitos a flexão que no sistema “drive-in” são identificados como: braços, viga do túnel, longarinas. As figuras 3.1 (a) e (b) apresentam a configuração e o posicionamento de todos esses elementos para o sistema “porta-pallets” e “drive-in”, respectivamente.

A seguir serão analisados os diversos elementos componentes destacados como: vigas, colunas, contraventamentos, distanciadores e ligações.

Para o sistema “drive-in” será enfatizado o modelo utilizado na análise experimental e teórica realizada neste trabalho.

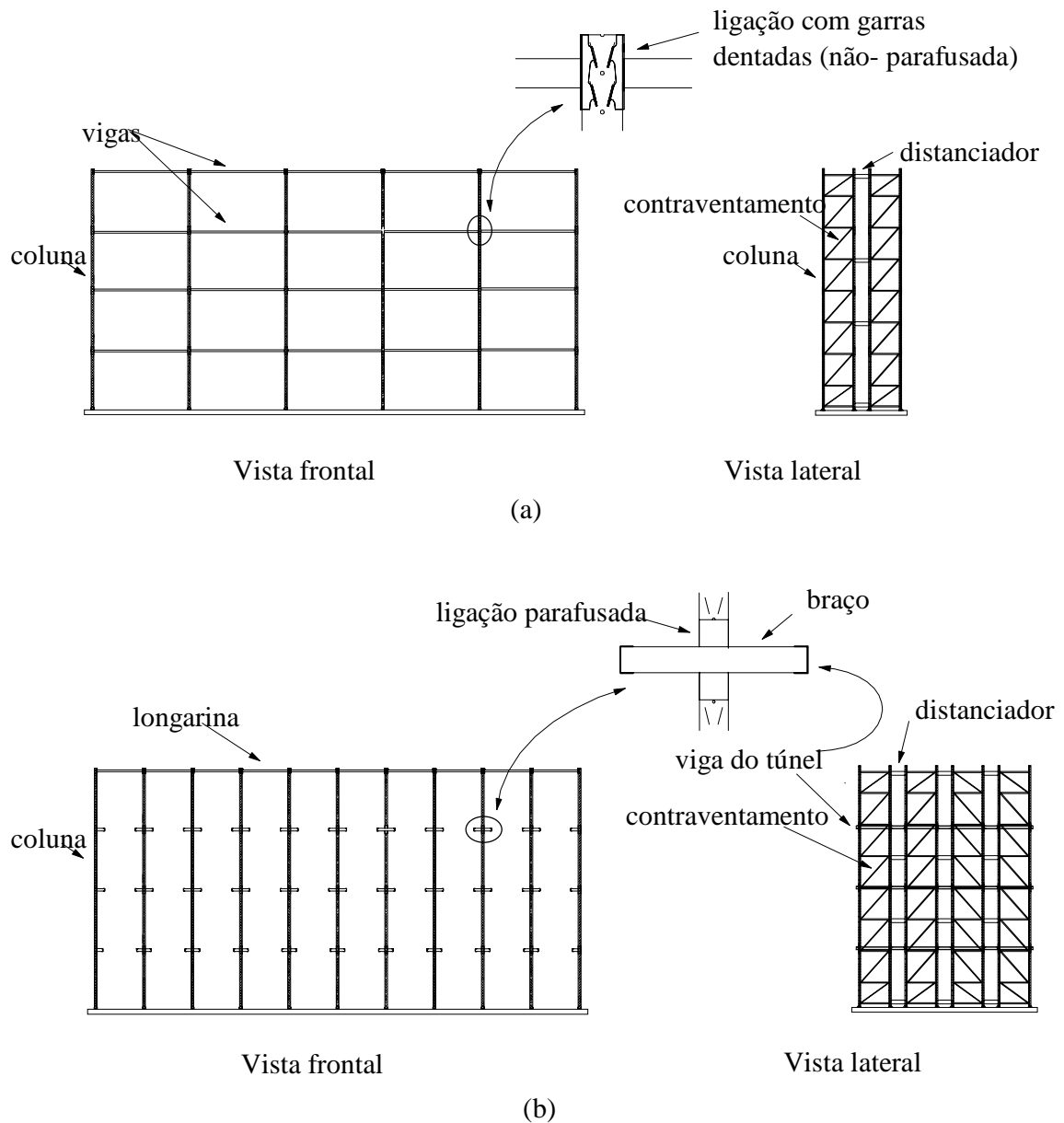


Figura 3.1. Elementos componentes dos sistemas de armazenagem industriais estáticos:  
(a) Sistema "porta-pallets"; (b) Sistema "drive-in".

### 3.2.1. VIGAS

As vigas têm a finalidade de receber o carregamento dos paletes e transmití-los às colunas por meio das ligações.

No sistema "porta-pallets" as formas mais comuns de seções transversais abertas e fechadas utilizadas no país são apresentadas na figura 3.2. As seções fechadas são

mais eficientes por serem geometricamente mais estáveis, mas as abertas são muito utilizadas em função da economia do material e do processo de fabricação através da conformação a frio das seções.

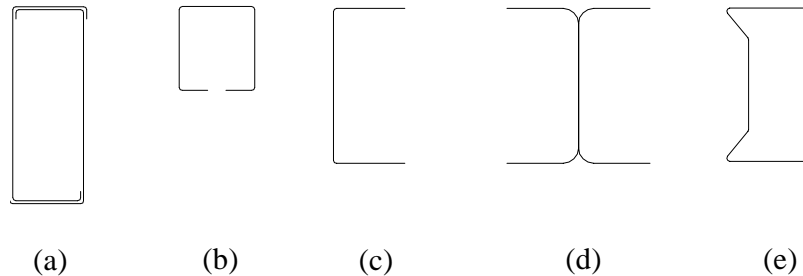


Figura 3.2. Seções transversais de vigas do sistema “porta-pallets”: (a) Fechada; (b) Semi-aberta; (c) Seção U simples; (d) Seção I; (e) Seção sigma.

A configuração mais usual para o carregamento das vigas é de dois paletes por viga, conforme ilustrado na figura 3.3.

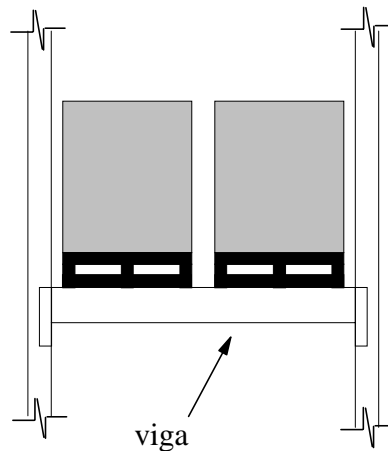


Figura 3.3. Configuração do carregamento de viga utilizados no sistema “porta-pallets”.

No sistema “drive-in” são utilizados três tipos de vigas com finalidades distintas: braços, vigas do túnel e longarinas. Os braços são vigas curtas, de seção aberta, que se encaixam nas colunas, e não são contínuas de uma coluna a outra, como no sistema “porta-pallets”. A figura 3.4 (a) ilustra o braço que é utilizado para permitir a passagem das empilhadeiras de armazenagem no interior do sistema. Para armazenagem dos paletes ao longo da profundidade são instalados trilhos (vigas do túnel), figura 3.4 (b).

As vigas de túnel têm a finalidade de suportar o carregamento imposto pelos paletes e transmiti-los aos braços. São normalmente de seções abertas, e estão susceptíveis a fenômenos de flexão e principalmente à flambagem lateral por torção.

Os braços recebem os esforços dos trilhos e transmite-os para a ligação com a coluna.

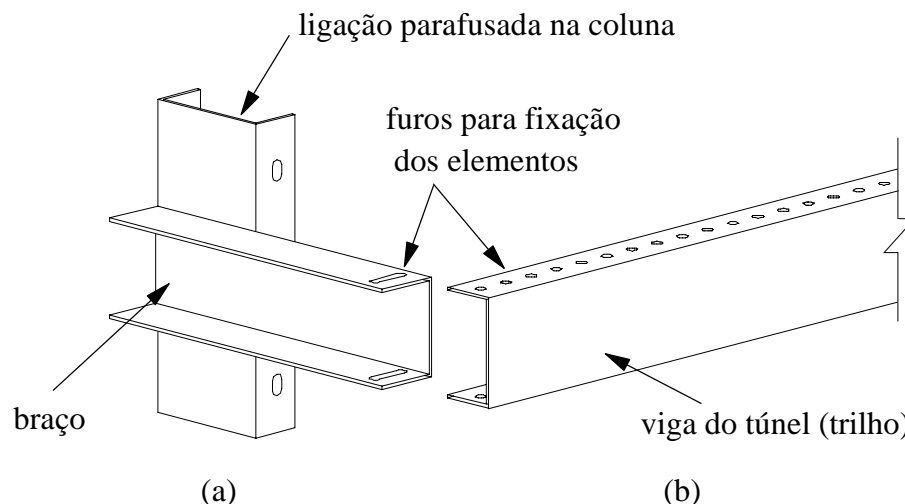


Figura 3.4. Configuração do braço e viga do túnel, (Águia (1999b)): (a) Braço; (b) Viga do túnel.

Uma das diversas maneiras de conexão entre o braço e a viga do túnel é através de parafusos de cabeça oval, que minimizam o atrito com os paletes e facilitam a operacionalização do sistema.

Além desses dois elementos, para garantir a estabilidade da estrutura, são instaladas vigas no topo do sistema, denominadas longarinas que fazem a amarração das colunas (figuras 3.1 (b) e 3.5). O colapso desse elemento está associado à resistência da ligação dos mesmos.

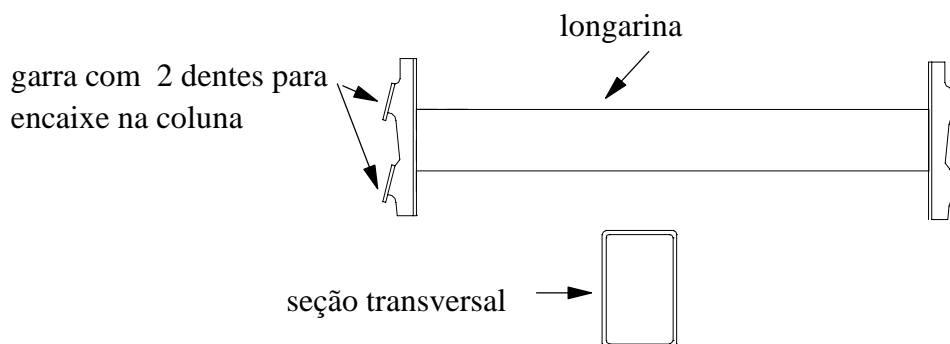


Figura 3.5. Longarina com ligação de garra com dois dentes, Águia (1999b).

A configuração básica do sistema “drive-in” é apresentada na figura 3.6 a seguir, sendo o armazenamento constituído, em cada fila, por um palete por nível.

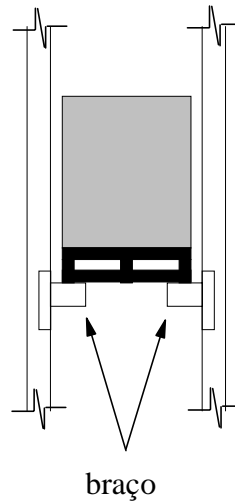


Figura 3.6. Configuração do sistema “drive-in” com um palete por nível.

### 3.2.2. COLUNA

Existem no país alguns modelos de colunas utilizadas em sistemas de armazenagem industrial, com diferentes seções transversais e perfurações para fixação dos elementos, (figura 3.7).

Os furos nas seções das colunas facilitam extremamente a montagem e contribuem para uma diminuição do peso total da estrutura. Utiliza-se seqüências de perfurações, de geometria variada, que são responsáveis pelo encaixe da ligação das vigas. Em alguns modelos ainda há furos circulares para encaixe de ligações parafusadas e instalação de placa de base e distanciadores, elementos que serão abordados nos próximos itens.

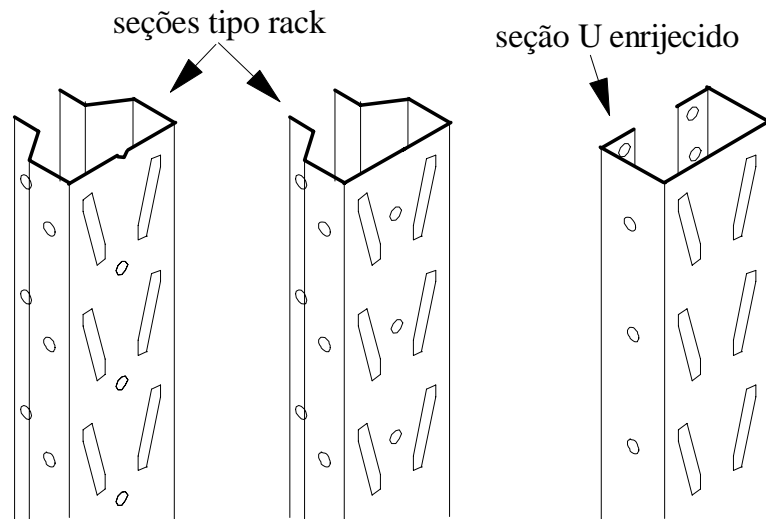


Figura 3.7. Tipos de colunas de sistemas industriais de armazenagem utilizadas no país.

Na figura 3.8 são apresentados 2 tipos de seções transversais de colunas utilizadas no país: seção tipo “rack” ou “garrafa” e seção U enrijecido.

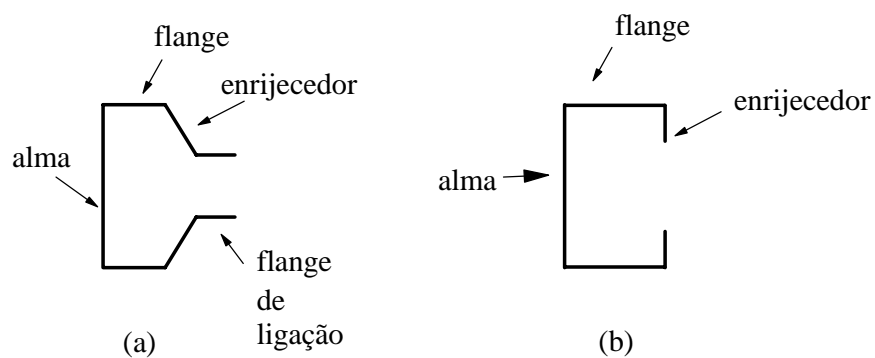


Figura 3.8. Tipos de seção transversal de colunas:(a) Seção tipo “rack” ou “garrafa”;  
b) Seção U enrijecido.

A seção tipo “garrafa” apresenta certa vantagem em relação à U enrijecido por possuir elementos adicionais (flanges de ligação) para instalação dos contraventamentos, foto 3.1.



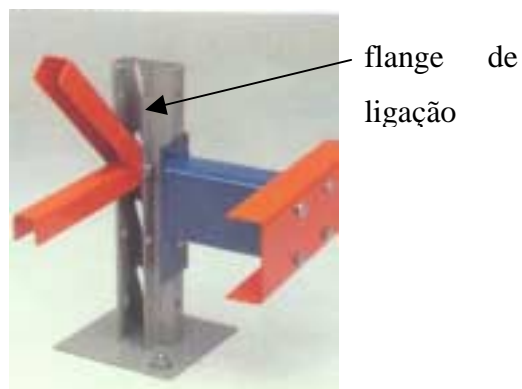


Foto 3.1. Coluna com seção transversal tipo “rack” ou “garrafa”, com flanges adicionais para conexão dos contraventamentos, (Águia (1999a)).

Para posicionamento dos contraventamentos na seção transversal U enrijecido é necessária a instalação de cantoneiras adicionais como apresentado na foto 3.2.

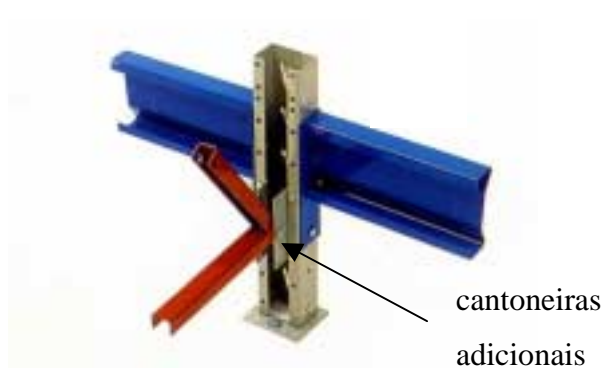


Foto 3.2. Coluna de seção transversal U enrijecido com cantoneiras adicionais para instalação dos contraventamentos, (Isma (2000)).

### 3.2.3. CONTRAVENTAMENTOS

O contraventamento é um dos elementos utilizados para estabilização da estrutura e as seções mais comuns são tipo cantoneira e U enrijecido. No sistema “porta-pallets” e “drive-in” o contraventamento é posicionado na face lateral (figura 3.1). Para garantir a estabilidade, os contraventamentos ainda podem ser colocados ao fundo no sistema e plano horizontal superior.

A figura 3.9 apresenta um tipo de sistema “drive-through” com contraventamentos na face lateral e no plano horizontal superior. Observa-se neste sistema que não há contraventamentos no fundo, devido à armazenagem permitir o acesso pelas faces frontal e posterior. Pode-se utilizar ainda torres de estabilização, nestes sistemas, que são contraventamentos instalados na face frontal ao longo de todo o corredor até a face posterior do sistema.

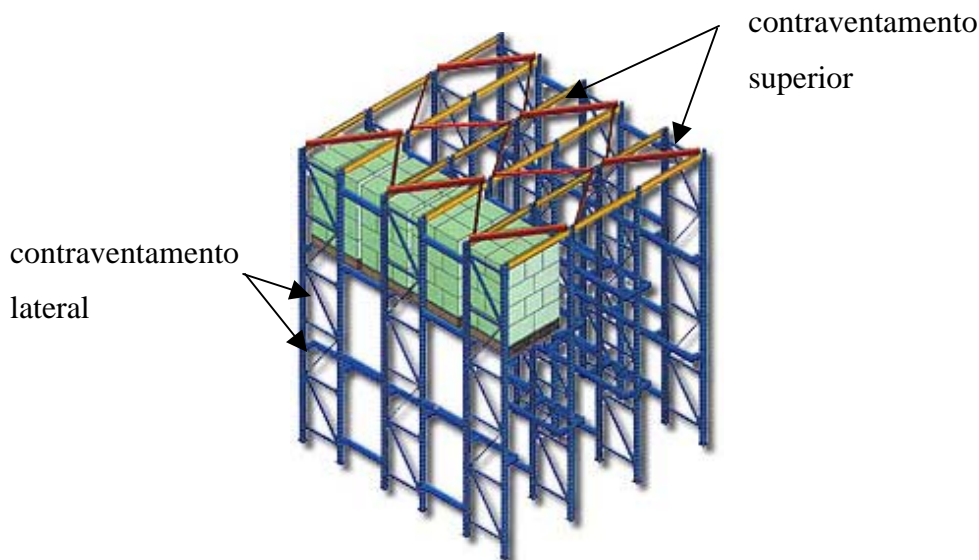


Figura 3.9. Sistema “drive-through” com contraventamentos na face lateral e no plano horizontal superior, (Isma (2000)).

#### **3.2.4. DISTANCIADORES**

Os distanciadores são posicionados na face lateral dos sistemas “porta-pallets” e “drive-in”, em conjunto com os contraventamentos laterais, sendo utilizados para distanciar colunas que não utilizam contraventamentos, figura 3.1.

Na face lateral são utilizados normalmente dois espaçamentos entre colunas, alternando-se os contraventamentos e distanciadores. As seções transversais dos distanciadores são do tipo U simples, como apresentado na figura 3.10.

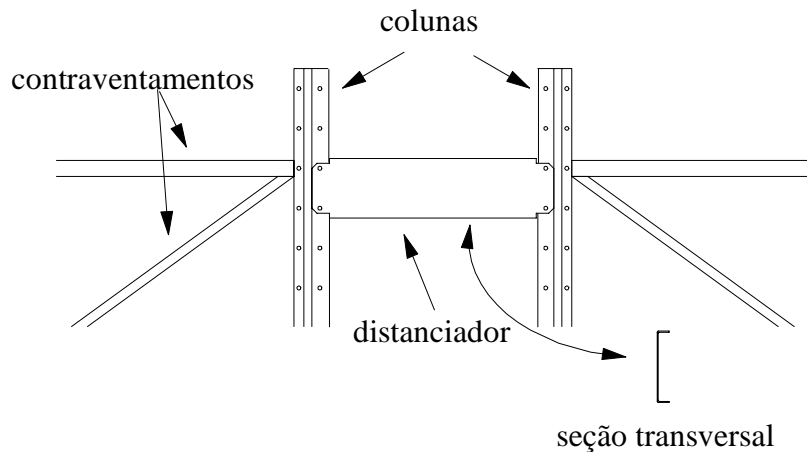


Figura 3.10. Detalhe da posição e seção transversal de distanciadores na face lateral do sistema, (Águia (1999b)).

### 3.2.5. PLACAS DE BASE

As placas de base são constituídas por chapas finas com seções representadas na figuras 3.11. A fixação no piso é através de parafusos que além de fixarem a coluna, garantem a resistência a impactos verticais ascendentes, provocados pelos equipamentos de armazenagem (empilhadeiras). As placas de base são rotuladas na face lateral dos sistemas de armazenagem. Na face frontal a estabilização da estrutura é garantida pelos parafusos de fixação ao piso.

As placas de base são de fundamental importância em estruturas altas e principalmente em sistema 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, Godley (1991). Outro aspecto importante é a fabricação de um concreto adequado para facilitar a ancoragem das colunas (Steel King (1999b)). Um dos tipos de chumbadores utilizados são os chamados “parabolt”. A figura 3.11 ilustra dois modelos de placas de base utilizadas por fabricantes nacionais.

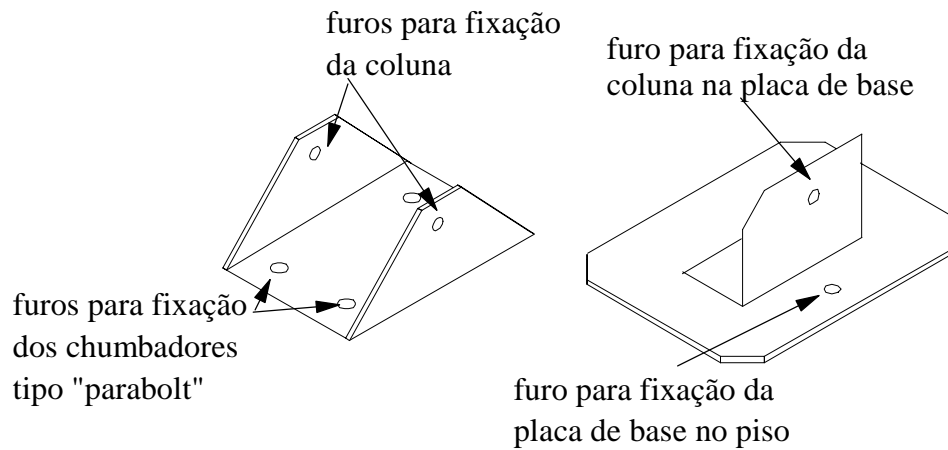


Figura 3.11. Placas de base de sistemas de armazenagem.

### 3.2.6. LIGAÇÕES

As ligações predominantes nos sistemas de armazenagem “racks” são semi-rígidas. Estes elementos podem ser classificados em dois grupos: tradicional, onde a conexão na coluna é feita por meio de parafusos, figura 3.12 e foto 3.3, e outro grupo em que a conexão da ligação à coluna é feita por garras dentadas, que se encaixam à coluna sem utilização de parafusos, (foto 3.4). Do grupo tradicional pode-se destacar que os parafusos se encaixam na alma ou flanges da coluna. Quanto ao grupo de não parafusadas, utilizam dentes que se encaixam na alma da coluna.

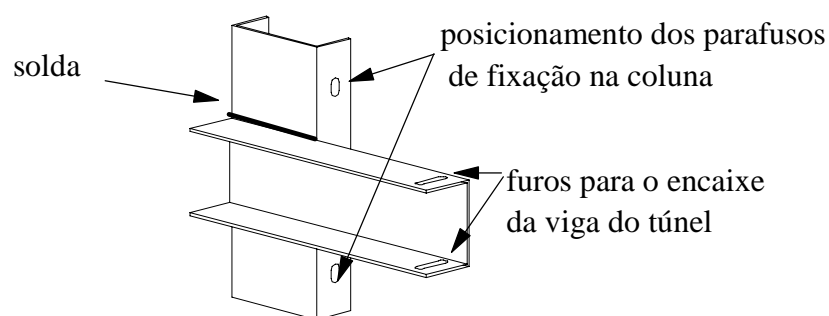


Figura 3.12. Ligação parafusada com fixação no flange da coluna.



Foto 3.3. Ligação parafusada com fixação na alma da coluna, (Águia (1999a)).



Foto 3.4. Ligação com garras dentadas (não-parafusada) utilizada em sistemas de armazenagem industrial,(Isma (2000)).

O posicionamento destas ligações na coluna é facilitado pelas perfurações existentes nas colunas. As ligações não-parafusadas possuem furos para colocação de pinos de segurança, que evitam efeitos de forças ascendentes impostas pelos equipamentos de armazenagem.

### **3.3. ESTABILIDADE**

Neste item serão abordados os principais elementos responsáveis pela estabilização dos sistemas de armazenagem estáticos e a influência de alguns aspectos

construtivos e de operacionalização. São apresentados também alguns critérios de segurança recomendados por fabricantes para a manutenção da integridade dos sistemas.

### 3.3.1. ELEMENTOS ESTABILIZANTES

Nos sistemas “porta-pallets”, a estabilização da estrutura é garantida por contraventamentos laterais e pela rigidez da ligação entre a viga e a coluna. Na face frontal, figura 3.13 (a), a estabilização é garantida pela ligação, e na face lateral por barras horizontais e barras dispostas em diagonal, parafusadas às colunas, figura 3.13 (b). Nos casos em que a rigidez da ligação é insuficiente, adota-se um contraventamento no plano vertical na parte posterior entre os dois módulos, como indicado na figura 3.13 (b).

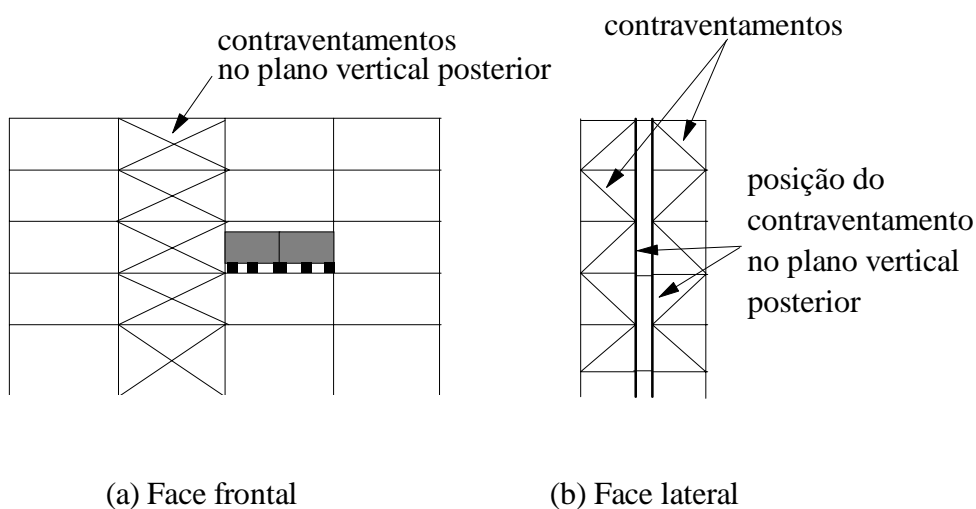


Figura 3.13. Faces do sistema de armazenagem “porta-pallets” com detalhe dos elementos estabilizantes:(a) Face frontal; (b) Face lateral.

No sistema “drive-in” a estabilidade é garantida por contraventamentos, rigidez da base da coluna, da longarina superior e pela rigidez da ligação desta com a coluna. A figura 3.14 (a) apresenta a face frontal do sistema, na qual a rigidez da ligação, a rigidez da placa de base e da longarina garantem a estabilidade. Na face lateral, mostrada na figura 3.14 (b), a estabilidade é garantida da mesma forma que no sistema “porta-

pallets”. Se ainda assim, a estabilização não for satisfatória, pode-se instalar contraventamentos no plano vertical na face posterior do sistema, embora sua eficiência seja reduzida no plano frontal à medida que se aumenta a profundidade do mesmo, Godley (1991). O sistema “drive-through” segue o mesmo procedimento, com exceção do contraventamento vertical. Ele não é permitido pois o acesso no interior do sistema é realizado pelas duas faces, frontal e posterior. Neste caso a estabilidade é garantida pela rigidez do pórtico, ou seja das colunas, placa de base e longarina superior. Se ainda assim a estabilidade não for garantida, pode-se instalar torres de estabilização no sistema, como apresentado na figura 3.14 (a). Essas torres são instaladas ao longo da profundidade da face frontal a posterior, funcionando como um núcleo rígido no sistema.

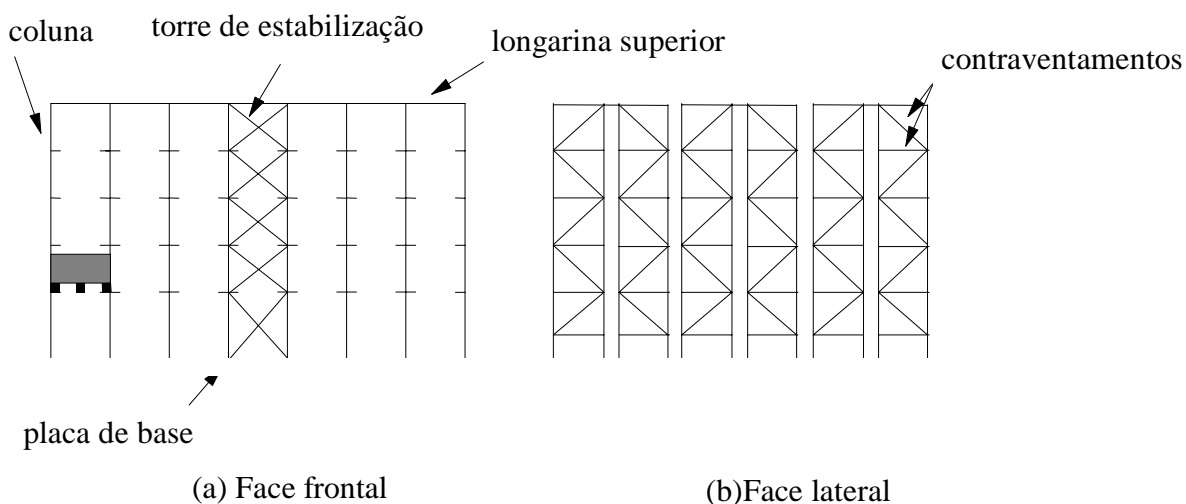


Figura 3.14. Faces do sistema de armazenagem “drive-in” com detalhe dos sistemas estabilizantes:(a) Face frontal; (b) Face lateral.

### 3.3.2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS E DE OPERACIONALIZAÇÃO

Diversos aspectos devem que ser levados em consideração para que não haja prejuízo no desempenho do sistema. Aspectos construtivos tais como: desnivelamentos, imperfeições no piso, colunas fora do prumo e folga na ligação; e aspectos operacionais tais como: impactos acidentais das empilhadeiras.

Inclinação ou imperfeições iniciais são muito comuns em “racks” não-contraventados, em que a ligação é responsável pela rigidez necessária à estabilidade do sistema na face frontal, e surgem devido a problemas de montagem e também por folga na ligação, deixando a estrutura fora do prumo. As prescrições da “Storage Equipment Manufacturer’s Association” SEMA (1980) admitem que a inclinação inicial seja de 0,005 radianos e para o “Rack Manufacturers Institute” RMI (1997), uma inclinação de 12,7 mm em 3 metros de altura.

No projeto das ligações deve-se prever impactos verticais ascendentes provocados pelas empilhadeira ou outros equipamentos. Normalmente são instalados dispositivos com resistência ao esforço cortante para evitar danos à estrutura e acidentes. São dois os tipos de dispositivos: integrante da ligação, nos quais as garras encaixam-se verticalmente nas perfurações (rasgos) das colunas; ou independentes, (figura 3.15), mais usuais, que são pinos de segurança instalados de forma a se obter uma fixação adicional da ligação à coluna. Outro aspecto importante são os impactos provocados pelos equipamentos na base da coluna. Para evitá-los podem ser instalados protetores horizontais, (figura 3.16), ou dispositivos que envolvem a coluna reduzindo-se a possibilidade de acidentes e absorvendo impactos, (figura 3.17).

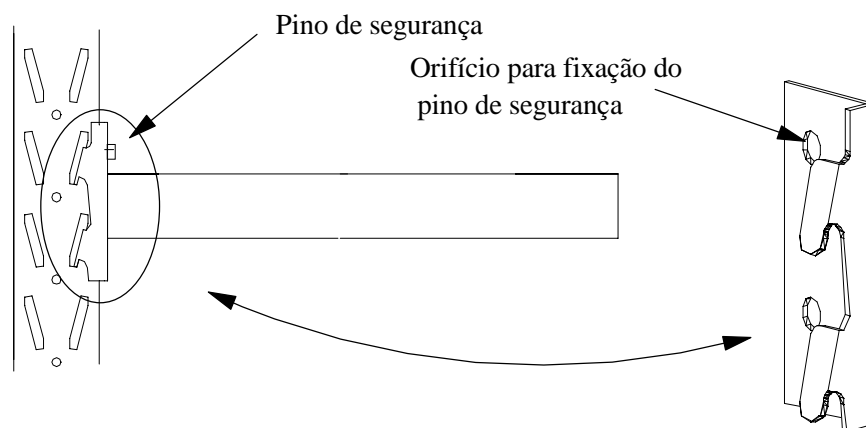


Figura 3.15. Detalhe do dispositivo de segurança horizontal na ligação.



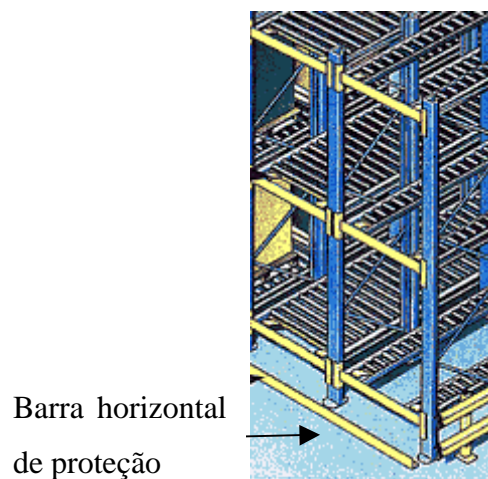


Figura 3.16. Barra horizontal para proteção de colunas, (Dexion (1999)).

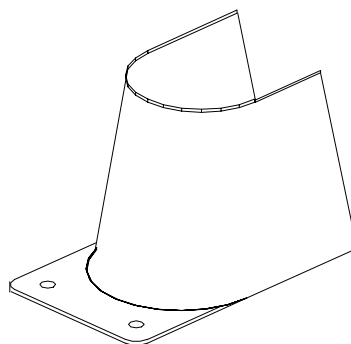


Figura 3.17. Protetor de colunas.

### 3.3.3. CRITÉRIOS DE SEGURANÇA

Embora as colunas possuam perfurações que permitem a mudança de configuração da estrutura, é aconselhável mudá-las apenas com autorização expressa do fabricante, pois qualquer nova configuração pode alterar a capacidade de carga e reduzir a integridade do sistema.

É recomendável nessas estruturas, segundo o manual da Steel King (1999), e especificados no RMI (1997), a instalação de placas com descrição do tipo e capacidade da mesma tais como dimensões, carga máxima por palete e capacidade total. Este procedimento é necessário para evitar solicitações acima do permitido. Por outro lado não é recomendada a instalação de “outdoor”, a menos que seja prevista pelo fabricante,

pois os mesmos podem introduzir solicitações que normalmente não são consideradas no dimensionamento. Além disto, para facilitar a operacionalização são previstos corredores de acesso apropriados para o uso de equipamentos, limpeza e iluminação.

Recomenda-se ainda, pelo menos uma manutenção anual da estrutura para as seguintes verificações:

- possíveis folgas na estrutura;
- prumo e nivelamento da estrutura;
- existência de elementos danificados ou corroídos;
- comparação do tamanho e peso dos paletes, com as especificações de projeto;
- parafusos.

## **CAPÍTULO 4**

### **COLUNA**

#### **4.1. INTRODUÇÃO**

A coluna utilizada no sistema estrutural dos “racks” é um elemento que apresenta particularidades no seu dimensionamento. Uma das principais considerações que devem ser analisadas é a existência de uma seqüência de perfurações que dificultam o estudo analítico do problema. Além disso, as seções transversais são monossimétricas submetidas a carregamento axial e momento nas direções em torno dos eixos principais de inércia.

A configuração das perfurações não permite que a coluna seja enquadrada nas prescrições existentes para dimensionamento de elementos estruturais em perfis de aço formados a frio. Existem, atualmente, vários métodos de dimensionamento propostos pelos fabricantes destas estruturas, como as prescrições desenvolvidas pela SEMA (1980), utilizada na Inglaterra em conjunto com a norma britânica BS-449 (1969), (1975); as especificações do RMI (1997), aplicadas nos Estados Unidos em conjunto com a norma do “American Iron and Steel Institute”, (AISI (1996)) e as prescrições desenvolvidas para serem empregadas em toda a Europa pela “Federation Européenne de la Manutention” FEM (1996), utilizada em conjunto com o Eurocode 3 (1992).

São apresentados, neste capítulo, os diferentes métodos de dimensionamento adotados pelos fabricantes para avaliação da capacidade de carga de colunas, utilizando-se ensaios em colunas curtas para a obtenção da curva de flambagem da coluna segundo a SEMA e FEM, bem como para a determinação da área efetiva, com as determinações dos esforços de compressão e momento fletor segundo o RMI.

## **4.2. ESPECIFICAÇÕES DE NORMAS**

As colunas estão sujeitas a momentos fletores, em torno dos eixos principais de inércia da seção transversal, e a carregamento axial, sendo portanto, dimensionadas como viga-coluna. O dimensionamento empregado nas prescrições utiliza uma equação de interação, que considera as três solicitações isoladamente, dada por:

$$\frac{P}{P_a} + \frac{M_x}{M_{ax}} + \frac{M_y}{M_{ay}} \leq 1 \quad (4.1)$$

onde:

$P$  = carga axial atuante;

$P_a$  = carga axial resistente;

$M_x$  = momento atuante na direção x, da seção transversal;

$M_{ax}$  = momento resistente na direção x, da seção transversal;

$M_y$  = momento atuante na direção y, da seção transversal;

$M_{ay}$  = momento resistente na direção y, da seção transversal.

Para a determinação da capacidade de carga resistente da coluna, deve-se considerar a influência de modos de instabilidade como os de flambagem local, flambagem distorcional, e ainda perfurações e imperfeições oriundas do processo de fabricação. Além disso, os tipos de seções transversais usualmente utilizadas em “racks” são monossimétricas sujeitas a flambagem por flexo-torção. Todas estas considerações nem sempre são prescritas em normas tradicionais de dimensionamento. O método empregado para determinação da capacidade última da coluna utiliza ensaios experimentais e recomendações específicas dos fabricantes.

As recomendações da SEMA, FEM e RMI apresentam algumas diferenças no tratamento da determinação de carga última da coluna, que são detalhadas nos itens seguintes.

#### **4.2.1. PRESCRIÇÕES DA SEMA E FEM**

As prescrições da SEMA e FEM recomendam a determinação da capacidade da coluna para diversos comprimentos e esbeltezes, determinando-se, inicialmente, a posição ótima, ou seja, a posição de aplicação do carregamento que proporcionará a carga máxima para a coluna. Esta posição é obtida através de ensaio de colunas curtas.

A SEMA não recomenda uma posição fixa para aplicação do carregamento. Esta posição pode variar do centro de gravidade da seção bruta, sem a consideração dos furos, ao centro de gravidade da seção da área líquida mínima, considerando-se a seção que passa pelo maior número de furos. A FEM sugere que a aplicação do carregamento seja próxima do centro de gravidade da área líquida mínima.

Após a determinação da posição do carregamento, denominada como posição ótima, e a conseqüente determinação da capacidade da coluna pelo ensaio da coluna curta, ambas as prescrições recomendam uma série de ensaios com comprimentos variados sob carregamento aplicado na posição obtida pelo ensaio de coluna curta, visando a determinação da curva de flambagem da coluna. A FEM recomenda ainda a realização de ensaios com a coluna conectada aos seus contraventamentos previstos no projeto, para avaliar-se todas as suas possíveis influências na estrutura real.

#### **4.2.2. PRESCRIÇÕES DO RMI**

As prescrições do RMI são baseadas nas especificações do AISI que utiliza o procedimento de dimensionamento para elementos não perfurados sendo considerada, no cálculo da área efetiva, a influência dos furos existentes na coluna ((Peköz (1988)). Assim é utilizada a equação 4.2 na determinação da capacidade da coluna para a área líquida mínima da seção transversal.

$$P_n = A_e F_n \quad (4.2)$$

onde:

$P_n$  = carga nominal axial;

$A_e$  = área efetiva da seção transversal da coluna, admitida como a área líquida mínima da seção transversal da coluna;

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

Da equação 4.2 pode-se observar que o parâmetro de difícil determinação é a área efetiva. Estudos anteriormente desenvolvidos (Ortiz-Colberg e Pekoz (1981)) utilizados pelo AISI apresentam uma formulação para determinação da área efetiva de perfis com furos circulares regulares. No entanto, as seções de colunas utilizadas nos sistemas de armazenagem “rack” apresentam geometrias dos furos muito variadas, dificultando uma formulação direta para determinação da área efetiva.

Para determinação da área efetiva de uma seção qualquer com furos, pode-se utilizar a equação 4.3 (Peköz (1987)), que está contida no RMI.

$$A_e = \left[ 1 - (1 - Q) \left( \frac{F_n}{f_{ya}} \right)^Q \right] A_{net\ min} \quad (4.3)$$

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;

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

O ensaio de coluna curta para elementos perfurados é utilizado na determinação do fator  $Q$ , que é definido como a razão entre a resistência última, obtida a partir da média das cargas últimas experimentais, ( $P_{ua}$ ), e a tensão de escoamento ( $f_{ya}$ ),

multiplicada pela área líquida mínima média das colunas ensaiadas ( $A_{\text{anetmin}}$ ) igual a média dos valores medidos nos protótipos das seções ensaiadas.

$$Q = \frac{P_{ua}}{f_{ya} A_{\text{anetmin}}} \quad (4.4)$$

onde:

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

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

O RMI e AISI permitem ainda que para colunas de mesma seção transversal e espessuras diferentes, a determinação de  $Q$  seja feita por interpolação linear a partir do ensaio da seção com maior e menor espessura, e o valor intermediário será dado por:

$$Q = Q_{\text{mín}} + \frac{(Q_{\text{máx}} - Q_{\text{mín}})(t - t_{\text{mín}})}{(t_{\text{máx}} - t_{\text{mín}})} \quad (4.5)$$

onde:

$Q_{\text{mín}}$  = fator  $Q$  determinado pelo ensaio de coluna curta, segundo a equação 4.4 com espessura mínima ( $t_{\text{mín}}$ );

$Q_{\text{máx}}$  = fator  $Q$  determinado pelo ensaio de coluna curta, segundo a equação 4.4 com espessura máxima ( $t_{\text{máx}}$ ).

Esses resultados porém só são válidos se o aço empregado possuir as mesmas propriedades mecânicas e a diferença da tensão de escoamento entre os corpos de prova do material da coluna curta não deverá exceder 20%.

O fator  $Q$ , fisicamente, só tem significado se for menor que a unidade. Porém nos resultados dos ensaios experimentais pode-se superar esse valor, devido aos efeitos de conformação do perfil e nestes casos o valor adotado deve ser o unitário.

Para realização do ensaio de coluna é necessário determinar o comprimento adequado, que 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.

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

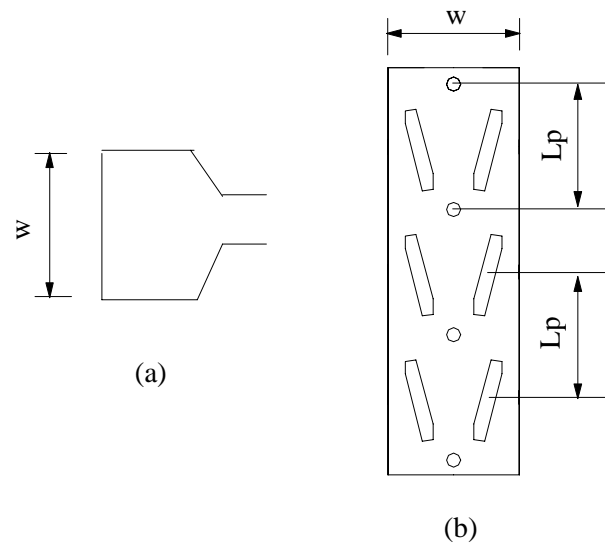


Figura 4.1. Identificação da maior largura da seção transversal bruta ( $W$ ) e da distância de eixo a eixo das perfurações, ( $L_p$ ): (a) Seção transversal tipo “rack” com a identificação de  $W$ ; (b) Vista frontal da coluna com as dimensões de  $W$  e  $L_p$ .

A figura 4.2 apresenta 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).



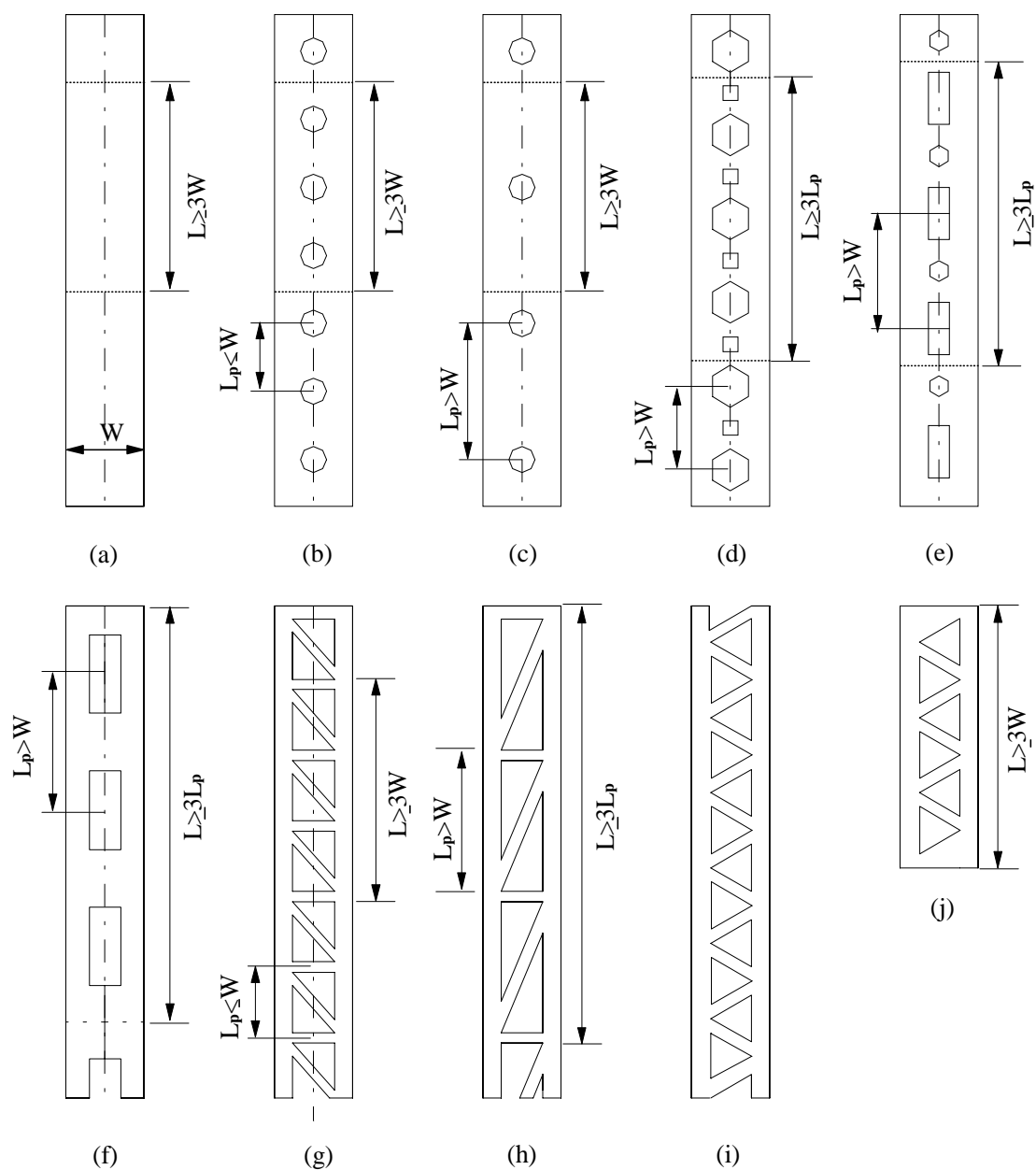


Figura 4.2. Tipos de perfurações com a indicação do comprimento mínimo da coluna curta, AISI (1996)

A figura 4.3 apresenta a configuração do ensaio da coluna curta submetida à compressão de acordo com o AISI.

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.

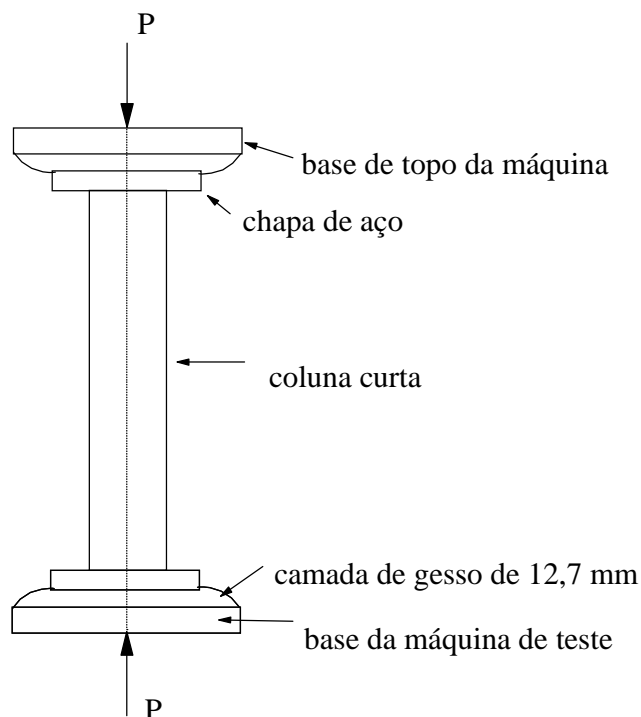


Figura 4.3. Esquema do ensaio da coluna curta

Para determinação do momento fletor, 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 avaliação da resistência aos esforços de flexão utiliza os resultados obtidos no ensaio da coluna curta, com a consideração da influência dos furos através do fator  $Q$  (equação 4.4). O uso desse procedimento é conservador devido ao gradiente de tensão na alma da seção transversal, em que a contribuição dos esforços de tração não são levadas em consideração na obtenção do fator  $Q$ , que considera uma redução de toda 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 4.6 que o módulo elástico efetivo da fibra mais extrema

comprimida é igual ao produto entre o módulo elástico da área líquida mínima efetiva pelo fator redutor à flexão.

$$W_e = W_{net} \left( 0,5 + \frac{Q}{2} \right) \quad (4.6)$$

onde:

$W_e$  = 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.

O outro termo que sofre alteração para considerar a influência dos furos é o módulo elástico da seção efetiva utilizando a área líquida mínima para uma tensão de flambagem lateral igual a  $M_c/W_f$  da seção transversal bruta. Da mesma forma de  $W_e$  é utilizado um fator redutor à flexão, multiplicado-o pelo módulo elástico efetivo da área líquida mínima, como apresentado na equação 4.7.

$$W_c = W_{net} \left[ \frac{1-Q}{2} \left( \frac{M_c/W_f}{f_y} \right) \right] \quad (4.7)$$

onde:

$W_c$  = 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 extrema comprimida;

$f_y$  = tensão do escoamento do aço.

O RMI recomenda que no cálculo do momento elástico crítico, as propriedades geométricas sejam baseadas nas dimensões da seção transversal bruta, considerando-se

os cantos arredondados, exceto para a constante de torção de “Saint Venant” ( $J$ ), o parâmetro usado para determinação do momento crítico elástico ( $j$ ), o raio de giração polar ( $r_o$ ) e a constante de empenamento à torção ( $C_w$ ), onde o cálculo considera os cantos retos. Em seguida, utiliza-se o procedimento apresentado no AISI, para elementos fletidos, não sendo recomendado o uso do procedimento baseado na capacidade de reserva inelástica, devido à necessidade de maiores estudos para elementos perfurados.

## **CAPÍTULO 5**

### **LIGAÇÕES**

#### **5.1. INTRODUÇÃO**

As ligações podem ser classificadas em rígidas, semi-rígidas e flexíveis. Nos sistemas “racks”, são empregadas ligações de comportamento semi-rígido parafusadas e não-parafusadas que se utilizam de garras com dentes como meio de ligação.

Neste capítulo são apresentadas as características dessas ligações e também os procedimentos para determinação da rigidez através de ensaios experimentais por meio das prescrições do RMI (1997) e em estudos anteriormente desenvolvidos (Godley (1991), (1997)).

#### **5.2. LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS**

Trabalhos como os de Jones et al. (1983) e Anderson et al. (1993) tratam do comportamento de ligações semi-rígidas em pórticos. Até recentemente não se utilizava em projetos, a rigidez destas ligações, considerando-as rotuladas para fins de dimensionamento. Atualmente, considerando-se a competitividade do mercado, a determinação da rigidez da ligação na estrutura torna-se importante, pois gera economia através da redução do quantitativo dos materiais, (Lewis (1997)).

Os fabricantes de sistemas “racks” desenvolveram procedimentos de ensaios experimentais para o cálculo da rigidez das ligações, como os propostos pelo RMI dos Estados Unidos que propõe o ensaio de uma viga em balanço submetida à flexão (“cantilever test”), que permite a obtenção da curva momento-rotação da ligação.

### **5.3. ENSAIO DA VIGA EM BALANÇO (“CANTILEVER TEST”)**

O ensaio da viga em balanço (“cantilever test”) é utilizado para determinar o comportamento momento-rotação da ligação, que é empregado na determinação da rigidez. O RMI esclarece que o único esforço considerado é o momento fletor, não sendo bem representada a contribuição da força cortante na ligação.

O RMI recomenda o “cantilever test” como método de obtenção do valor da rigidez, considerando-se sempre uma relação linear entre o momento e a rotação.

O esquema do ensaio consiste de uma coluna curta com suas extremidades fixas e, normalmente em posição intermediária da coluna, é instalada a ligação com o carregamento sendo aplicado na extremidade da viga. Um transdutor de deslocamento é instalado para que se possa medir os deslocamentos durante a aplicação do carregamento. Através dos valores experimentais das cargas e deslocamentos, pode-se obter as curvas momento-rotação e carga-deslocamento da ligação. A figura 5.1 apresenta um esquema geral do ensaio segundo o RMI.

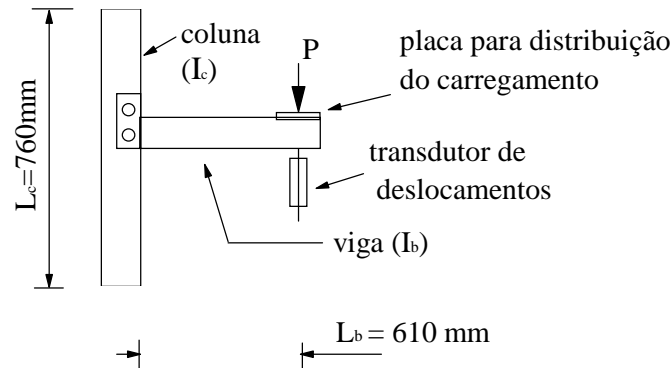


Figura 5.1. Esquema do ensaios da viga em balanço (“Cantilever Test”) segundo as prescrições do RMI.

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;

De acordo com o RMI, o ponto de aplicação do carregamento é sempre na extremidade da viga, utilizando-se um único transdutor de deslocamentos, posicionado na mesma linha de ação do carregamento. Os comprimentos da coluna, e do braço de alavanca da viga estão indicados na figura 5.1.

Para a determinação da rigidez de um mesmo tipo de ligação são necessários no mínimo dois ensaios segundo o RMI. No entanto, se o desvio-padrão ou erro relativo exceder 10%, é necessário um terceiro ensaio. A média dos dois maiores valores é utilizada como o valor da rigidez da ligação. No procedimento adotado por Markazi et al. (1997) são realizados, no mínimo, três ensaios experimentais sendo o resultado da rigidez a média aritmética desses valores.

#### **5.4. DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA LIGAÇÃO ATRAVÉS DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

A curva momento-rotação, obtida através do “cantilever test”, representa o comportamento das ligações. A curva da figura 5.2 ilustra a rotação de uma ligação em função do momento aplicado.

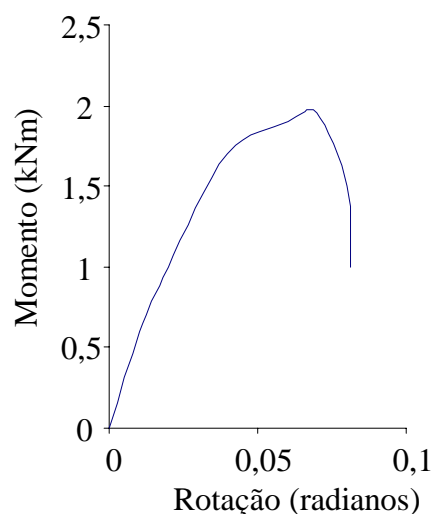


Figura 5.2. Resultados momento-rotação obtidos por ensaio experimental da ligação.

#### 5.4.1. DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA LIGAÇÃO

De acordo com Godley (1991), vários métodos podem ser empregados para o cálculo da rigidez de uma ligação, e a eficiência dos mesmos depende principalmente da linearidade da parte inicial da curva. Em todos os métodos faz-se uma aproximação linear da curva, podendo-se escrever que a rigidez da ligação é dada por:

$$k = \frac{M}{\theta} \quad (5.1)$$

onde:

$k$  = rigidez da ligação (kNm/rad);

$M$  = momento (kNm);

$\theta$  = rotação da ligação (radianos).

A inclinação da reta fornecerá, portanto, o valor ( $k$ ) calculado da rigidez. Serão apresentados três métodos usuais no cálculo da rigidez de ligações empregadas nos sistemas de armazenagem.

Um primeiro método, denominado Método da Inclinação Inicial, representado na figura 5.3, consiste em traçar uma reta passando pela origem, e interceptando a curva no seu trecho inicial. A inclinação da reta representa a rigidez da ligação. Este método é muito impreciso e de difícil utilização para os casos em que o comportamento da ligação seja fortemente não-linear.



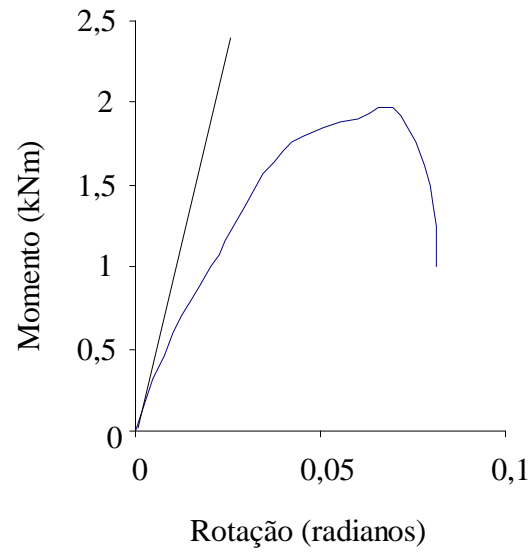


Figura 5.3. Método da Inclinação Inicial.

Um segundo método, Godley (1997), denominado Método das Áreas Iguais, calcula a rigidez estabelecendo-se a igualdade entre as áreas hachuradas  $A_1$  e  $A_2$ , conforme ilustrado na figura 5.4.

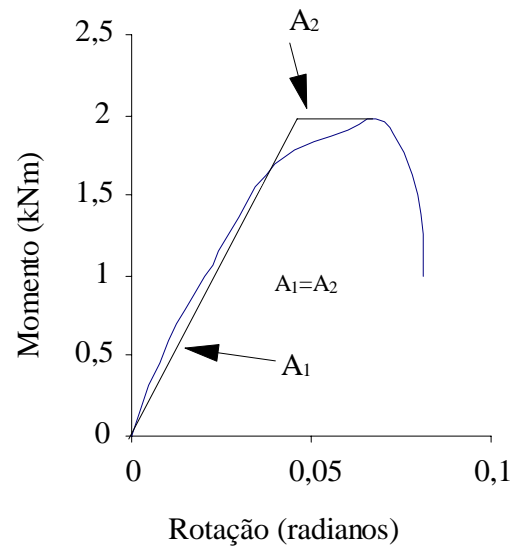


Figura 5.4. Método das Áreas Iguais.

Observa-se que este método não é muito utilizado em prescrições de normas devido a sua operacionalização.

Um outro método, ilustrado na figura 5.5, denominado Método da Inclinação a 50% do Momento Último, consiste em medir a inclinação de uma reta passando pela origem e pela coordenada correspondente a 50% do momento último ( $M_u$ ).

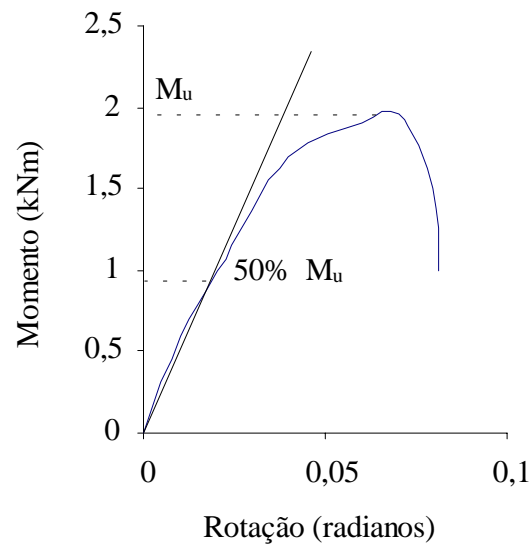


Figura 5.5. Método da Inclinação a 50% do Momento Último.

Nas análises dos resultados experimentais nos capítulos seguintes, este método será utilizado para avaliação da rigidez das ligações estudadas.

#### 5.4.2.DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ PELO RMI

A rigidez pode ser determinada supondo-se que a relação momento-rotação seja linear, sendo que a rotação pode ser expressa por:

$$\theta = \frac{M}{F} \quad (5.2)$$

onde:

$F$  = constante da mola, ou rigidez da ligação (kNm/rad);

$M$  = momento da ligação (kNm);

$\theta$  = rotação (radianos).

A rigidez ( $F$ ) da ligação pode ser calculada através da equação 5.3 onde é considerada uma análise linear.

$$F = \frac{R.F.}{\frac{\delta_{0,85}}{P_{0,85}} - \frac{L_c}{16EI_c} - \frac{L_b}{3EI_b}} \quad (5.3)$$

onde:

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

$F$  = rigidez da ligação (kNm/rad)

$\delta_{0,85}$  = 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 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;

R.F. = fator de minoração para levar em consideração a dispersão dos resultados que é igual a:

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

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

Como pode-se observar, as variáveis da equação 5.3 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 5.6.

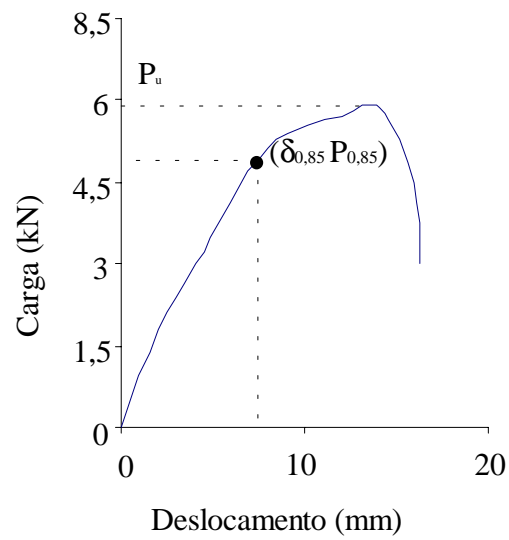


Figura 5.6. Curva carga-deslocamento de uma ligação com indicação da carga última ( $P_u$ ) e do par ordenado  $(\delta_{0,85} ; P_{0,85})$ .

## **CAPÍTULO 6**

### **PROGRAMA EXPERIMENTAL**

#### **6.1. INTRODUÇÃO**

São apresentados, neste capítulo, os procedimentos adotados nos ensaios experimentais realizados. Para o estudo do sistema de armazenagem industrial tipo “drive-in”, foram realizados ensaios de coluna, de ligação da longarina e de ligação do braço.

Os elementos ensaiados foram fabricados pela empresa Águia Sistemas de Armazenagem de um sistema “drive-in”, cujo projeto encontra-se no anexo I.

Para as colunas, foram analisados a carga última e o mecanismo de colapso, sendo também observados os possíveis modos de instabilidade. Através dos ensaios em colunas curtas foi determinada a área efetiva da seção transversal da coluna, de acordo com os procedimentos recomendados pelo RMI, apresentados no capítulo 4.

Nas ligações do braço e longarina, o objetivo foi determinar a rigidez da ligação através do ensaio da viga em balanço (“cantilever test”) e de acordo com os procedimentos do RMI (1997) e pelo Método da Inclinação a 50% do Momento Último, conforme apresentado no capítulo 5, observando-se também o modo de colapso das ligações.

#### **6.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL**

O aço utilizado nos ensaios foi caracterizado através de ensaios de tração em corpos de prova confeccionados e ensaiados de acordo com as especificações da norma “American Society for Testing and Materials”, ASTM (1995). A geometria dos corpos de prova e a nomenclatura adotada são apresentadas na figura 6.1, e na tabela 6.1 apresentam-se as dimensões dos corpos de prova após a usinagem. Foram fabricados três corpos de prova denominados CPC-1 a CPC-3 extraídos do mesmo lote das colunas

ensaiadas, aço ASTM A570 G36 com espessura média de 2,65 mm, e três corpos de provas, denominados CPL-1 a CPL-3, extraídos do mesmo material da ligação da longarina (aço SAE 1008), com espessura média de 2 mm.

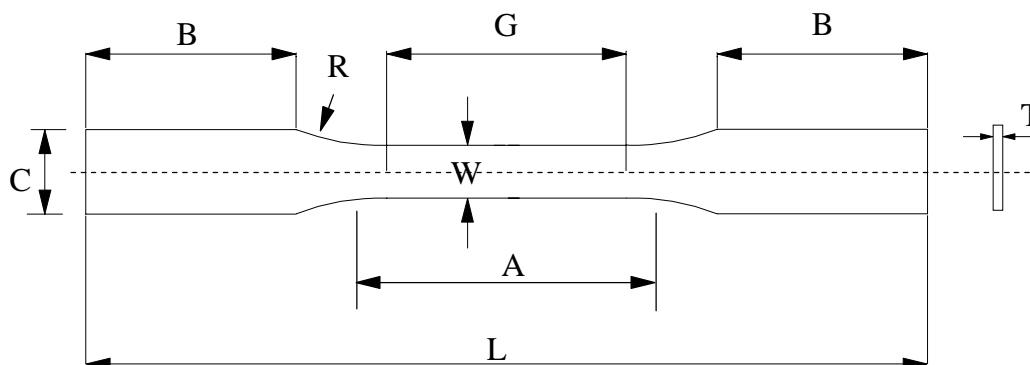


Figura 6.1. Nomenclatura adotada pela ASTM (1995) para o corpo de prova do ensaio de tração.

Onde:

W = largura do corpo de prova;

G = comprimento inicial;

A = comprimento da parte útil;

R = raio de concordância;

B = comprimento da cabeça de fixação do corpo de prova;

L = comprimento total do corpo de prova;

C = largura da cabeça de fixação do corpo de prova;

T = espessura do corpo de prova.

Tabela 6.1. Dimensões dos corpos de prova ensaiados.

<b>Corpos de prova</b>	<b>W (mm)</b>	<b>T (mm)</b>	<b>A (mm)</b>	<b>G (mm)</b>	<b>L (mm)</b>
CPC-1	12,70	2,65	57	50	200,00
CPC-2	12,85	2,70	57	50	200,00
CPC-3	13,16	2,65	57	50	200,55
CPL-1	13,36	2,08	57	50	201,50
CPL-2	13,30	2,10	57	50	203,00
CPL-3	13,35	2,11	57	50	203,00

Os ensaios foram realizados em máquina de tração modelo KRATOS com velocidade de deformações controlada, obtendo-se a tensão limite de escoamento do aço ( $f_{ya}$ ), a tensão limite de resistência à tração ( $f_u$ ) e o alongamento residual após a ruptura do aço, cujos valores médios são apresentados na tabela 6.2.

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

<b>Corpo de Prova</b>	<b><math>f_{ya}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_u</math> (MPa)</b>	<b>Alongamento residual após a ruptura (%)</b>
<b>CPC-1</b>	319,858	338,125	48,9
<b>CPC-2</b>	321,151	327,00	53,76
<b>CPC-3</b>	319,677	330,358	42,52
<b>Valor Médio</b>	<b>320,229</b>	<b>331,827</b>	<b>48,39</b>
<b>CPL-1</b>	368,132	412,665	24,84
<b>CPL-2</b>	357,382	414,152	22,86
<b>CPL-3</b>	355,951	424,402	25,14
<b>Valor Médio</b>	<b>360,488</b>	<b>417,074</b>	<b>24,28</b>

### **6.3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO E IMPERFEIÇÕES**

Os perfis formados a frio são fabricados a partir de bobinas de chapas finas laminadas à quente ou a frio. Existem dois processos para conformação destes perfis na seção transversal desejada: fabricação contínua em mesa de roletes, onde os perfis são conformados gradualmente por roletes, e fabricação em dobradeiras, onde a conformação é por prensagem.

Os perfis das colunas com seção tipo “rack” utilizados nos ensaios foram conformados em perfiladeiras. O processo de fabricação inicia-se pela execução dos furos nas chapas, denominado estampagem. Após a estampagem, as chapas são conformadas nas mesas de roletes.

Os processos de estampagem e conformação adicionam tensões residuais e imperfeições geométricas nos perfis que foram observadas a partir do controle dos valores das dimensões dos protótipos das colunas ensaiadas.

O fabricante dos sistemas cujos perfis foram ensaiados utiliza processo de pintura dos elementos que compõem a estrutura, denominado de pintura a seco. Neste processo, as peças após a conformação recebem jateamento de pó de pintura, e passam por estufa para garantir a fixação da pintura. Este processo é de boa qualidade tendo-se uma camada de pintura com espessura uniforme.

#### **6.4. COLUNAS**

Neste item serão apresentados os procedimentos adotados nos dois programas de ensaios experimentais desenvolvidos para as colunas. Foram realizados cinco ensaios com tamanhos diferentes de colunas: um com comprimento de 800 mm que será chamado de coluna longa e quatro com comprimento de 260 mm, chamados de colunas curtas. Para determinação do comprimento da coluna curta de 260 mm foram utilizados os procedimentos descritos no item 4.2.2 de acordo com as especificações do RMI.

A identificação das faces componentes da seção transversal dos protótipos ensaiados e a nomenclatura utilizada para suas dimensões na linha média estão representadas na figura 6.2 (a) e (b). A identificação da seção transversal de área líquida mínima e a posição do centro de gravidade correspondente  $CG_{\min}$  são apresentadas na figura 6.3.

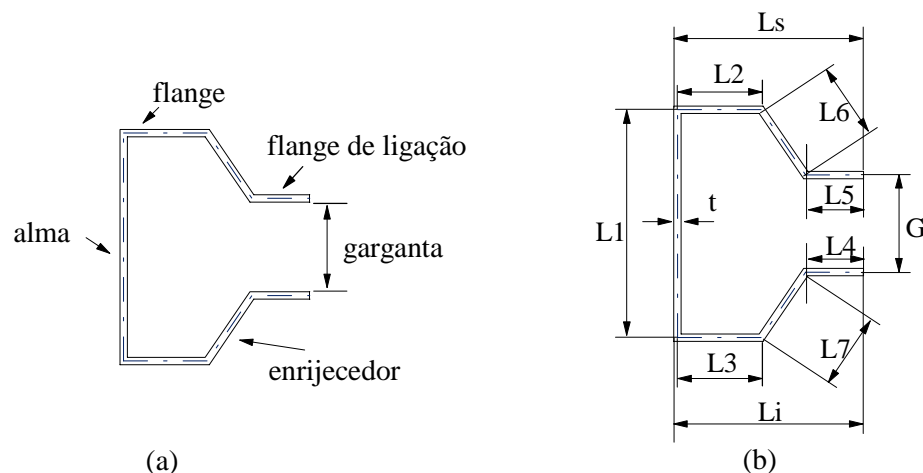


Figura 6.2. Identificação e nomenclatura da seção transversal dos protótipos ensaiados:

(a) Identificação das faces componentes da seção transversal; (b) Nomenclatura utilizada considerando as dimensões da linha média da seção transversal.



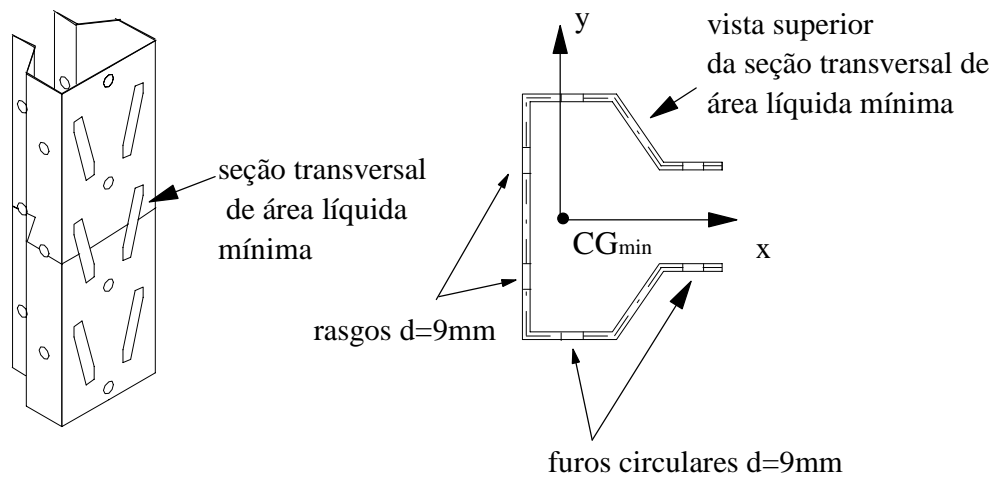


Figura 6.3. Seção transversal considerando a área líquida mínima com a indicação da posição do  $CG_{min}$ .

#### 6.4.1. ENSAIO DA COLUNA LONGA

Este ensaio teve como objetivo avaliar qualitativamente, os fenômenos de flambagem e modo de ruína de uma coluna de 800 mm submetida a compressão centrada no centro de gravidade da área líquida mínima.

O programa experimental foi constituído do ensaio de uma coluna de seção transversal tipo “rack” e perfurações ao longo do comprimento, denominada CMAX-1, figura 6.4. Observa-se que na extremidade do protótipo tem-se uma descontinuidade na seção através de um semi-círculo que não é recomendado nas prescrições de norma, em função da concentração de tensões nas extremidades de aplicação do carregamento (Peköz (1987) e AISI (1996)).

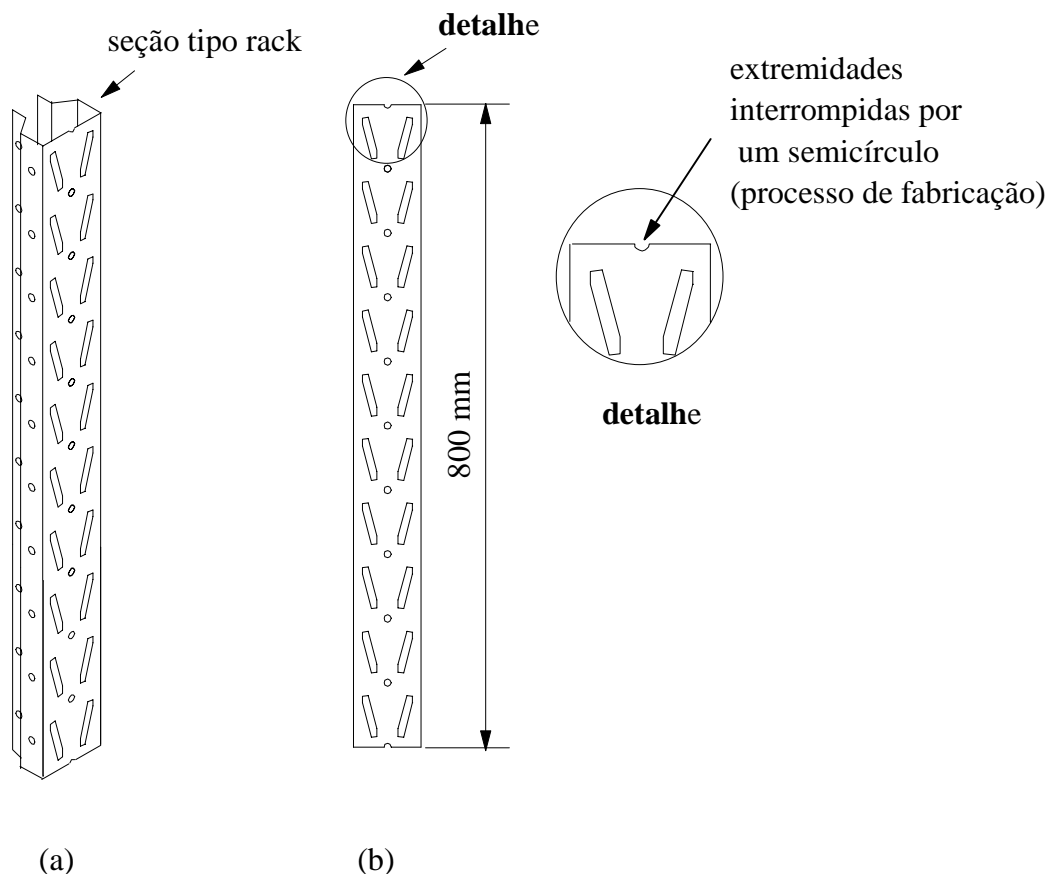


Figura 6.4. Vista geral do protótipo CMAX-1: (a) Vista em perspectiva do protótipo CMAX-1; (b) Vista frontal com o comprimento do protótipo CMAX-1 e detalhe do semicírculo na extremidade da seção da alma da coluna.

Na tabela 6.3 são apresentadas as dimensões médias do protótipo CMAX-1 ensaiado. A diferença entre as dimensões são atribuídas às imperfeições geométricas, oriundas da conformação do perfil.

Tabela 6.3. Dimensões da linha média da seção transversal do protótipo CMAX-1, de acordo com a nomenclatura adotada na figura 6.2 (b).

Protótipo	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	L6 (mm)	L7 (mm)	Ls (mm)	Li (mm)	G (mm)	t (mm)
CMAX-1	81,17	32,03	31,95	21,56	19,85	24,33	23,55	67,79	67,12	41,08	2,65

O centro de gravidade da seção transversal de área líquida mínima,  $CG_{\min}$  localiza-se a 21,415 mm, da face da alma para o protótipo da coluna longa, onde foi posicionado a aplicação do carregamento, durante o ensaio.

#### **6.4.1.1. Esquema de montagem**

Na foto 6.1 é apresentado o esquema geral de montagem adotado para realização dos ensaios de compressão da coluna longa (800 mm). O ensaio foi realizado utilizando-se um pórtico de reação com a coluna instalada entre placas planas previamente fixadas em um sistema de rótulas universais.



Foto 6.1. Esquema geral de montagem do ensaio da coluna longa.

A figura 6.5 apresenta o esquema de fixação do protótipo nas placas do sistema de rótulas universais com 12,7 mm, e placas de 6,3 mm utilizadas para soldagem de dois pares de cantoneiras. As cantoneiras foram utilizadas para fixação da coluna e são dotadas de furos laterais, coincidentes com os furos existentes nos flanges onde foram instalados parafusos, que garantiram a fixação da coluna. Na parte superior da montagem foram instalados parafusos que garantiram sustentação ao conjunto até o início do ensaio.

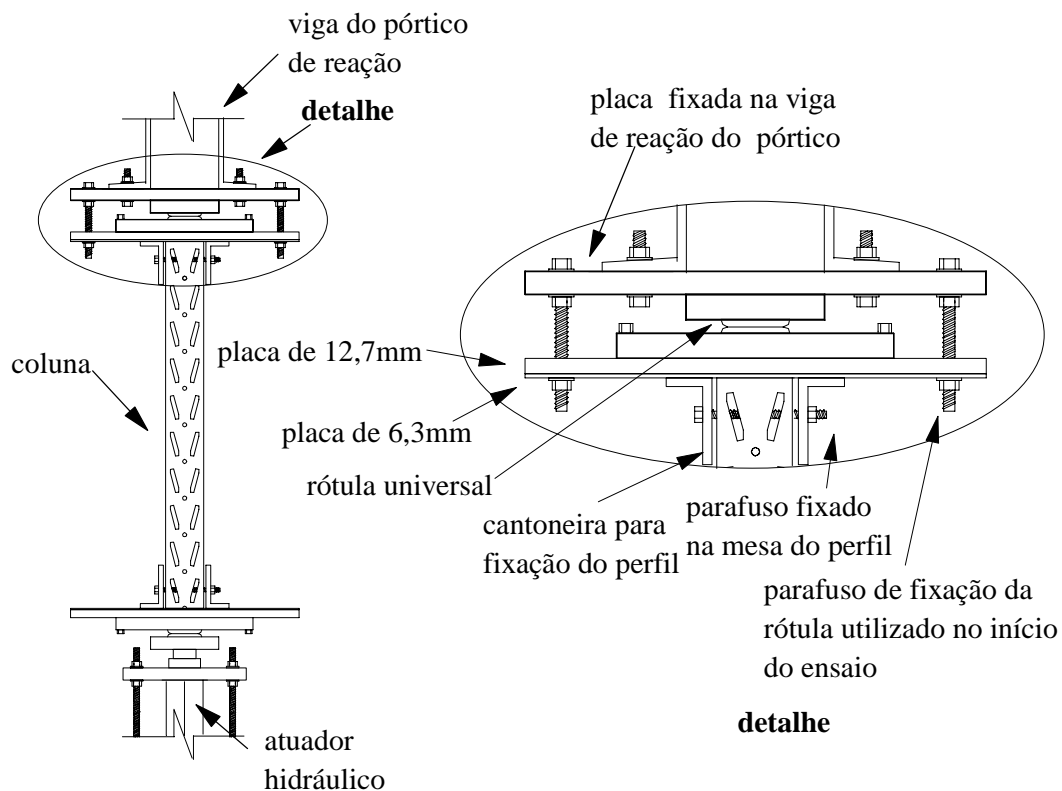


Figura 6.5. Esquema de ensaio do protótipo CMAX-1, com detalhe da montagem da rótula na parte superior.

#### **6.4.1.2. Instrumentação**

O carregamento foi aplicado através de atuador hidráulico ENERPAC com capacidade de 294 kN. Os valores da carga aplicada foram obtidos através de transdutor de pressão, SODMEX de  $7 \text{ kN/cm}^2$ , acoplado ao sistema de aquisição automática

controlado por um computador com placa conversora A/D (LINX) e software de monitoração e controle do ensaio.

#### **6.4.1.3. Metodologia**

Inicialmente realizou-se um pré-ensaio até aproximadamente 30% do carregamento último considerando a área líquida mínima da seção transversal, para avaliação dos sistemas de aquisição de dados e de aplicação do carregamento. Logo em seguida, foi realizado o ensaio com aplicação do carregamento até o valor de 18,894 kN, quando foram retirados os parafusos de sustentação da rótula superior, garantindo a segurança do conjunto. O carregamento foi aplicado em incrementos de aproximadamente 9,81 kN até que se atingisse o colapso da coluna.

#### **6.4.2. ENSAIO DAS COLUNAS CURTAS**

Os ensaios das colunas curtas foram realizados para avaliação da área efetiva da seção transversal da coluna através da determinação do fator  $Q$ , como apresentado no item 4.2.2. Foram ensaiadas quatro colunas curtas, denominadas CCMAX-1 a CCMAX-4, com o carregamento aplicado no centro de gravidade da seção de área líquida mínima.

Para os protótipos ensaiados, o comprimento das colunas deve ser definido como maior ou igual a  $3W$ , em função de  $W$  ser maior que  $L_p$ . Na figura 6.6 (a) e (b), tem-se a representação do protótipo ensaiado com os valores de  $W = 84 \text{ mm}$  e  $L_p = 80 \text{ mm}$ . Portanto, o comprimento mínimo adotado foi governado pela largura máxima da seção transversal  $W$ , sendo seu valor de 260 mm. Além da dimensão mínima é recomendado que não haja nenhuma influência de furos nas extremidades. Partindo desse princípio os quatro protótipos ensaiados foram confeccionados sem furos na extremidade.

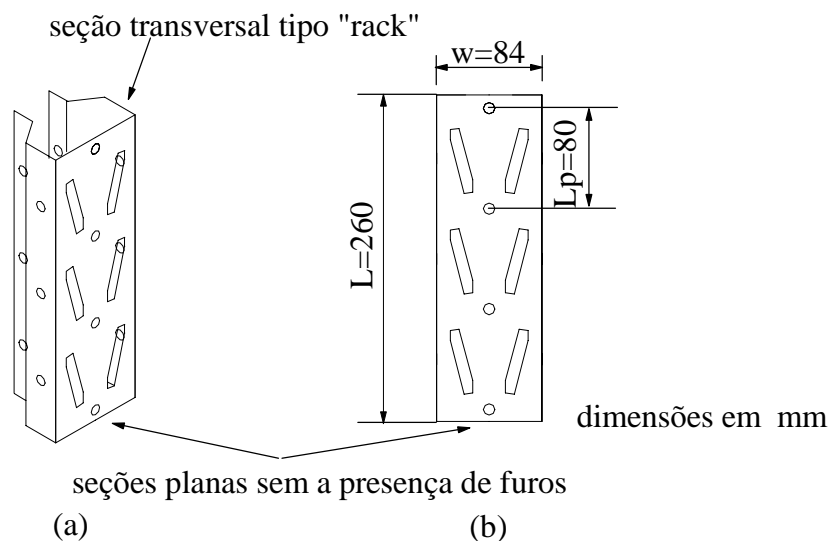


Figura 6.6. Vista geral dos protótipos ensaiados: (a) Vista em perspectiva dos protótipos ensaiados; (b) Vista com as dimensões da largura máxima da seção  $W$ , distância entre furos  $L_p$  e comprimento total  $L$ .

As dimensões médias reais dos 4 protótipos ensaiados constituídos de chapas de 2,65 mm, considerando-se a linha média da seção e segundo a nomenclatura da figura 6.2 (b), são apresentadas na tabela 6.4. Para cada protótipo foram tomadas três medições da seção transversal: nas extremidades e à meia altura dos mesmos, sendo apresentados na tabela 6.4 os valores médios.

Tabela 6.4. Dimensões da seção transversal dos protótipos ensaiados, de acordo com a nomenclatura adotada na figura 6.2 (b).

Corpos de prova	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	L6 (mm)	L7 (mm)	Ls (mm)	Li (mm)	G (mm)
CCMAX-1	81,23	31,83	31,78	22,22	19,15	23,98	23,45	66,85	66,93	40,57
CCMAX-2	81,15	31,83	31,25	22,33	19,23	24,17	22,97	67,40	66,75	41,40
CCMAX-3	81,25	32,55	31,90	22,27	19,20	24,57	23,52	67,18	67,03	41,48
CCMAX-4	81,03	31,92	32,87	19,42	21,83	24,62	24,28	67,05	66,48	40,87

Na tabela 6.5 são apresentadas as posições do centro de gravidade da seção considerando a área líquida mínima da seção de acordo com a figura 6.3.

Tabela 6.5. Posição do centro de gravidade considerando área líquida mínima ( $CG_{\min}$ ) dos protótipos CCMAX.

Protótipos	$CG_{\min}$
CCMAX-1	21,925
CCMAX-2	21,431
CCMAX-3	21,428
CCMAX-4	21,636

#### **6.4.2.1. Metodologia**

O esquema de montagem utilizado no ensaio está representado na figura 6.7. Observa-se o posicionamento da coluna na prensa hidráulica KRATOS com escala de 196,2 kN e sensibilidade de 0,49 kN. Na foto 6.2 apresenta-se uma vista geral da montagem. 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,  $CG_{\min}$ , fazendo-se coincidir o centro da placa com a posição do  $CG_{\min}$  da seção transversal.

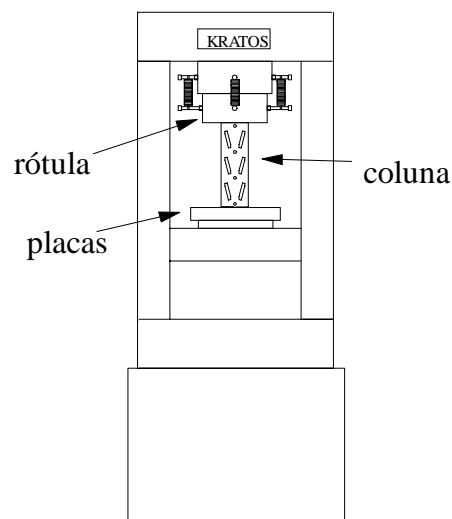


Figura 6.7. Esquema geral de montagem ensaio de coluna curta, posicionada na prensa hidráulica KRATOS.



Foto 6.2. Esquema Geral de Montagem do ensaio da coluna curta

O ensaio foi realizado com o carregamento sendo aplicado na velocidade de 4,4 kN/min. Esta velocidade, segundo o AISI, deve ser abaixo dos limites de 10 kN/min e 13 kN/min, calculadas, respectivamente, pela área bruta da seção transversal e pela área líquida mínima, para uma tensão máxima na seção transversal da coluna de 21 MPa.

### **6.5. LIGAÇÕES**

Neste item é apresentado o ensaio de dois tipos de ligações semi-rígidas utilizadas em sistemas de armazenagem industrial tipo “drive-in”. O objetivo desses ensaios é calcular a rigidez das ligações utilizando a curva momento-rotação e carga-deslocamento observando-se os procedimentos do RMI e através do Método da Inclinação a 50% do Momento Último, apresentados no item 5.4.1. Durante os ensaios, além da determinação dos deslocamentos, foram observados os modos de colapso das ligações. Os procedimentos do ensaio são os do “cantilever test”, apresentados no item 5.3.

Foram ensaiados cinco protótipos da ligação parafusada do braço e três da ligação não-parafusada da longarina.



### **6.5.1. ENSAIO DAS LIGAÇÕES DO BRAÇO**

A ligação do braço é um tipo de ligação semi-rígida utilizada no sistema de armazenagem industrial tipo “drive-in”, que suporta o carregamento imposto pelos paletes e o transmite às colunas. A figura 6.8 apresenta uma vista frontal do sistema “drive-in”, com detalhes do posicionamento da ligação do braço central e detalhe dos principais elementos constituintes desta ligação. Esta ligação é fixada na coluna por um perfil U simples que envolve a mesma, e os furos do perfil U simples coincidem com os furos existentes no flange da coluna. Para fixação do braço ao perfil U simples é utilizada solda de filete na face superior e inferior de encontro entre os dois elementos, figura 6.8 (c). A seção transversal do braço é também do tipo perfil U simples.

O programa experimental foi composto de cinco ensaios cujos protótipos foram denominados LBMAX-1 a LBMAX-5. O RMI recomenda que a dimensão da coluna seja de 760 mm e do braço da viga de 610 mm. Pesquisas anteriores (Markazi et al. (1997) e Lewis (1997)) utilizaram dimensões diferentes, em função da diversidade das ligações analisadas.

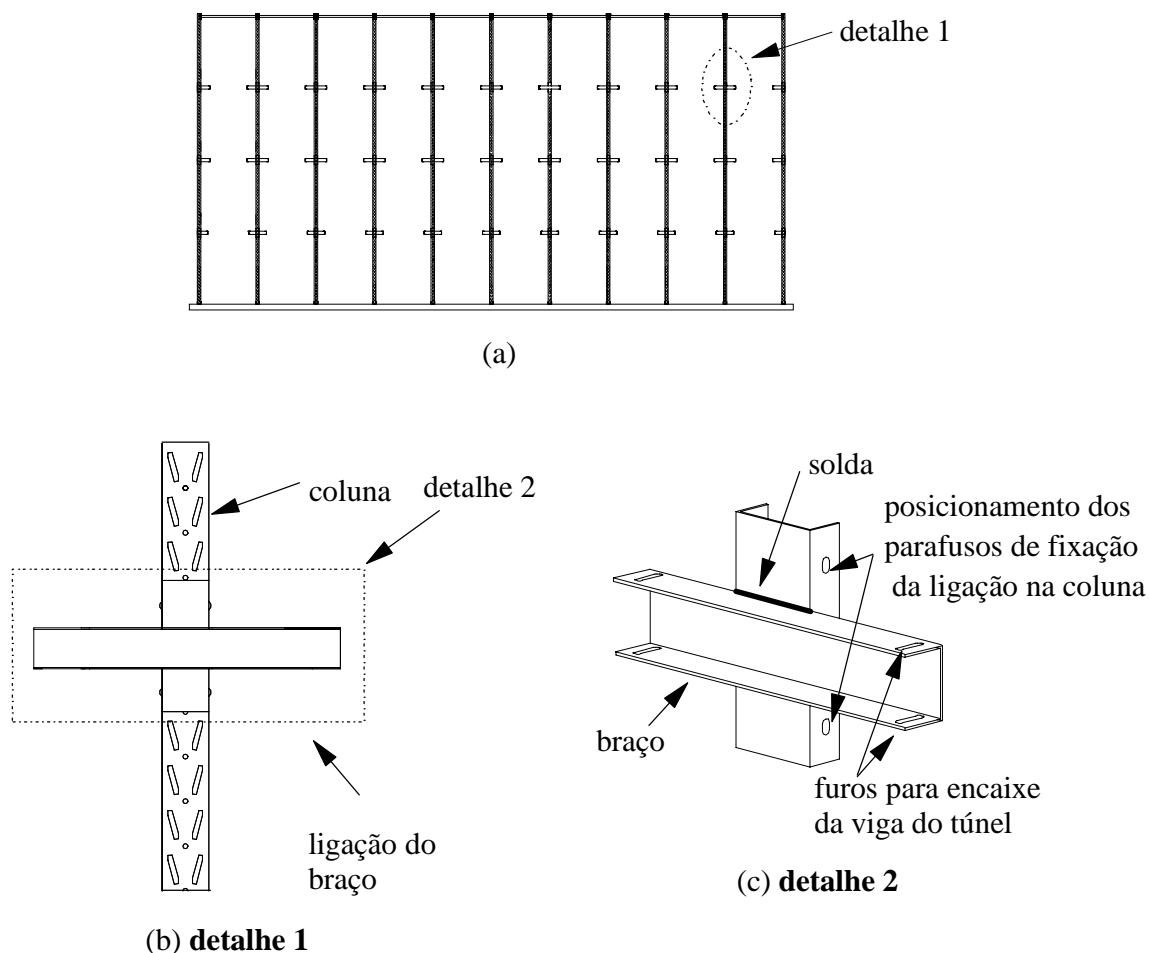


Figura 6.8. Ligação do braço central: (a) Vista frontal do sistema “drive-in” com o posicionamento de uma ligação do braço central; (b) Detalhe da ligação e coluna; (c) Detalhe dos elementos componentes da ligação do braço central.

As dimensões dos elementos que compõem a ligação ensaiada, bem como as dimensões da seção transversal do braço, são apresentadas na figura 6.9, onde  $L_c$  é o comprimento da coluna;  $L_b$  é o comprimento do braço de alavanca da viga;  $t$  é a espessura da parede do braço e CG indica a posição do centro de gravidade da seção transversal do braço. Optou-se por ensaiar o braço com as dimensões reais empregadas no sistema “drive-in” fabricados pela empresa Águia Sistemas de Armazenagem.

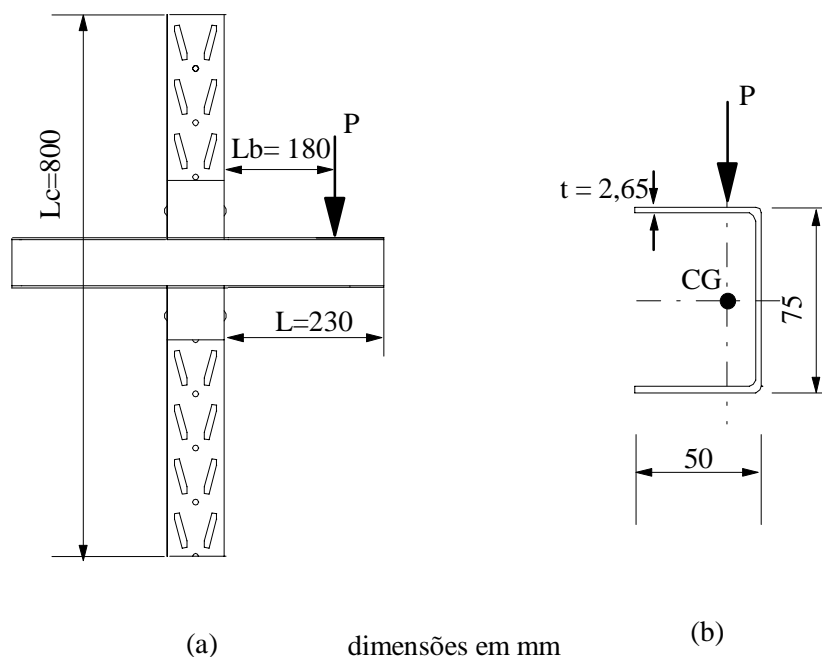


Figura 6.9. Dimensões da ligação do braço: (a) Dimensões dos elementos;  
(b) Dimensões da seção transversal do braço.

#### **6.5.1.1. Esquema de montagem**

A foto 6.3 apresenta uma visão geral do esquema de montagem utilizado no ensaio da ligação do braço. Pode ser observado o uso de dois pórticos de reação: o primeiro para fixação do elemento ensaiado e o segundo para fixação do sistema de aplicação do carregamento na extremidade da coluna.

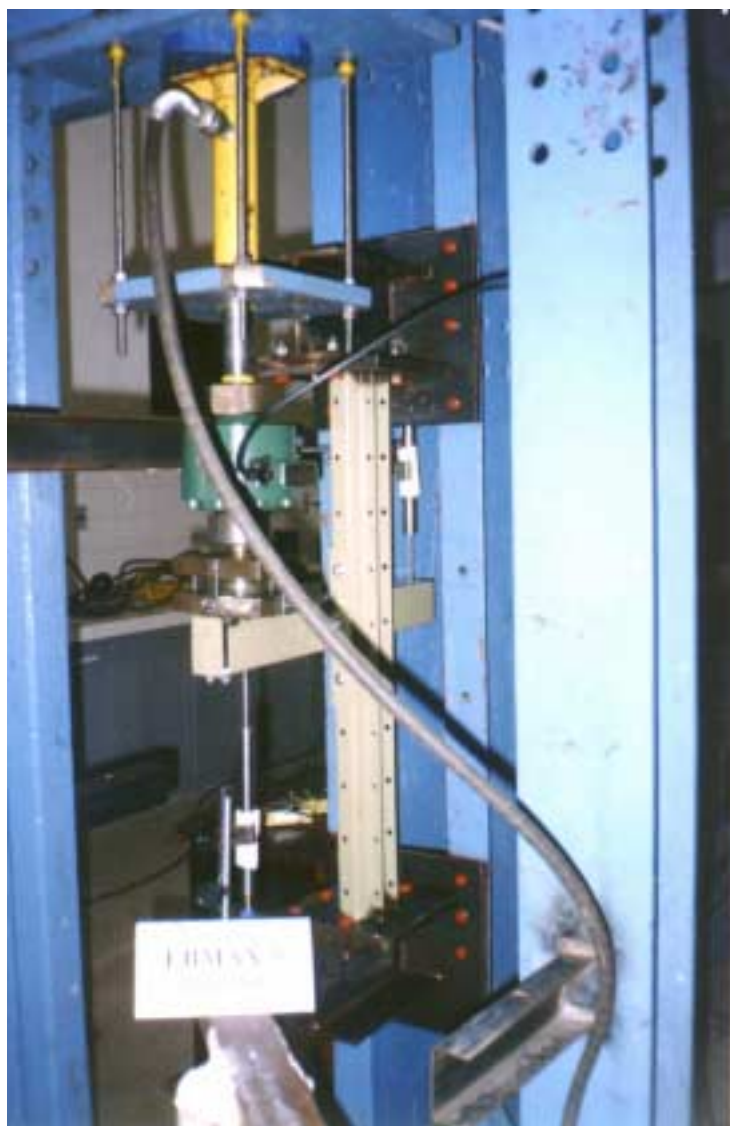


Foto 6.3. Esquema geral de montagem do ensaio da ligação do braço.

Na figura 6.10 observa-se as dimensões dos elementos utilizados no ensaio para fixação da coluna e aplicação do carregamento. O esquema de montagem é constituído de duas vigas auxiliares, denominadas de viga modelo 1, fixadas na coluna do pórtico da ligação por meio de ligação de chapa de topo. A coluna foi fixada nas vigas modelo 1 por meio de pontos de solda em placa de aço de 6,3 mm, previamente parafusadas em placas de 12,7 mm e esta à própria viga modelo 1.

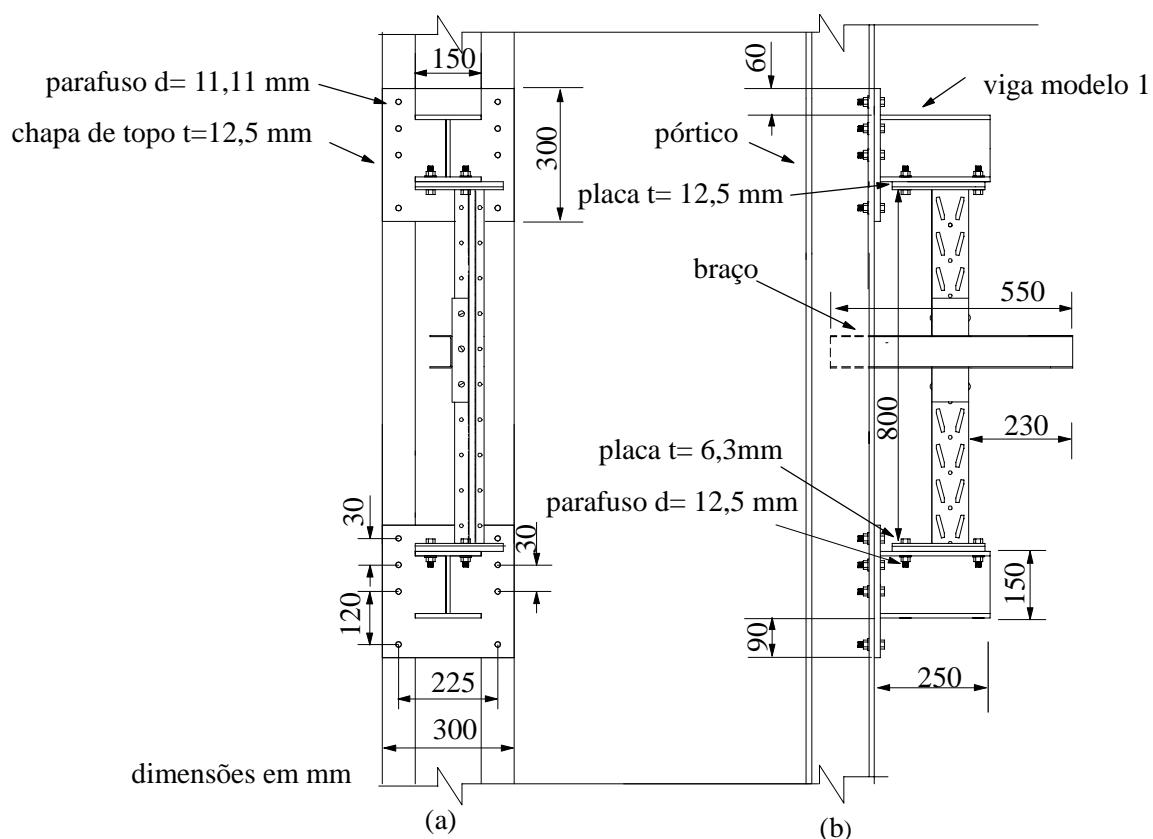


Figura 6.10. Dimensões dos elementos utilizados no esquema de montagem da ligação do braço: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.

#### **6.5.1.2. Instrumentação**

A figura 6.11 apresenta a instrumentação utilizada nos ensaios. O carregamento foi aplicado através de atuador hidráulico de 98,1 kN, fabricado pela ENERPAC, e foi registrado por uma célula de carga de 98,1 kN, fabricada pela SODMEX, de sensibilidade de 1,963 mV/V. Um manômetro de 1,60 kN/cm<sup>2</sup> foi conectado ao atuador para controle pelo operador da aplicação do carregamento na extremidade do conjunto atuador e célula de carga acoplada a uma rótula universal de modo a garantir a verticalidade do carregamento. Na mesma direção de aplicação do carregamento e na parte inferior da viga, foi instalado um transdutor de deslocamentos, SENSOTEC, de sensibilidade de 0,001 mV/V, posicionado a 180 mm da face da ligação. Na outra extremidade do braço, foi instalado um segundo transdutor de deslocamentos com a finalidade de avaliar a transmissão de esforços pela ligação.

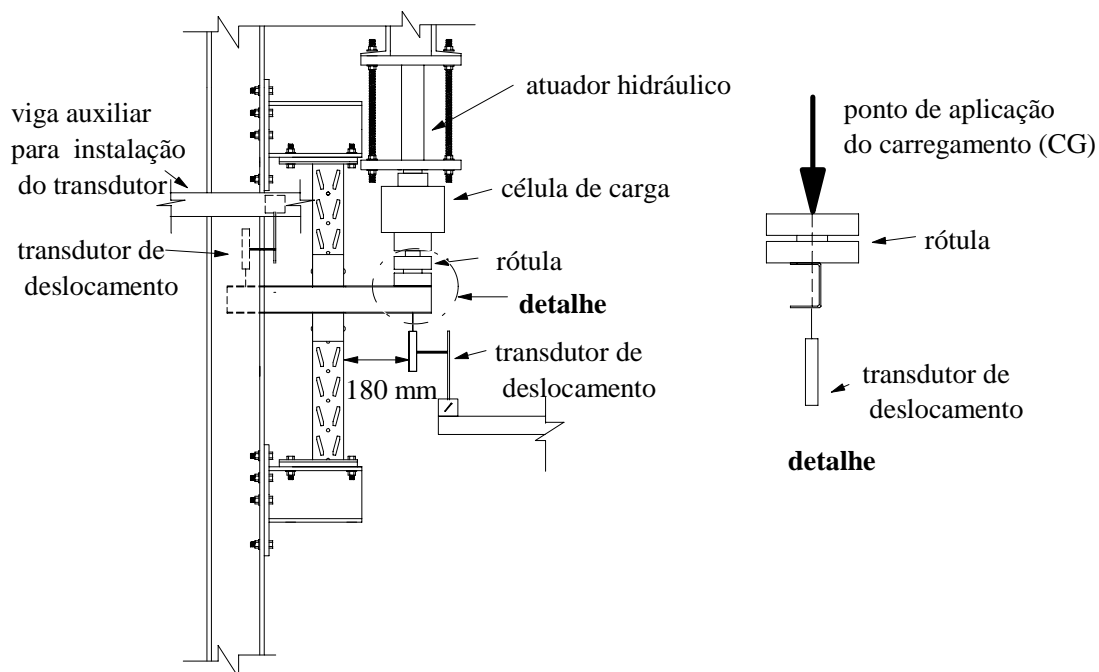


Figura 6.11. Esquema de geral de montagem do ensaio da ligação do braço com o posicionamento da instrumentação: (a) Vista lateral da montagem; (b) Detalhe frontal do posicionamento do carregamento na seção transversal do braço.

Os dados da célula de carga e dos transdutores para cada etapa de carregamento foram registrados através de aquisição de dados controlado por computador 486 DX4 dotado de placa de dados conversora A/D e por software de controle e aquisição, AQDADOS. Os dados registrados foram utilizados na elaboração das curvas carga-deslocamento e momento-rotação para determinação da rigidez da ligação.

O sistema de aquisição de dados (foto 6.4) foi responsável pela aquisição e registro dos incrementos de carga e dos deslocamentos nas duas extremidades.



Foto 6.4. Detalhe dos equipamentos para aquisição de dados.

#### **6.5.1.3. Metodologia**

Inicialmente, foi realizado um pré-ensaio para avaliar os sistemas de aquisição e de aplicação do carregamento. Após o pré-ensaio, o ensaio foi realizado com o carregamento aplicado em incrementos de 0,49 kN, cerca de 5% da carga última. Os ensaios foram finalizados após verificar-se perda de resistência do braço com um deslocamento acentuado deste elemento.

#### **6.5.2. ENSAIO DAS LIGAÇÕES DA LONGARINA**

A ligação da longarina é um dos componentes do sistema “drive-in” responsável pela estabilização da estrutura. A figura 6.12 apresenta a localização de uma destas ligações no sistema de armazenagem e os detalhes do posicionamento da ligação na coluna, bem como o elemento de suporte da ligação dotado de garras e furos.

Esta ligação é do tipo não-parafusada sendo constituída de garra com dois dentes, figura 6.12 (c). A ligação apresenta ainda furos em seu suporte para a instalação de pinos de segurança contra esforços ascendentes.

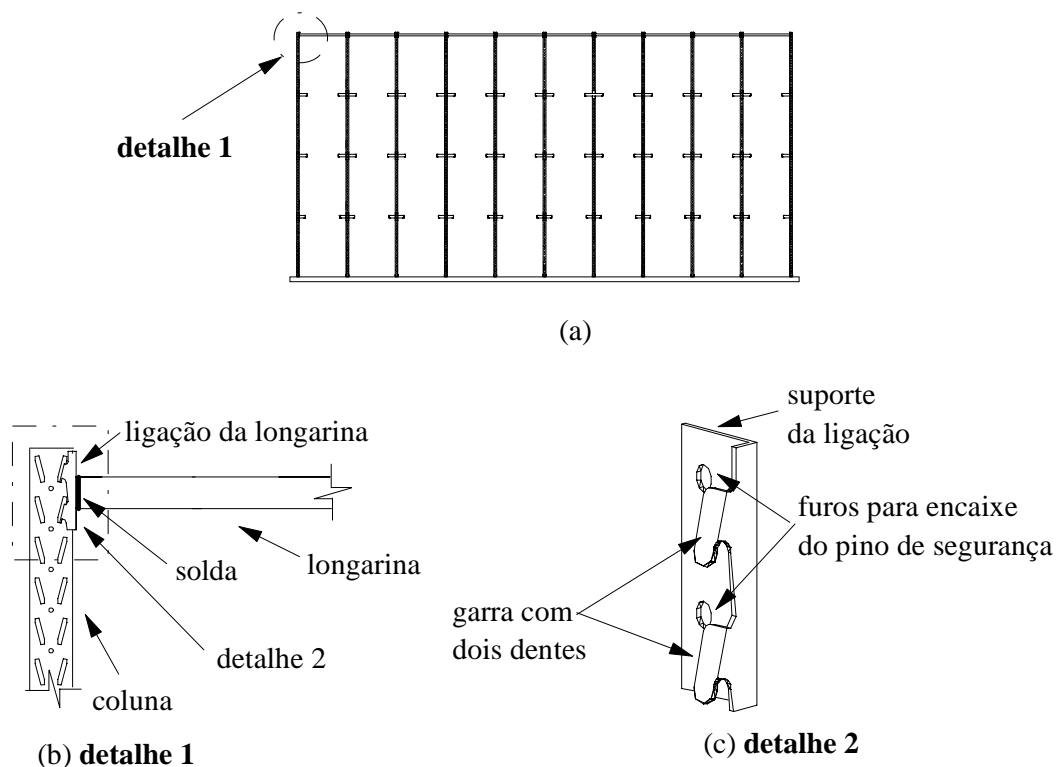


Figura 6.12. Ligação da longarina: (a) Vista frontal do sistema “drive-in” com o posicionamento de uma ligação da longarina; (b) Detalhe da ligação e da coluna; (c) Detalhe do suporte da ligação da longarina.

Foram ensaiados 3 protótipos denominados LLMAX-1 a LLMAX-3. Para determinação da rigidez, fez-se o ensaio da viga em balanço (“cantilever test”), segundo as prescrições do RMI. A figura 6.13 apresenta as dimensões dos elementos ensaiados, bem como as dimensões da seção transversal da longarina. Na face superior da ligação foi instalado um único pino de segurança (parafuso).



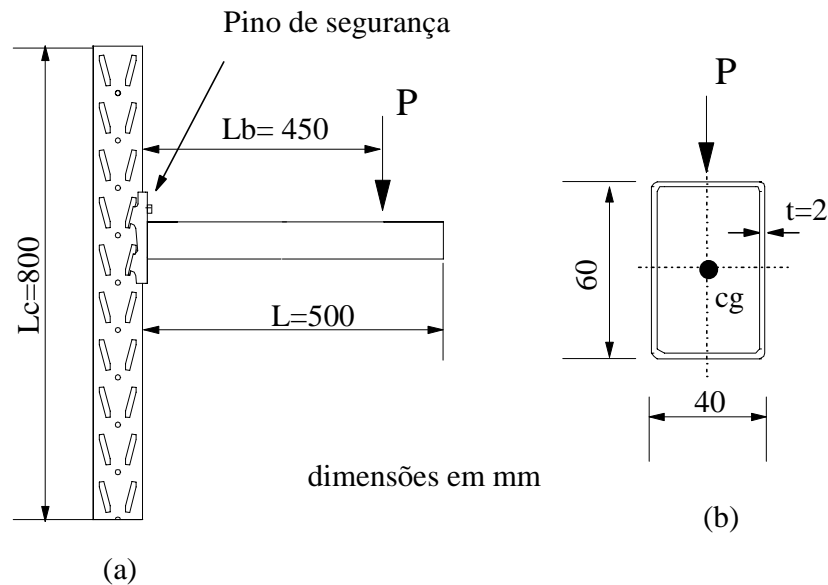


Figura 6.13. Dimensões da ligação da longarina: (a) Dimensões dos elementos;  
(b) Dimensões da seção transversal da longarina.

#### **6.5.2.1. Esquema de montagem**

Uma vista geral do esquema de montagem da longarina pode ser observada na foto 6.5. A montagem é similar à da ligação do braço, e na figura 6.14 apresentam-se as dimensões dos elementos utilizados na montagem. O maior tamanho da longarina (500 mm), influenciou nas diferenças em relação ao ensaio da ligação do braço. Foram fabricadas duas vigas de 580 mm de comprimento para fixação da coluna, denominadas de vigas modelo 2, e também duas guias verticais em cantoneiras para impedir o deslocamento lateral da longarina no decorrer do ensaio, (Markazi et al. (1997), Lewis (1997)).



Foto 6.5. Esquema geral de montagem do ensaio da ligação da longarina.

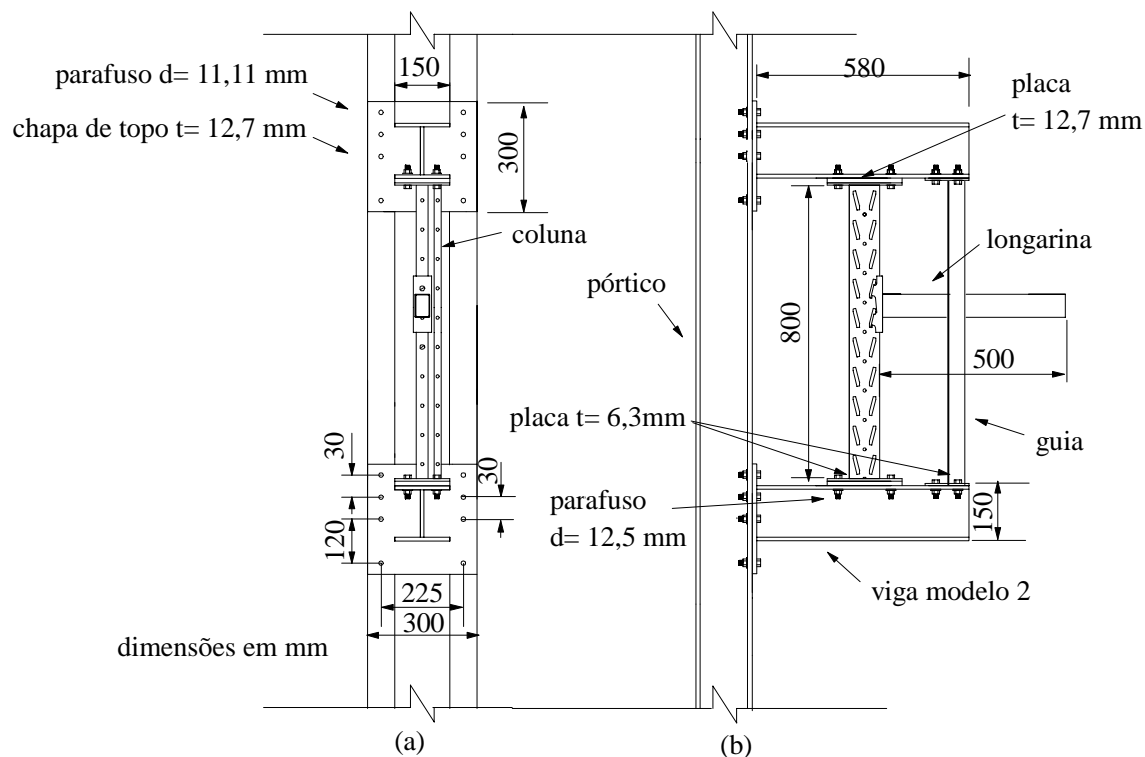


Figura 6.14. Dimensões dos elementos utilizados no esquema de montagem da ligação da longarina: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.

#### **6.5.2.2. Instrumentação**

Na figura 6.15 é apresentado o esquema geral de montagem da ensaio da ligação da longarina e pode ser observado o ponto de aplicação do carregamento a 450 mm da face da ligação da coluna, e no centro de gravidade da seção transversal da longarina.

Foram utilizados os mesmos equipamentos para o ensaio da ligação do braço, apresentados no item 6.5.2.1: atuador hidráulico, célula de carga, rótula, exceto que apenas um transdutor de deslocamento, foi posicionado na face inferior da longarina, a 450 mm da coluna.

O sistema de aquisição de dados foi responsável pela aquisição do carregamento e deslocamentos correspondentes, para posterior elaboração dos gráficos carga-deslocamento e momento-rotação, para determinação da rigidez da ligação.

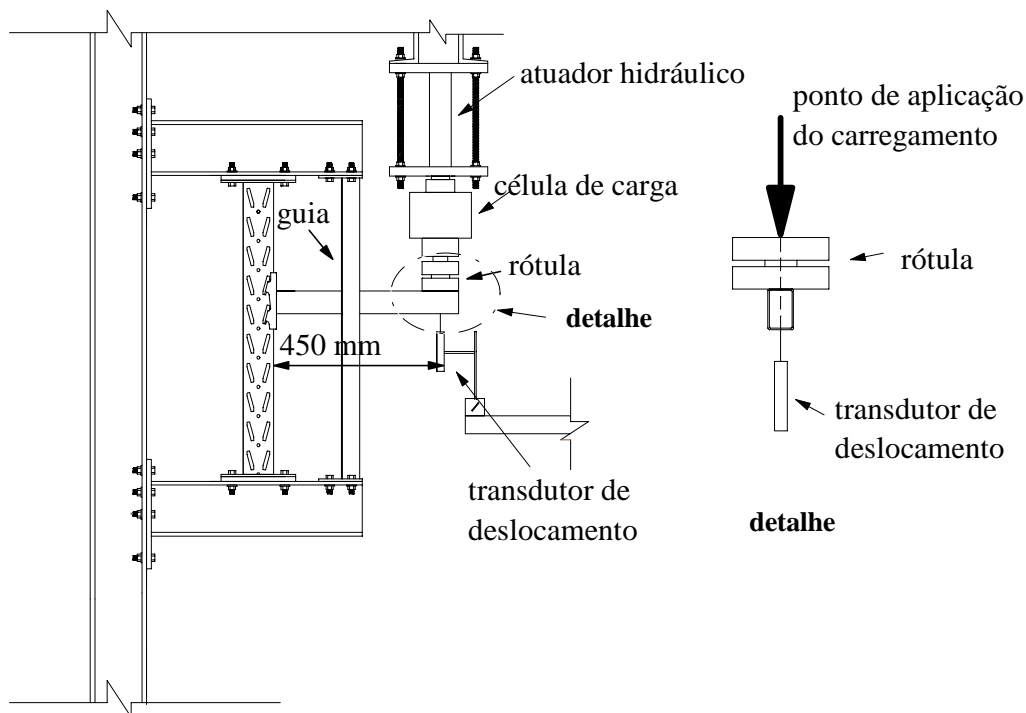


Figura 6.15. Esquema geral de montagem do ensaio da ligação da longarina com o posicionamento da instrumentação.

### **6.5.2.3. Metodologia**

A metodologia adotada neste ensaio é semelhante à do ensaio da ligação do braço, descrita no item 6.5.1.3, exceto pelo uso de guias que foram previamente lubrificadas para que fosse evitado o atrito com as paredes da longarina. O pré-ensaio foi realizado com a finalidade de avaliar o sistemas de ensaio. Após o pré-ensaio, foram realizados os ensaios com incrementos de carregamento de 0,49 kN, aproximadamente 15% da carga última, sendo o ensaio finalizado ao verificar-se a perda da resistência do elemento da ligação com um deslocamento acentuado da longarina.

## **CAPÍTULO 7**

### **APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS COLUNAS**

#### **7.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos em cada protótipo ensaiado de colunas curtas e longa. Em seguida é feita uma análise dos resultados experimentais que são comparados com os obtidos de acordo com os procedimentos do RMI.

Utilizando-se os protótipos de coluna curta, apresenta-se o modo de ruína e a carga última obtida para cada ensaio, sendo esta utilizada na determinação do fator Q e da área efetiva da seção transversal, calculados segundo RMI (1997). Também é avaliado a carga nominal, comparando-a com a carga última obtida nos ensaios.

Para o protótipo da coluna longa, apresenta-se o carregamento último obtido e o seu modo de ruína. A partir dos resultados experimentais das colunas curtas utilizados no cálculo do fator Q, é determinada a área efetiva da seção transversal da coluna longa e a sua capacidade de carga. Ao final, os resultados experimentais são comparados com os obtidos através das prescrições do RMI.

#### **7.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

##### **7.2.1. COLUNA CURTA**

Neste item é descrito os resultados experimentais dos quatro protótipos de coluna curta, ensaiados à compressão centrada no centro de gravidade da seção de área líquida mínima ( $CG_{\min}$ ).

#### **7.2.1.1. Protótipo CCMAX-1**

Durante a aplicação do carregamento, para a carga de 98,1 kN, observou-se uma deformação nas extremidades superior e inferior da coluna, localizadas na alma da seção transversal. Na garganta foi observada uma distorção também nas extremidades da coluna, através do afastamento dos flanges de ligação, e uma aproximação destes a meia altura (130mm) do protótipo.

A carga última experimental ( $P_{uexp}$ ) foi 144,207 kN.

#### **7.2.1.2. Protótipo CCMAX-2**

Durante a aplicação do carregamento, do ensaio do protótipo CCMAX-2, foi verificado que a partir de 98,1 kN ocorreram deformações nas extremidades da coluna, localizadas na alma da seção transversal, sendo mais acentuada na extremidade superior, (foto 7.1). Na garganta ocorreram as mesmas distorções observadas no protótipo CCMAX-1, como pode ser observado na foto 7.2.

A carga última experimental ( $P_{uexp}$ ) foi de 136,604 kN.



Foto 7.1. Vista da coluna CCMAX-2, ao final do ensaio, onde observa-se as deformadas nas extremidades da coluna na alma da seção transversal.



Foto 7.2. Vista das distorções nas extremidades da coluna pelo afastamento dos flanges de ligação e aproximação dos mesmos a meia altura da coluna (130 mm).

#### **7.2.1.3. Protótipo CCMAX-3**

No ensaio do protótipo CCMAX-3, as deformações nas extremidades da coluna, localizadas na alma da seção transversal, foram visualmente menores que as observadas nos dois protótipos anteriores. A extremidade inferior apresentou deformação na alma mais acentuada em relação à extremidade superior, foto 7.3. Quanto à abertura da garganta, apesar do comportamento ser o mesmo dos ensaios anteriores, as distorções foram menores.



A carga última experimental ( $P_{uexp}$ ) foi de 140,773 kN.



Foto 7.3. Vista do protótipo CCMAX-3, com deformação na extremidade inferior da alma da coluna.

#### **7.2.1.4. Protótipo CCMAX-4**

O protótipo CCMAX-4 teve comportamento similar ao protótipo CCMAX-3. As deformações nas extremidades da coluna, localizadas na alma da seção transversal, foram menos acentuadas do que as observadas nos dois primeiros ensaios e a extremidade inferior apresentou uma deformação maior que a extremidade superior.

Quanto à abertura da garganta, o comportamento foi similar ao protótipo CCMAX-3. A carga última experimental ( $P_{uexp}$ ) foi de 137,340 kN.

A tabela 7.1 apresenta os resultados da carga última experimental dos quatro protótipos, bem como a carga última média, ( $P_{ua}$ ).

Tabela 7.1. Carga última experimental ( $P_{uexp}$ ) e carga última média ( $P_{ua}$ ) dos ensaios realizados.

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

## 7.2.2. COLUNA LONGA

Neste item é apresentado o resultado experimental do protótipo da coluna longa (CMAX-1) ensaiado sob compressão centrada no centro de gravidade da seção de área líquida mínima ( $CG_{mín}$ ).

### 7.2.2.1. Protótipo CMAX-1

Para um carregamento de 88,290 kN, observou-se o afastamento dos flanges de ligação na extremidade superior da coluna, caracterizando o modo distorcional de flambagem, como pode ser observado na foto 7.4.

Prosseguindo o ensaio ocorreu flambagem local da alma da coluna observada a partir do carregamento de 109,872 kN.



Foto 7.4. Variação da dimensão da garganta na extremidade superior do protótipo CMAX - 1.

Na foto 7.5 tem-se a extremidade inferior da coluna sendo observada próxima aos furos, a ocorrência do mecanismo de plastificação, à altura da primeira seqüência de furos.



Foto 7.5. Plastificação da alma da seção transversal ao final do ensaio.

Na foto 7.6 observa-se o fenômeno de flambagem por flexo-torção através da diferença de alinhamento entre as placas utilizadas na montagem do ensaio.



Foto 7.6. Flambagem por flexo-torção, na parte inferior da coluna.

### **7.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Os resultados experimentais dos dois programas experimentais das colunas são comparados com os teóricos, para cálculo da carga nominal, obtidos a partir das prescrições do RMI.

Inicialmente para a determinação da área efetiva da seção transversal utilizou-se os resultados dos ensaios de coluna curta para determinação do fator  $Q$  (equação 4.4). Os parâmetros utilizados para determinação de  $Q$  são: a tensão de escoamento obtida no ensaio de tração do material das colunas ( $f_{ya} = 320,229 \text{ MPa}$ ); a média das cargas

últimas das colunas curtas, determinada no ensaio experimental ( $P_{ua} = 139,731 \text{ kN}$ ), apresentada na tabela 7.1, e a área média da seção transversal líquida mínima dos quatro protótipos ( $A_{netmin} = 479,192 \text{ mm}^2$ ), conforme apresentado na tabela 7.2. Assim o valor do fator Q é igual a 0,914.

Para o fator  $Q = 0,914$ , pode-se comparar os resultados da carga nominal calculados considerando a tensão de escoamento especificada pelo fabricante, ( $P_{ny}$ ) e com a consideração da tensão de escoamento obtido para a caracterização do material ( $P_{nya}$ ), de acordo com o procedimentos do RMI, com os resultados experimentais da carga última experimental ( $P_{uexp}$ ) para as colunas curtas e longa.

A tabela 7.2 apresenta os resultados obtidos para a capacidade de carga das colunas curtas. A área efetiva foi calculada utilizando a equação 4.3, com os valores das tensões de escoamento e fator Q, já mencionadas anteriormente, e o valor da área líquida mínima de cada protótipo ( $A_{netmin}$ ).

Tabela 7.2. Comparação dos resultados teóricos e experimentais dos protótipos.

<b>Protótipo</b>	<b><math>P_{uexp}</math> (kN)</b>	<b><math>A_{netmin}</math> (mm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>A_e</math> (mm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>P_{ny}</math> (kN)</b>	<b><math>P_{ny}/P_{uexp}</math></b>	<b><math>P_{nya}</math> (kN)</b>	<b><math>P_{nya}/P_{uexp}</math></b>
CCMAX-1	144,207	476,046	446,97	98,304	0,681	121,334	0,841
CCMAX-2	136,604	474,164	445,187	97,973	0,717	120,946	0,885
CCMAX-3	140,773	480,339	450,85	99,713	0,708	123,264	0,875
CCMAX-4	137,340	482,221	452,75	99,638	0,725	123,001	0,895
<b>Média</b>	<b>139,731</b>	<b>478,192</b>	<b>448,939</b>	<b>98,982</b>	<b>0,707</b>	<b>122,136</b>	<b>0,874</b>
$A_{netmin}$ = área líquida mínima de cada protótipo; $A_e$ = área efetiva de cada protótipo calculada pelo fator $Q=0,914$ ; $P_{ny}$ = resistência nominal considerando a tensão de escoamento $f_y=250 \text{ MPa}$ ; $P_{nya}$ = resistência nominal considerando a tensão de escoamento, obtida experimentalmente $f_{ya} = 320,229 \text{ MPa}$ ;							

Para o cálculo teórico utilizou-se o procedimento do AISI, conforme recomendações do RMI, com as seguintes considerações:

- i) Calculou-se a carga nominal ( $P_{ny}$ ) considerando-se como tensão de escoamento  $f_y = 250$  MPa. Observa-se que a média da relação entre  $P_{ny}/P_{uexp}$  é de 0,707.
- ii) Utilizando-se a tensão de escoamento obtida por meio dos ensaios experimentais ( $f_{ya} = 320,229$  MPa), obtém-se o valor da carga nominal  $P_{nya}$  e o valor médio da relação  $P_{nya}/P_{uexp} = 0,874$ .

Como pode-se observar, os resultados utilizando  $f_{ya}$  apresentaram uma melhor correlação com o valor da carga última obtida experimentalmente para os protótipos das colunas curtas.

Os resultados teóricos da capacidade da coluna longa foram calculados, adotando-se o mesmo procedimento com  $Q = 0,914$ , e são apresentados na tabela 7.3.

Tabela 7.3. Comparação dos resultados teóricos e experimentais do protótipo CMAX-1

<b>Protótipo</b>	<b><math>P_{uexp}</math> (kN)</b>	<b><math>A_{netmin}</math> (mm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>A_e</math> (mm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>P_{ny}</math> (kN)</b>	<b><math>P_{ny}/P_{uexp}</math></b>	<b><math>P_{nya}</math> (kN)</b>	<b><math>P_{nya}/P_{uexp}</math></b>
CMAX-1	141,264	478,166	448,952	98,771	0,699	121,92	0,863

Os valores obtidos para a capacidade de carga, no caso do protótipo CMAX-1 apresentaram uma melhor correlação, quando foi utilizado o valor da tensão de escoamento obtida pela caracterização do aço, com a razão  $P_{nya}/P_{uexp} = 0,863$ .

## **CAPÍTULO 8**

### **APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LIGAÇÕES**

#### **8.1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo é apresentado e analisado os resultados experimentais dos protótipos ensaiados nos programas experimentais das ligações do braço e das ligações da longarina.

Para cada protótipo das ligações do braço e da longarina são apresentados os modos de colapso, carga última e momento último. Em seguida tem-se as curvas momento-rotação e carga deslocamento para cada protótipo, com os valores da rigidez segundo as prescrições do RMI (1997) e pelo Método da Inclinação a 50% do Momento Último. Ao final são analisados os valores da rigidez de cada protótipo, e obtido o valor médio da rigidez da ligação da longarina e da ligação do braço.

#### **8.2. LIGAÇÃO DO BRAÇO**

Para os cinco protótipos ensaiados da ligação do braço ocorreu o efeito de flexo-torção devido à aplicação do carregamento no centro de gravidade da seção transversal do braço, e sendo o mesmo constituído de perfil U simples, seção aberta, monossimétrica, portanto com o centro de gravidade não coincidente com o centro de cisalhamento.

Os resultados experimentais dos deslocamentos e do carregamento estão representados nas curvas momento-rotação e carga-deslocamento para determinação da rigidez da ligação, respectivamente, pelo Método da Inclinação a 50% do Momento Último, e pelas prescrições do RMI.



Quanto a análise segundo o RMI, considerando-se o procedimento adotado, descrito no item 5.4.2, o cálculo da rigidez (F) é obtida através da equação 5.3. O módulo de elasticidade adotado (E) foi de 205000 MPa e os valores das grandezas geométricas utilizadas no cálculo são: o momento de inércia da coluna  $I_c = 42,37 \text{ cm}^4$ ; comprimento da coluna,  $L_c = 800 \text{ mm}$ ; comprimento do braço de alavanca do braço da ligação  $L_b = 180 \text{ mm}$ ; momento de inércia do braço  $I_b = 40,42 \text{ cm}^4$  e o fator de minoração R.F. =1. Os valores dos pares ordenados ( $\delta_{0,85}$  ;  $P_{0,85}$ ) estão indicados nas curvas carga-deslocamento correspondentes a cada protótipo ensaiado, bem como o valor calculado da rigidez.

### 8.2.1. PROTÓTIPO LBMAX-1

No protótipo LBMAX-1, ao atingir a carga de aproximadamente 2,5 kN, observou-se o início da torção na seção transversal do braço com deformação excessiva da mesa superior do perfil. A partir desse carregamento, também foi observado o início do deslizamento da ligação do braço, ocasionado pelo posicionamento dos parafusos da ligação. Os furos da ligação possuem o formato oval e alongados em que os parafusos foram instalados em posição intermediária, figura 8.1. Ao aplicar o carregamento, ocorreu um deslizamento da ligação até que os parafusos alcançaram a extremidade superior dos furos.

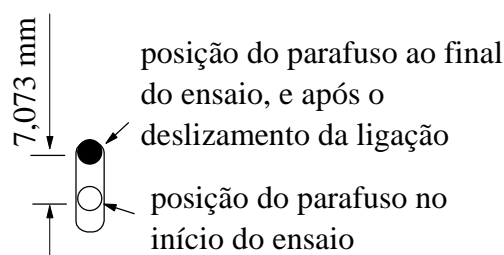


Figura 8.1. Deslizamento dos parafusos pelo furo de formato oval e alongado existente na ligação do braço.

Depois que os parafusos se ajustaram aos furos, o braço teve um deslocamento sem a influência do deslizamento. Com o aumento do carregamento verificou-se que a

viga fletiu, foto 8.1 e ocorreu o aumento crescente da torção, com uma deformação acentuada da mesa superior do braço, foto 8.2. Ao atingir 12,475 kN o ensaio é encerrado em função da perda de resistência do material.

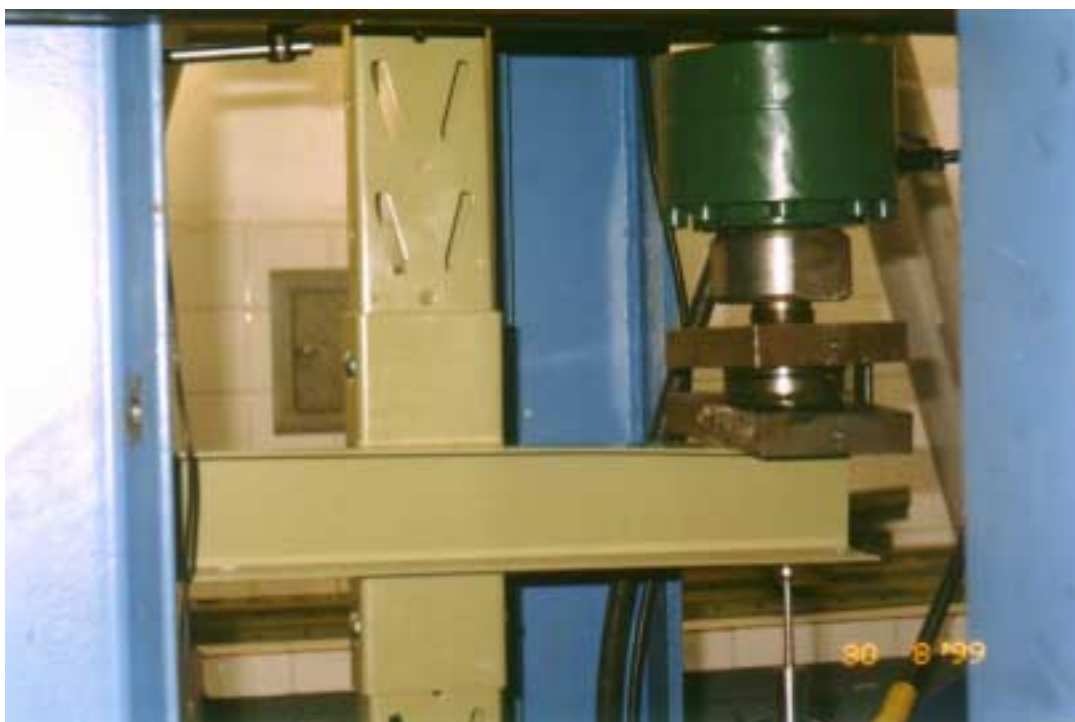


Foto 8.1. Efeito de flexão no braço do protótipo LBMAX-1 ao final do ensaio.



Foto 8.2. Vista frontal da extremidade do braço com o detalhe da torção e deformação da mesa superior da seção.

Na figura 8.2 é apresentado o comportamento da ligação através da curva momento-rotação. Nota-se que a curva é influenciada pelo deslizamento ocorrido no ensaio da ligação, com uma região de rotações crescentes para momento constante, até o valor da rotação de 0,05 radianos. O momento último da ligação é igual a 2,246 kNm. Em função do deslizamento ocorrido, a determinação da rigidez segundo o Método da Inclinação a 50% do Momento Último não foi possível.

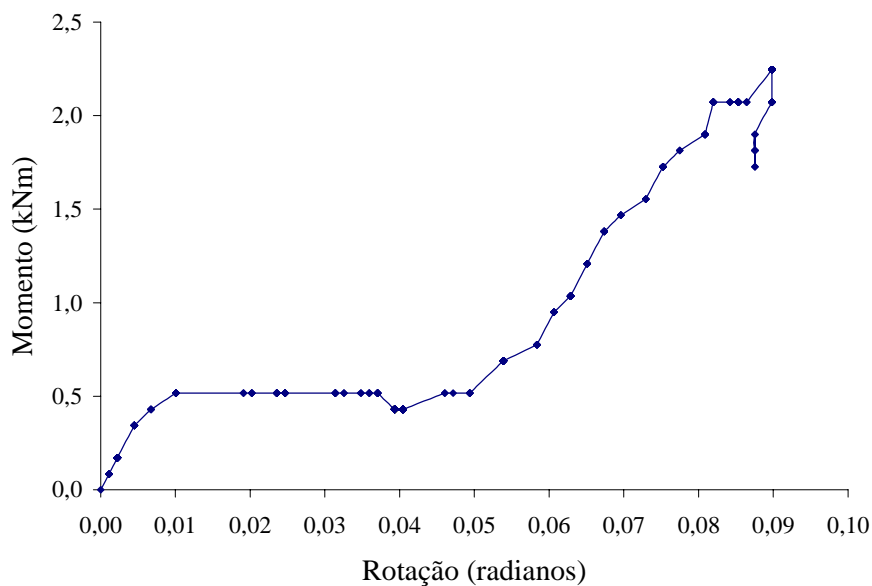


Figura 8.2. Curva momento-rotação do protótipo LBMAX-1.

Para o cálculo da rigidez da ligação segundo o RMI é necessário que a série de ensaios realizados seja idêntica. Devido a deformação excessiva neste ensaio, para os próximos protótipos, a extremidade do braço foi enrijecida. Assim, o protótipo LBMAX-1 não atende as prescrições de norma, não sendo calculado o valor da rigidez.

Após o ensaio, ao verificar-se a região da solda entre o braço e a ligação constatou-se que não houve nenhuma alteração na mesma. Os parafusos utilizados também não se deformaram apresentando apenas um amassamento da rosca na região delimitadora entre a parede da ligação e a da coluna.

### 8.2.2 PROTÓTIPO LBMAX-2

A partir dos resultados do ensaio anterior em que foi observado o deslizamento da ligação e a deformação na mesa superior do braço, o protótipo LBMAX-2 foi confeccionado de forma a eliminar estas influências. Para evitar o deslizamento, o parafuso de ligação entre o braço e a coluna foi posicionado na face superior do furo, e a deformação na mesa superior do braço foi eliminada com o enrijecimento da extremidade do braço, como apresentado na foto 8.3.



Foto 8.3. Detalhe da extremidade do braço com o enrijecimento da seção.

A torção continuou presente neste ensaio apesar do enrijecimento do braço, sendo observada para um carregamento de 4,9 kN. A foto 8.4 apresenta o efeito de flexo-torção para o carregamento último de 11,515 kN.

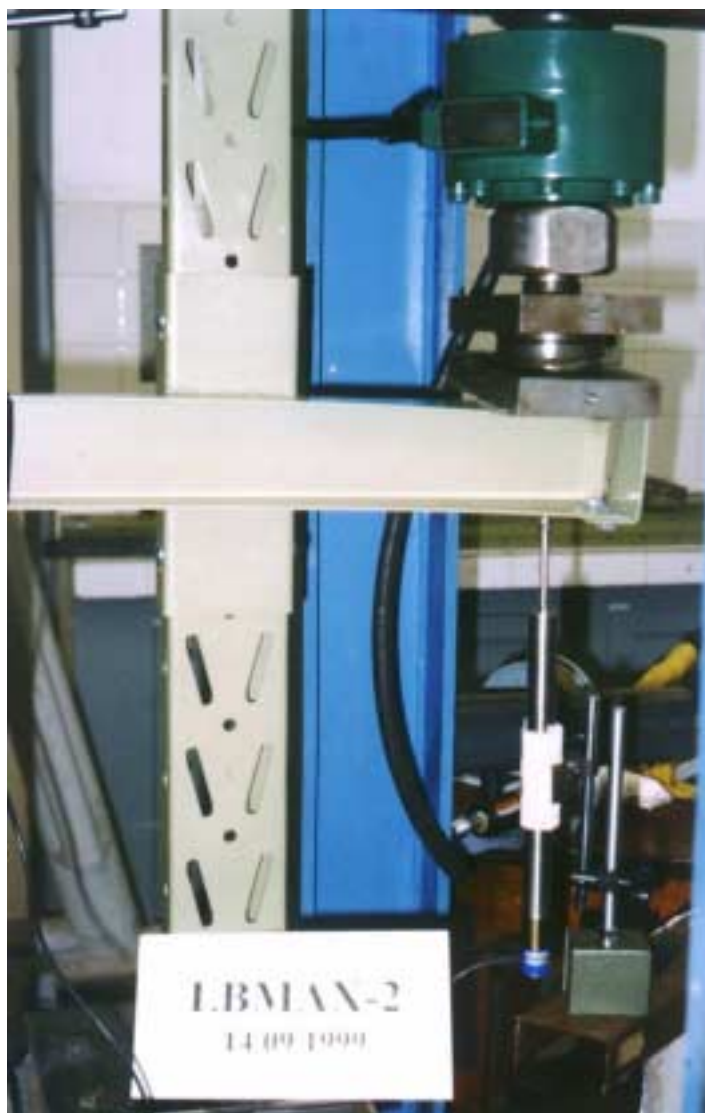


Foto 8.4. Vista do protótipo LBMAX-2 ao final do ensaio com os modos de flexo-torção.

A solda utilizada na confecção da ligação é eficiente já que foi verificado um deslocamento muito pequeno na região oposta à aplicação do carregamento.

Nos parafusos apenas ocorreu um início de amassamento nas roscas na região de contato da ligação à coluna.

Observa-se na figura 8.3, o comportamento da ligação do protótipo LBMAX-2, através da curva momento-rotação, com momento último ( $M_u$ ) obtido de 2,07 kNm.

Para o cálculo da rigidez foi utilizado o Método da Inclinação a 50% do Momento Último, com a determinação da rigidez por meio da inclinação de uma reta que

passa na origem e a 50% do momento de ruptura, identificando o par ordenado de (0,016 ; 1,03) indicados na figura 8.3. Com este procedimento, o valor da inclinação da reta, ou seja, da rigidez ( $k$ ) da ligação é igual a 65,923 kNm/rad.

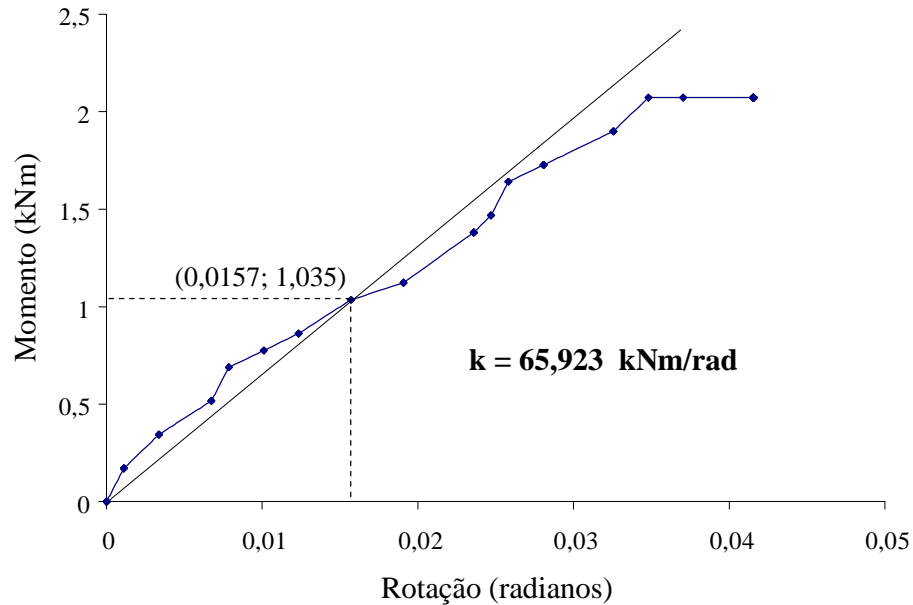


Figura 8.3. Curva momento-rotação do protótipo LBMAX-2.

Na figura 8.4 pode-se observar a curva carga-deslocamento da ligação. Observa-se que não houve o deslizamento observado no ensaio anterior. A carga máxima aplicada na ligação, foi de 11,515 kN. Para o cálculo da rigidez de acordo com o RMI foi utilizada a equação 5.3, com o par ordenado ( $P_{0,85}$  ;  $\delta_{0,85}$ ) igual a (5,35 ; 9,788) e com os valores das grandezas geométricas apresentadas anteriormente. Assim o valor da rigidez ( $F$ ) é igual a 64,174 kNm/rad.

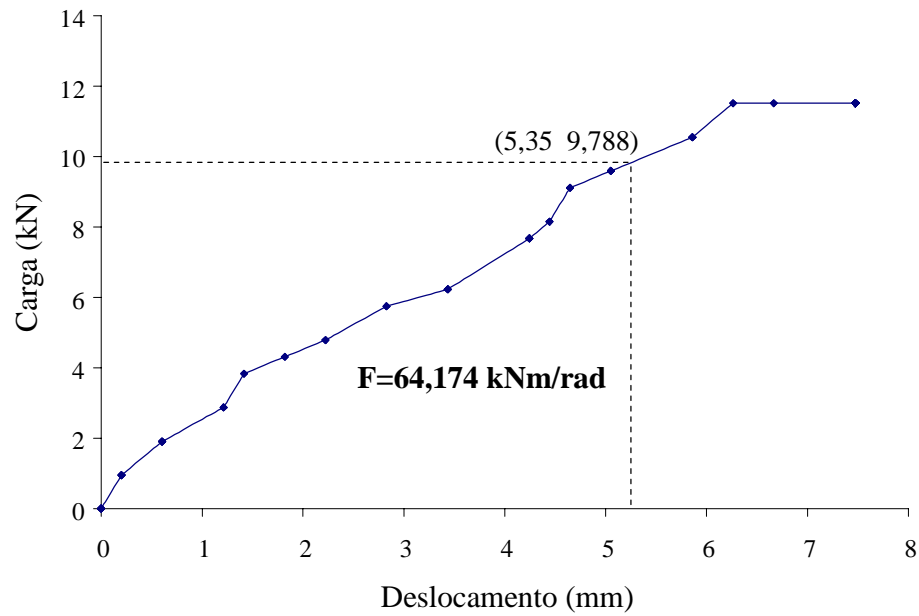


Figura 8.4. Curva carga-deslocamento do protótipo LBMAX-2.

### 8.2.3. PROTÓTIPO LBMAX-3

O ensaio deste protótipo foi desprezado em função de problemas no sistema de aplicação do carregamento.

### 8.2.4. PROTÓTIPO LBMAX-4

O ensaio do protótipo LBMAX-4 seguiu o mesmo procedimento do LBMAX-2. A foto 8.5 apresenta uma vista da ligação onde observa-se a torção na extremidade de aplicação do carregamento.





Foto 8.5. Vista da ligação do braço com a torção na extremidade de aplicação do carregamento.

Em relação aos parafusos, o comportamento foi similar ao do protótipo LBMAX-2, com amassamento da rosca na região da interface entre a ligação e a coluna.

A figura 8.5 apresenta o comportamento momento-rotação da ligação com um momento último ( $M_u$ ) igual a 2,418 kNm. O cálculo da rigidez de acordo com o Método da Inclinação a 50% do Momento Último, com a definição do par ordenado (0,0151 ; 12,209) é igual a 80,066 kNm/rad.

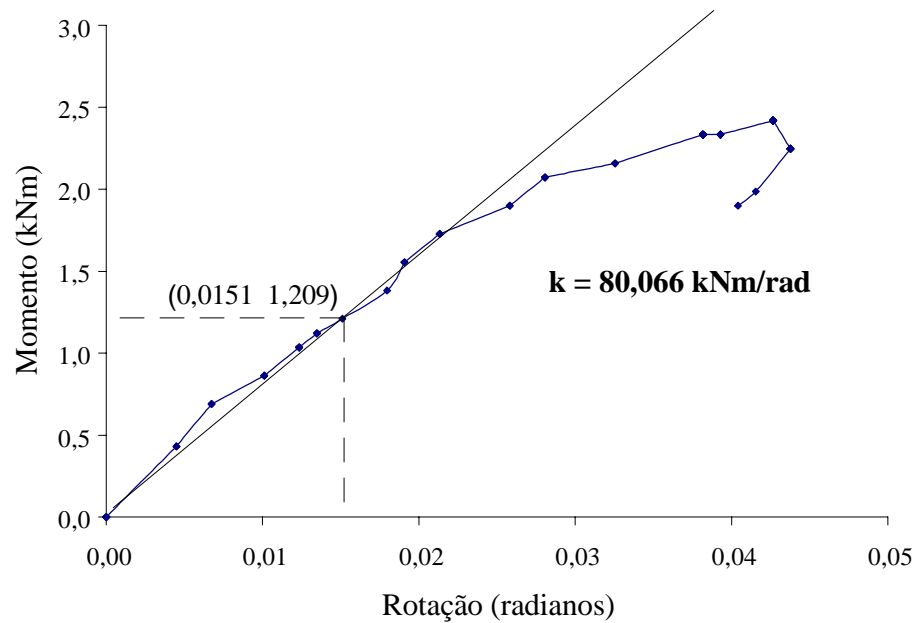


Figura 8.5. Curva momento-rotação do protótipo LBMAX-4.

A figura 8.6 apresenta o comportamento carga deslocamento da ligação com a carga última obtida de 13,436 kN. Considerando o par ordenado  $(P_{0,85} ; \delta_{0,85})$  igual a (5,0 ; 11,421) e com as demais grandezas relatadas no item 8.2, obtém-se a rigidez  $F$  igual a 81,801 kNm/rad.

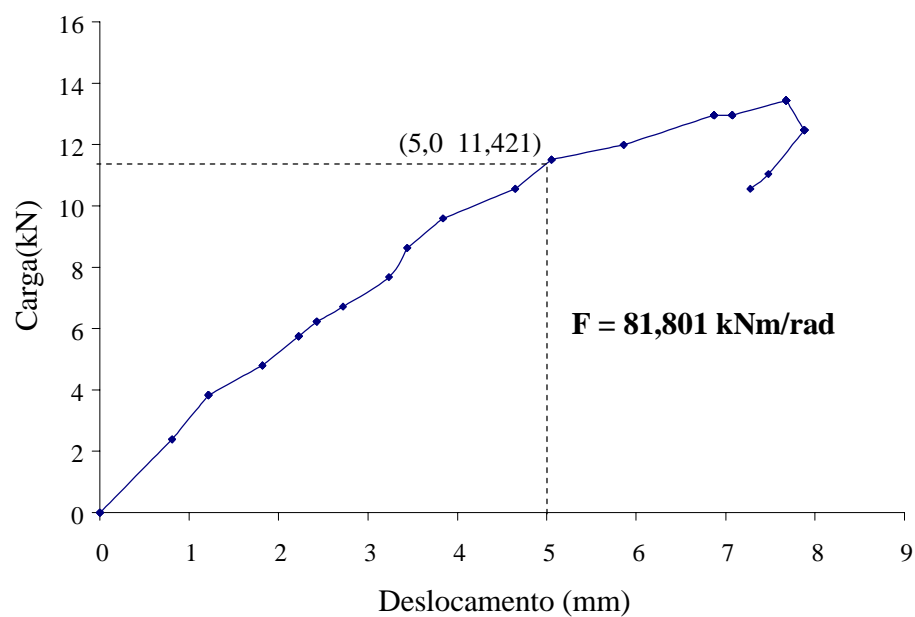


Figura 8.6. Curva carga-deslocamento protótipo LBMAX-4.

### 8.2.5. PROTÓTIPO LBMAX-5

O ensaio do protótipo LBMAX-5 seguiu o mesmo procedimento dos protótipos LBMAX-2 e LBMAX-4, apresentando as mesmas características. A foto 8.6 apresenta uma vista frontal do braço, sendo visível a torção ao final do ensaio.



Foto 8.6. Vista frontal do braço do protótipo LBMAX-5, sendo visível a torção ao final do ensaio.

A figura 8.7 apresenta o comportamento da ligação por meio da curva momento-rotação. Pode-se observar o mesmo comportamento dos ensaios anteriores com o momento último ( $M_u$ ) igual a 2,073 kNm. Utilizando o Método da Inclinação a 50% do Momento Último, a partir da indicação deste par ordenado (0,019 ; 1,035), tem-se o valor da rigidez ( $k$ ) igual 54,474 kNm/rad.

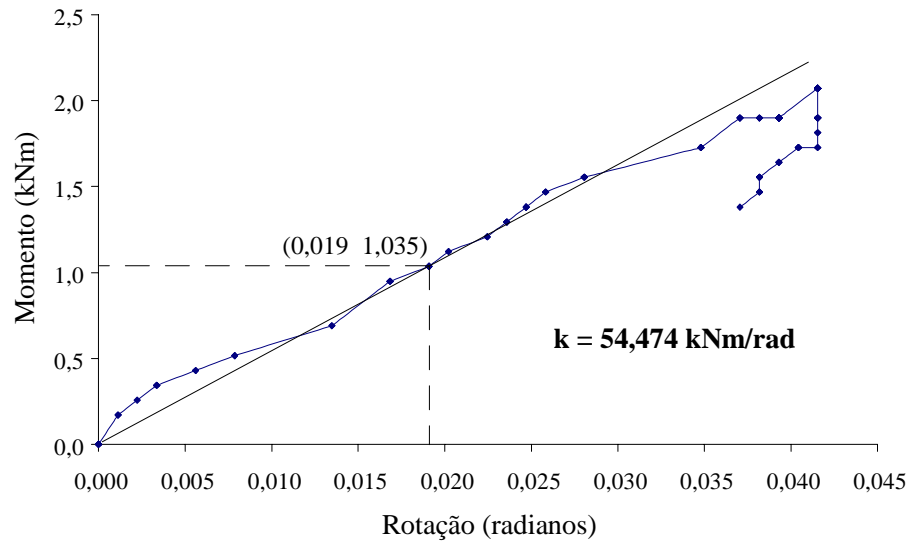


Figura 8.7. Curva momento-rotação protótipo do LBMAX-5.

Na figura 8.8 observa-se pela curva carga-deslocamento, a carga última obtida ( $P_u$ ) igual a 11,515 kN. Segundo o RMI utilizando as grandezas relatadas no item 8.2 com o par ordenada ( $\delta_{0,85}$  ;  $P_{0,85}$ ) igual a (6,355 ; 9,788), a rigidez da ligação ( $F$ ) é igual a 53,324 kNm/rad.

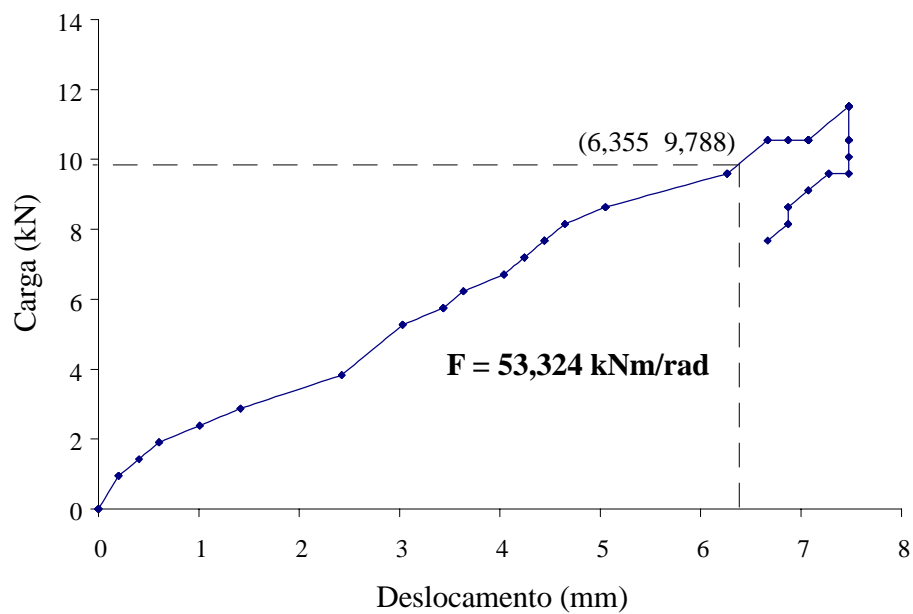


Figura 8.8. Curva carga-deslocamento do protótipo LBMAX-5.

### **8.3. LIGAÇÕES DA LONGARINA**

Neste item tem-se a apresentação e avaliação dos resultados experimentais dos três protótipos ensaiados da ligação da longarina com os modos de ruína e as curvas momento-rotação e carga-deslocamento das ligações.

O comportamento dos três protótipos apresentaram torção na longarina devido à fixação das garras dentadas apenas na alma da coluna, e o modo de colapso da ligação está associado à perda de resistência do material da ligação à coluna.

Utilizando os procedimentos descritos no item 5.4.1, optou-se por utilizar o Método da Inclinação a 50% do Momento Último que mediu a inclinação a 50 % do momento último da ligação sendo este o valor adotado para a rigidez. Em cada protótipo é apresentado o par ordenado relativo ao momento último ( $M_u$ ), com o valor resultante da rigidez ( $k$ ) da ligação.

Utilizando os procedimentos adotados pelo RMI, de acordo com o apresentado no item 5.4.2, é determinada a rigidez da ligação, sendo os seguintes valores adotadas para as grandezas geométricas: momento de inércia da coluna,  $I_c = 42,37 \text{ cm}^4$ ; comprimento da coluna  $L_c = 800 \text{ mm}$ ; comprimento do braço de alavanca da longarina  $L_b = 450 \text{ mm}$ ; momento de inércia da longarina  $I_b = 19,23 \text{ cm}^4$  e fator de minoração R.F. = 1. Para cada protótipo ensaiado é apresentado na curva carga-deslocamento, os valores do par ordenado ( $\delta_{0,85}$ ;  $P_{0,85}$ ) e também o valor calculado da rigidez ( $F$ ).

#### **8.3.1. PROTÓTIPO LLMAX-1**

Na foto 8.7, para o protótipo LLMAX-1, observa-se o deslocamento da longarina ao final do ensaio e a fragilização na região de junção com as garras dentadas, ou seja, no suporte da ligação (figura 6.12 (c)).



Foto 8.7.Deslocamentos obtidos ao final do ensaio do protótipo LLMAX-1.

Esta fragilização do suporte da ligação no lado oposto aos dentes, ocasionou o colapso da ligação. No entanto, as garras permaneceram intactas, sendo observado uma pequena deformação no furo da coluna onde posicionou-se o pino de segurança em função de tração a que o mesmo foi submetido.

O uso das guias verticais foi de fundamental importância para evitar deslocamentos laterais do braço da ligação. No entanto, ocorreu uma pequena torção na ligação pela uso de um pino de segurança e pelo fato de as garras encaixarem apenas no lado direito da coluna.

Na figura 8.9 tem-se a curva momento rotação da ligação com o momento último ( $M_u$ ) igual a 1,72 kNm. Para o cálculo da rigidez foi adotado o Método da Inclinação a 50% do Momento Último. O valor do par ordenado relativo a este momento está indicado na figura e é igual a (0,012 ; 0,859), sendo portanto a inclinação a esta reta a rigidez ( $k$ ) da ligação igual a 71,583 kNm/rad.

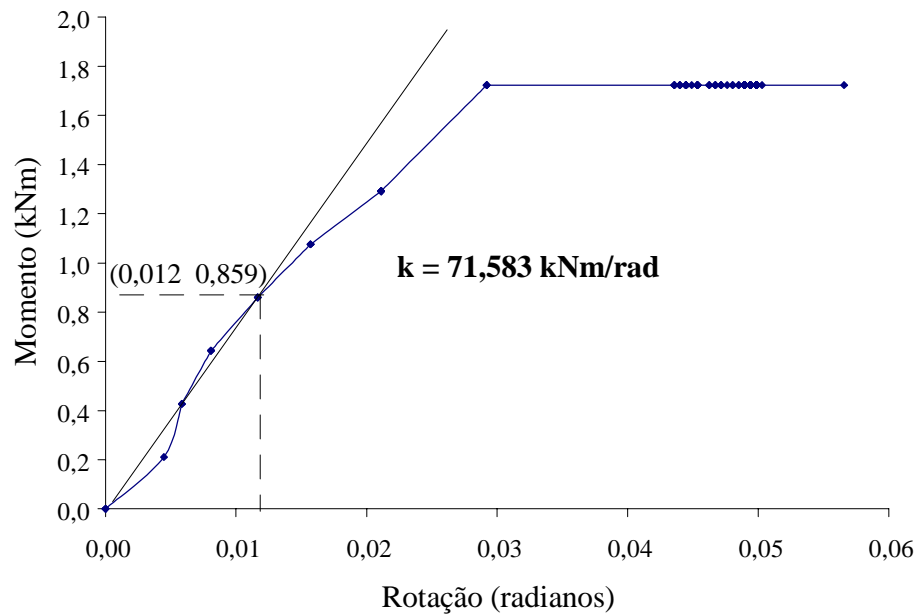


Figura 8.9. Curva momento-rotação protótipo do LLMAX-1.

Na figura 8.10, tem-se a curva carga-deslocamento da ligação da longarina, onde a carga última ( $P_u$ ) é igual a 3,831 kN. Para determinação da rigidez segundo o RMI, foi utilizado o valor do par ordenado ( $\delta_{0,85}$  ;  $P_{0,85}$ ) indicado na figura 8.10 como (11,4 ; 3,256) e o valor calculado da rigidez ( $F$ ) da ligação é igual a 77,335 kNm/rad.

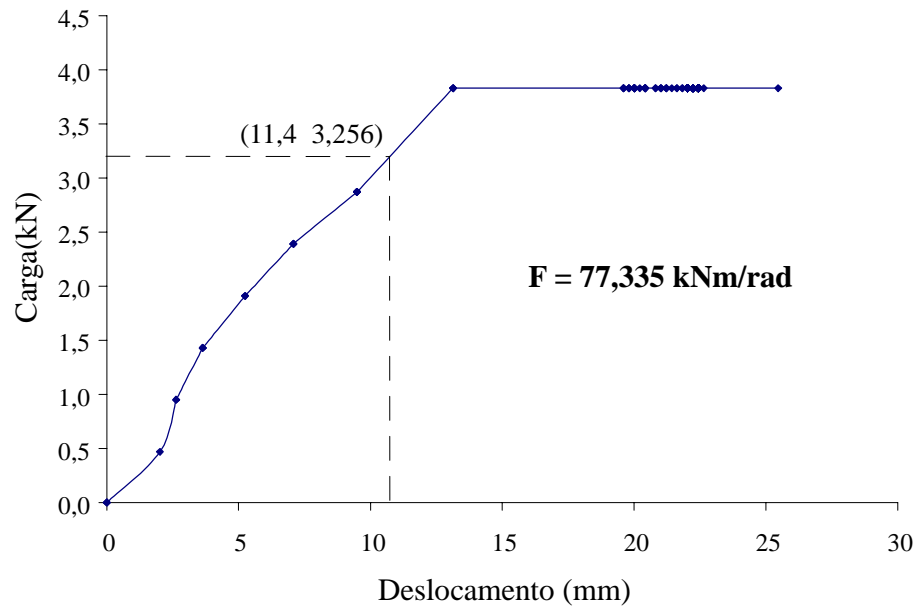


Figura 8.10. Curva carga-deslocamento do protótipo LLMAX-1.

### 8.3.2. PROTÓTIPO LLMAX-2

Este ensaio foi realizado com procedimento idêntico ao LLMAX-1 e quanto aos resultados apresentou as mesmas características daquele protótipo.

Observa-se na foto 8.8 a deformação no suporte da ligação análoga ao ensaio anterior e na foto 8.9 observa-se que como no ensaio do protótipo LLMAX-1 ocorreu uma pequena torção da longarina, visualizada através do desalinhamento do suporte da ligação com as faces verticais da coluna.





Foto 8.8. Deformação do suporte da ligação do lado oposto aos dentes.



Foto 8.9 Torção no suporte da ligação da longarina.

Na figura 8.11 é apresentado a curva momento-rotação da ligação LLMAX-2. O resultado do momento último ( $M_u$ ) é igual a 1,72 kNm. Para a determinação da rigidez utilizou-se o mesmo procedimento adotado anteriormente, cujas coordenadas são (0,013 ; 0,859). Portanto o valor da rigidez da ligação ( $k$ ) é igual 66,077 kNm/rad.

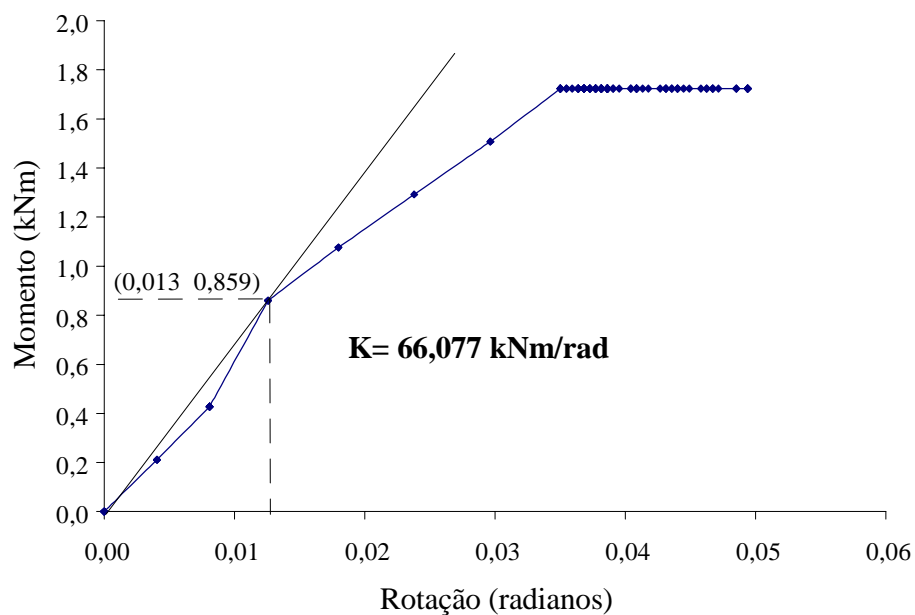


Figura 8.11. Curva momento-rotação do protótipo LLMAX-2.

Na figura 8.12 tem-se a curva carga-deslocamento da ligação com a carga última ( $P_u$ ) igual a 3,83 kN. O cálculo da rigidez, segundo o RMI, utilizou o valor das grandezas apresentadas no item 8.3 com o valor do par ordenado ( $\delta_{0,85}$  ;  $P_{0,85}$ ) igual a (12,9 ; 3,256) resultando no valor (F) da rigidez da ligação igual a 65,766 kNm/rad.

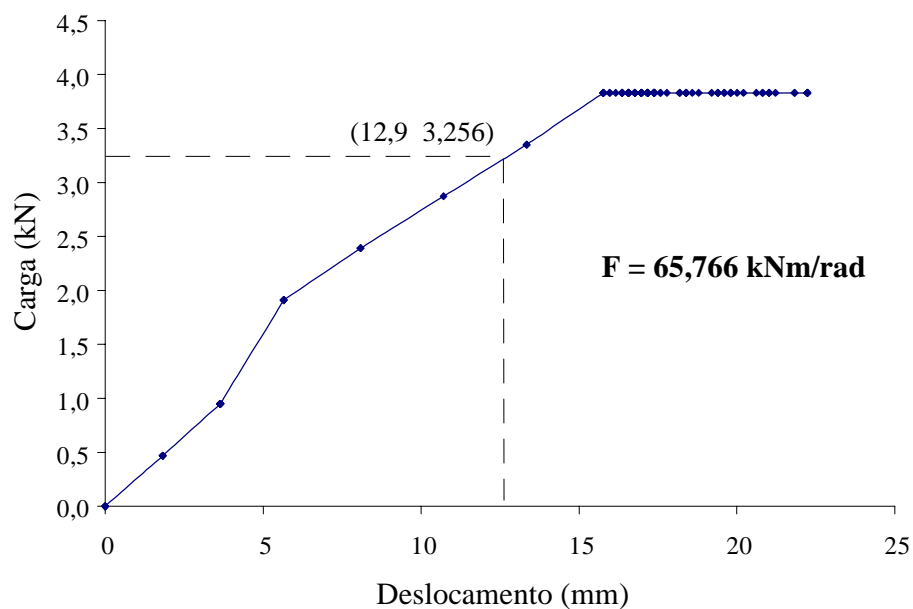


Figura 8.12. Curva carga-deslocamento do protótipo LLMAX-2.

### 8.3.3. PROTÓTIPO LLMAX-3

O comportamento do ensaio do protótipo LLMAX-3 é similar aos dos anteriores.

Na figura 8.13 pode-se observar o comportamento momento-rotação da ligação do protótipo LLMAX-3, com o momento último ( $M_u$ ) igual a 1,07 kNm/rad. O valor da rigidez utilizando o método da Inclinação a 50% do Momento Último é igual a  $k = 66,077$  kNm/rad.

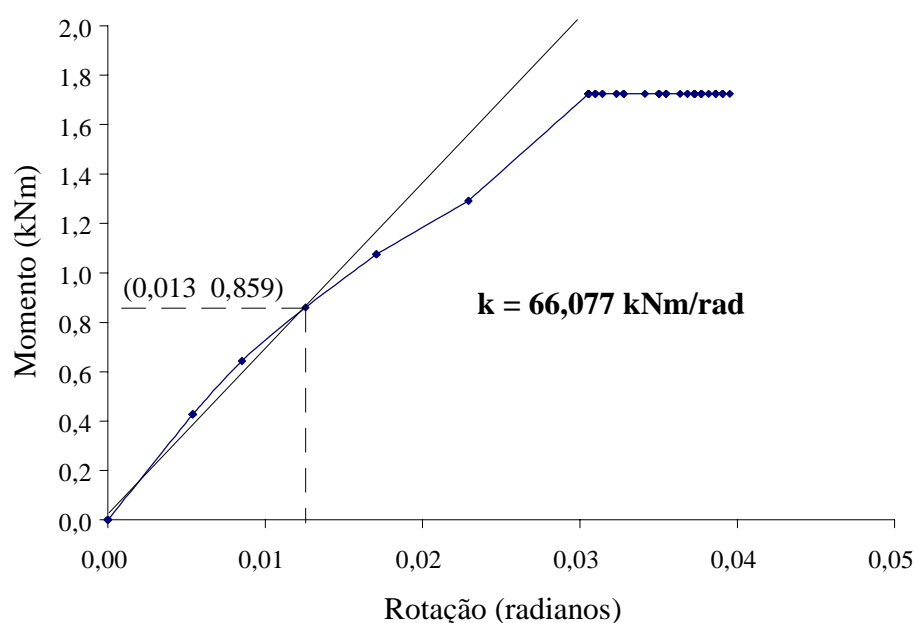


Figura 8. 13. Curva momento-rotação do protótipo LLMAX-3.

Na figura 8.14 observa-se a curva carga-deslocamento da ligação com a carga última ( $P_u$ ) igual a 3,831 kN. Adotando-se os valores das grandezas do item 8.3 e o valor do par ordenado ( $\delta_{0,85}$  ;  $P_{0,85}$ ) igual a (11,9 ; 3,256) resulta-se no valor da rigidez ( $F$ ) igual a 73,052 kNm/rad.

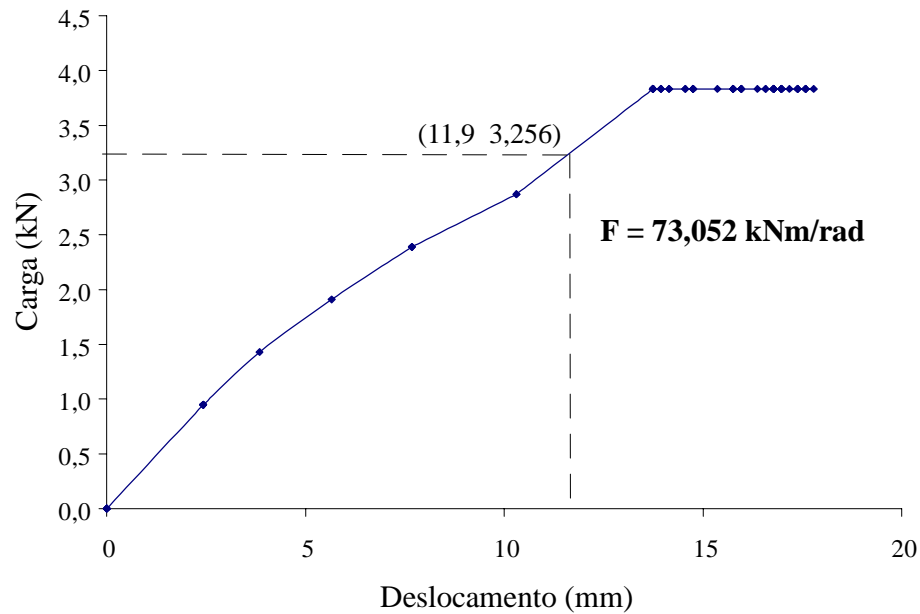


Figura 8.14. Curva carga-deslocamento do protótipo LLMAX-3.

#### **8.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Na tabela 8.1 tem-se os parâmetros utilizados na determinação da rigidez de cada protótipo ensaiado da ligação do braço e da longarina. Estes parâmetros são representados pelo Método da Inclinação a 50% do Momento Último e pelas recomendações do RMI.

Para o Método da Inclinação a 50% do Momento Último, os pares ordenados são  $(50\%M_u ; \theta)$ , respectivamente 50% do momento último e a rotação correspondente.

Para as prescrições do RMI, utiliza-se os valores dos pares ordenados de  $P_{0,85}$ , igual a 0,85 vezes o carregamento último e  $\delta_{0,85}$ , igual a deflexão para esta carga na extremidade livre da viga.

Tabela 8.1.Pares ordenados obtidos nas curvas momento-rotação e nas curvas carga-deslocamento para cada protótipo.

	<b>Método de Inclinação a 50% Momento Último</b>		<b>RMI</b>	
<b>Elementos Ensaiaados</b>	<b>50%M<sub>u</sub>(kNm)</b>	<b>θ (rad)</b>	<b>P<sub>0,85</sub>(kN)</b>	<b>δ<sub>0,85</sub>(mm)</b>
LBMAX-1	-	-	-	-
LBMAX-2	1,035	0,0157	9,788	5,350
LBMAX-3	-	-	-	-
LBMAX-4	1,209	0,0151	11,421	5,000
LBMAX-5	1,035	0,019	9,788	6,355
LLMAX-1	0,86	0,012	3,256	11,400
LLMAX-2	0,86	0,013	3,256	12,900
LLMAX-3	0,86	0,013	3,256	11,900

A rigidez da ligação baseado nos ensaios e utilizando o Método da Inclinação a 50% do Momento Último é determinada através da média aritmética dos valores das rigidezes dos protótipos ensaiados da ligação do braço e do mesmo modo para a rigidez da ligação da longarina (Markazi et al. (1997)).

No procedimento adotado pelo RMI é necessário um mínimo de 2 protótipos, para o cálculo da rigidez da ligação. Como os valores obtidos dos dois primeiros ensaios tiveram um desvio padrão superior a 10%, um terceiro ensaio foi feito e o valor da rigidez foi o resultado da média dos dois maiores valores.

A tabela 8.2 apresenta os resultados dos dois grupos de ligações ensaiadas, seguindo o Método da Inclinação a 50% do Momento Último e as prescrições do RMI, com os respectivos valores da rigidez de cada protótipo. Observa-se também os valores médios resultantes do cálculo da rigidez dos dois grupos de ligações,  $k_m$  e  $F_m$  segundo os dois procedimentos de cálculo.

Tabela 8.2. Resultados da rigidez da ligação do braço e ligação da longarina.

		Método de Inclinação a 50% Momento Último		RMI		
	Protótipo	k (kNm/rad)	k <sub>m</sub> (kNm/rad)	F (kNm/rad)	F <sub>m</sub> (kNm/rad)	k <sub>m</sub> /F <sub>m</sub>
LIGAÇÃO DO BRAÇO	LBMAX-2	64,375		65,923		
	LBMAX-4	80,066		81,801		
	LBMAX-5	54,474	<b>66,305</b>	53,324	<b>73,862</b>	<b>0,898</b>
LIGAÇÃO DA LONGARINA	LLMAX-1	71,583		77,335		
	LLMAX-2	66,077		65,766		
	LLMAX-3	66,077	<b>67,912</b>	73,052	<b>75,193</b>	<b>0,903</b>

Observa-se que apesar de procedimentos diferentes para a determinação da rigidez os métodos adotados apresentaram boa correlação quanto aos resultados de cada ensaio. No entanto o valor médio resultante da rigidez quando calculado pelo RMI é maior que o valor segundo o Método da Inclinação a 50% do Momento Último (Markazi et al. (1997)).

## **CAPÍTULO 9**

### **ANÁLISE NUMÉRICA DA COLUNA CURTA**

#### **9.1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo tem-se a descrição da análise numérica realizada através do software LUSAS (1999a,b), em um modelo que simula o teste experimental da coluna curta, que foi executado com o carregamento axial aplicado no centro de gravidade de área líquida mínima da seção. Este modelo numérico é uma forma alternativa para determinar o fator  $Q$ , fator redutor da área da seção para se levar em consideração a influência dos furos no cálculo da área efetiva da seção transversal. A contribuição neste trabalho, porém limitou-se a uma análise linear da coluna.

#### **9.2. SIMULAÇÃO DO ENSAIO DA COLUNA CURTA**

Foi gerado um modelo para representar o ensaio das colunas curtas apresentado no item 6.4.2. A figura 9.1 apresenta um esquema geral do modelo. Foi modelada uma coluna de 260 mm de altura entre duas placas de rigidez infinita, representando as placas de reação da máquina de ensaios KRATOS. Seguindo a metodologia recomendada pelo RMI (1997), foi aplicado um carregamento na placa inferior do modelo, na posição do centro de gravidade da área mínima da seção transversal da coluna, simulando a aplicação do carregamento real nos ensaios.



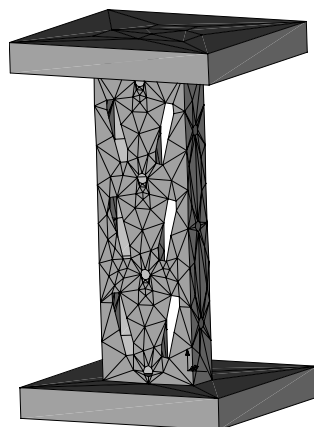


Figura 9.1. Esquema geral do modelo do ensaio da coluna curta.

O carregamento foi aplicado em incrementos de 10 kN, até a carga 150 kN, 7% acima da carga última média,  $P_{ua}$  obtida nos protótipos experimentais, tabela 7.1.

Nos próximos itens serão abordados os tipos de elementos adotados, a configuração da malha e as condições de contorno utilizadas.

### **9.3. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS**

As figuras 9.2 e 9.3 apresentam os tipos de elementos utilizados nesta análise, com a indicação dos graus de liberdade em cada eixo e também o número de nós por elementos, sendo utilizados na simulação da coluna os elementos tipo “Shell”, TS3 e QSI4 e, nas placas de reação, o elemento tipo “3D continuum”, HX8M. As principais características dos tipos de elementos utilizados nesta análise estão apresentados na tabela 9.1.

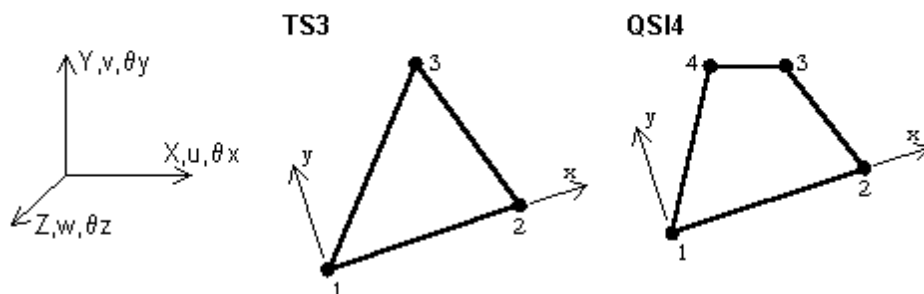


Figura 9.2. Elementos tipo “shell” (TS3 e QSI4) utilizados na modelagem da coluna, LUSAS (1999a).

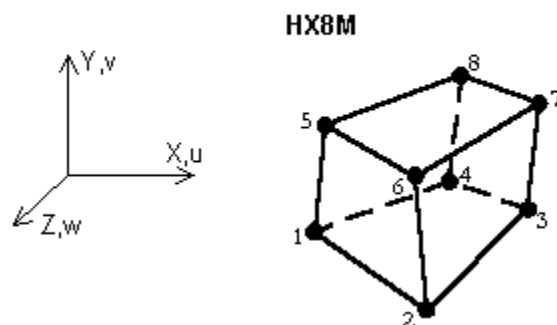


Figura 9.3. Elemento tipo “3 D continuum”(HX8M) utilizado na modelagem das placas de reação, LUSAS (1999a).

Tabela 9.1. Características dos elementos finitos utilizados na análise.

Nome do elemento	TS3	QSI4	HX8M
Posição do elemento	Coluna	coluna	placas de reação
Descrição do elemento	“flat thin shell” empregados para análise de membranas e deformações de flexão		isoparamétrico sólido
Propriedades Geométricas	$e_z$	$e_z$	Não aplicável
Nº de nós	3	4	8
Graus de liberdade	U, V, W, $\theta_x$ , $\theta_y$ , $\theta_z$	U, V, W, $\theta_x$ , $\theta_y$ , $\theta_z$	U, V, W
$e_z$ = excentricidade do eixo de elemento em relação ao eixo xy local; U, V, W = translações nos eixos x, y e z, respectivamente; $\theta_x$ , $\theta_y$ , $\theta_z$ = rotações nos eixos x, y e z, respectivamente.			

A figura 9.4 apresenta, com detalhes, a nomenclatura utilizada na seção transversal e como foi gerada a malha para cada face da coluna. A geração da malha neste elemento foi manual, impondo-se as divisões em cada linha que compõe o modelo. Nas faces da alma, nos flanges e nos flanges de ligação, respectivamente indicados nas figuras 9.4 (c), (d) e (f), foi utilizado o elemento TS3, devido à geometria dos furos. Nas faces dos enrijecedores, figura 9.4 (e) utilizou-se o elemento QSI4, apropriado para faces retangulares.

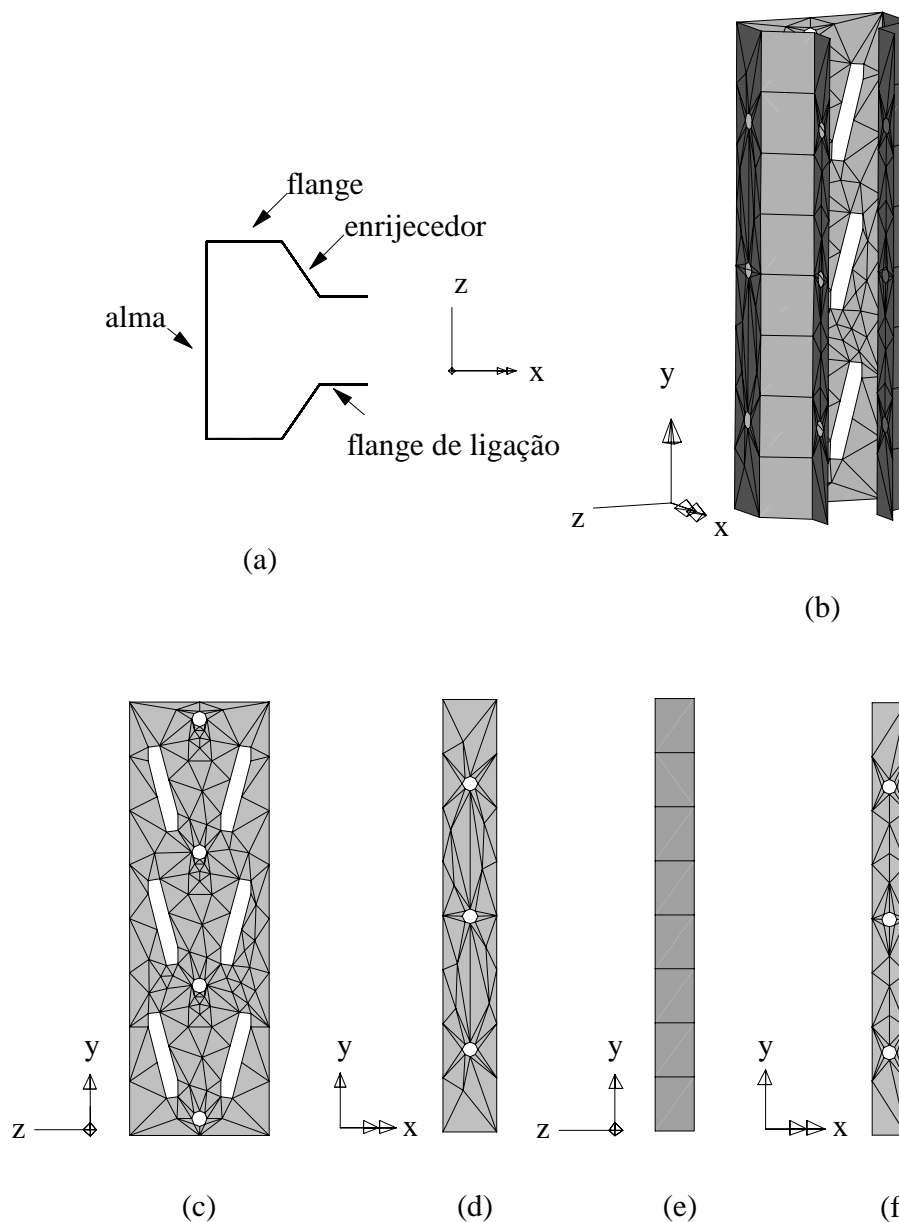


Figura 9.4. Malha de elementos finitos utilizada no modelo de coluna curta:  
 (a) Nomenclatura da seção transversal da coluna; (b) Vista geral da coluna; (c) Face da alma; (d) Face dos flanges; (e) Face dos enrijecedores; (f) Face dos flanges de ligação.

A espessura definida para os elementos TS3 e QSI4 é igual a própria espessura da chapa do perfil, ou seja, 2,65 mm. Para o aço empregado, considerando-se uma análise linear, adotou-se o módulo de elasticidade  $E = 205000 \text{ MPa}$ , e coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$ .

Para as duas placas de reação foi utilizado o elemento tipo “3D continuum”, representado na figura 9.5. De forma automática foi gerada a malha considerando-se um único elemento para cada sólido formado. O material utilizado na análise é suposto com rigidez infinita, com módulo de elasticidade  $E = 2,0 \times 10^{20}$  MPa, para que não haja nenhuma deformação na placa.

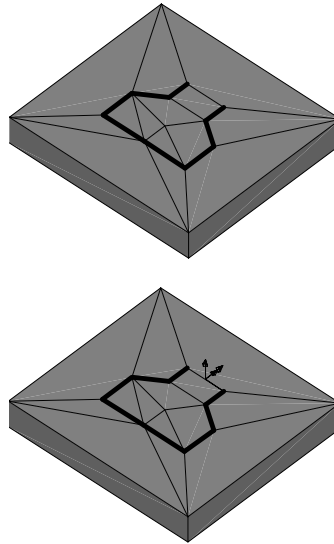


Figura 9.5. Malha de elementos finitos nas placas de reação superior e inferior.

#### **9.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO**

Observa-se que as linhas em destaque nas placas, representadas na figura 9.5, têm o formato da seção transversal da coluna. Em ambas as placas estas regiões foram utilizadas para simular o contato entre a coluna e placa de reação. O atrito entre as placas e as extremidades da coluna foi suposto infinito, considerando-se as regiões de contato como soldadas.

Todas as rotações da placa inferior foram restringidas, e o único deslocamento permitido foi na direção axial da coluna, que é a direção de aplicação do carregamento.

Para a placa superior, todos os deslocamentos e rotações foram restringidos, apesar de existir uma rótula no ensaio da coluna. Modelo similar de elementos finitos foi desenvolvido por Davies et al. (1997), que considerou condições de contorno semelhantes.

## **9.5. RESULTADOS**

Neste item são apresentados os resultados obtidos nesta simulação. É importante ressaltar que fez-se uma análise elástica linear do modelo, verificando-se a eficiência dos tipos de elementos utilizados. Com a análise linear tem-se os subsídios para trabalhos futuros que visem a abordagem do comportamento não-linear do modelo, este um método alternativo para determinação da área efetiva da seção transversal da coluna.

### **9.5.1. HISTÓRICO DOS NÍVEIS DE TENSÃO NO MODELO DA COLUNA**

A figura 9.6 apresenta os níveis de tensão para os diversos carregamentos aplicados no modelo segundo a tensão resultante equivalente de von Mises. A escala de cores está entre os valores de 300 MPa e 320 MPa, este último correspondente ao valor da tensão de escoamento obtida nos ensaios de caracterização. Observou-se que para carregamentos inferiores a 70 kN não há nenhuma região que atinge a tensão de escoamento. Para os carregamentos de 100 e 110 kN, apresentados respectivamente, nas figuras 9.6 (d) e (e), observa-se que alguns pontos das extremidades da face da coluna já atingem a tensão de escoamento, principalmente na face inferior. Neste intervalo, nos protótipos CCMAX-1 e CCMAX-2, observou-se, visualmente, as primeiras deformações na face da alma. Observa-se, ainda, que a partir de 130 kN, todas as faces já atingiram a tensão limite de escoamento, com exceção da face da alma, com pequenas regiões abaixo deste valor. Nos ensaios observou-se que a carga última dos protótipos encontra-se no intervalo de 135 a 145 kN, portanto coerentes com os resultados numéricos, para os quais praticamente todos os pontos das colunas já atingiram o valor da tensão limite de escoamento.

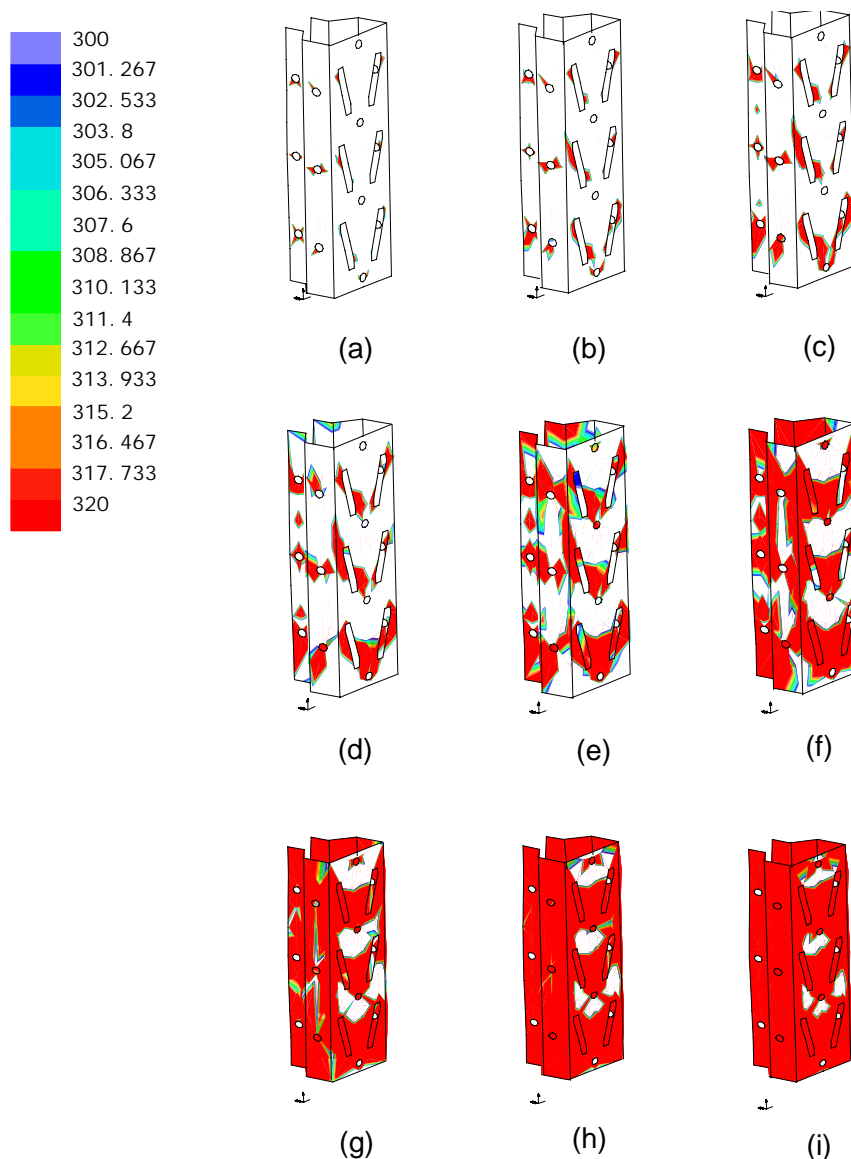


Figura 9.6. Níveis de tensões no modelo da coluna para diversos carregamentos:  
 (a)  $P = 70 \text{ kN}$ ; (b)  $P = 80 \text{ kN}$ , (c)  $P=90 \text{ kN}$ ; (d)  $P=100 \text{ kN}$ ; (e)  $P=110 \text{ kN}$ ; (f)  $P=120 \text{ kN}$ ;  
 (g)  $P=130 \text{ kN}$ ; (h)  $P =140 \text{ kN}$ ; (i)  $P = 150 \text{ kN}$ .

### 9.5.2. DESLOCAMENTOS DO MODELO

São apresentados, neste item, os deslocamentos em cada face do modelo da coluna, para o carregamento de 100 kN. Este nível de carregamento foi escolhido porque o material da coluna ainda está na fase elástica, com poucas regiões atingindo a tensão de escoamento de 320 MPa, como ilustrado na figura 9.6 (d).

A figura 9.7 apresenta as deformações na coluna, com a indicação dos afastamentos e aproximações dos flanges de ligação, com uma ampliação de 300 vezes.

Comparando-se com a foto 9.1, observa-se diferença no sentido da distorção dos flanges de ligação à meia altura da coluna. Nos ensaios experimentais houve uma aproximação dos flanges de ligação na meia altura da coluna e no modelo numérico esta aproximação ocorreu perto da primeira seqüência de furos dos flanges, como indicado na figura 9.7. As diferenças, possivelmente, são decorrentes da existência de imperfeições geométricas nos corpos de prova ensaiados e das condições de contorno adotadas no modelo para as extremidades da coluna, já que os protótipos ensaiados não foram soldados às placas de reação como suposto no modelo.

Através da figura 9.7 observa-se também que as deformações nos flanges ocorrem no sentido contrário às dos flanges de ligação, ocasionando um afastamento na primeira seqüência de furos.

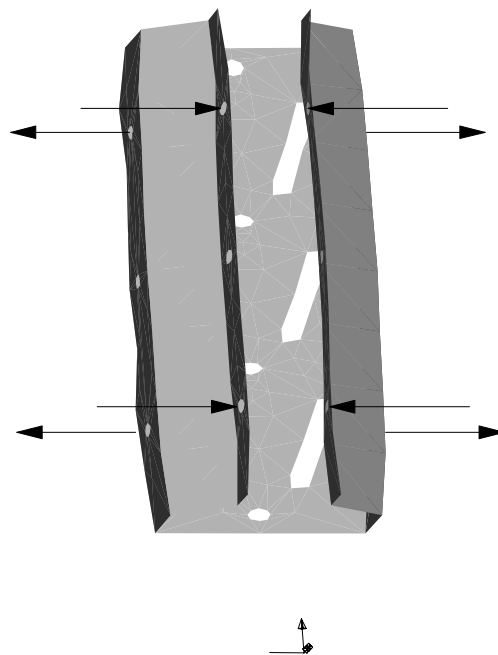


Figura 9.7. Vista das deformações da coluna para o carregamento de 100 kN, com a indicação das regiões de aproximação dos flanges de ligação, e de afastamento dos flanges para uma ampliação de 300 vezes.

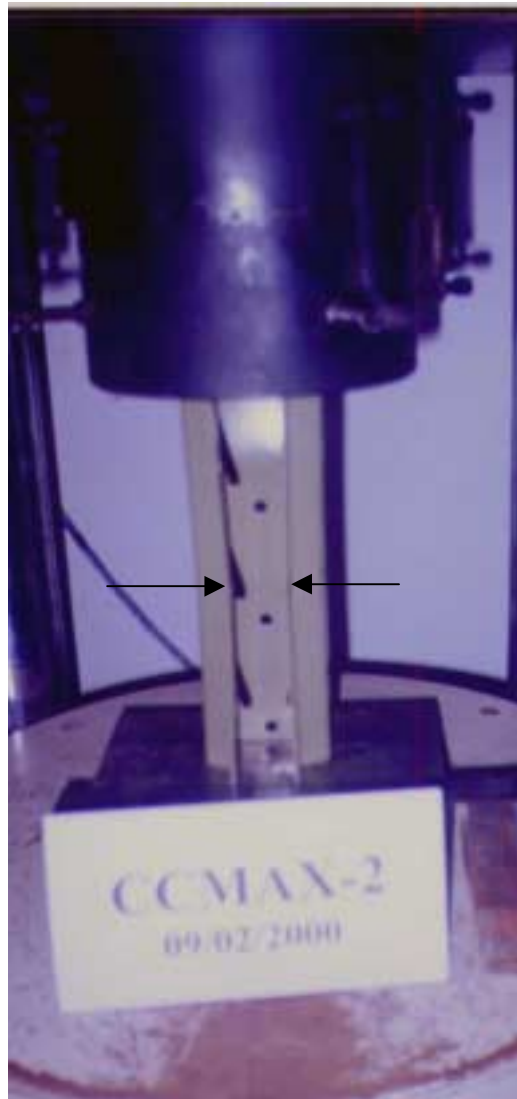


Foto 9.1. Deslocamento nos flanges de ligação a meia altura da coluna.

A seguir são apresentados os deslocamentos sempre no plano perpendicular às faces utilizando-se a escala de cores e gráficos. Para uma melhor visualização dos resultados são apresentadas a orientação dos eixos e a nomenclatura de cada face da seção transversal, respectivamente nas figuras 9.8 (a) e 9.8 (b).



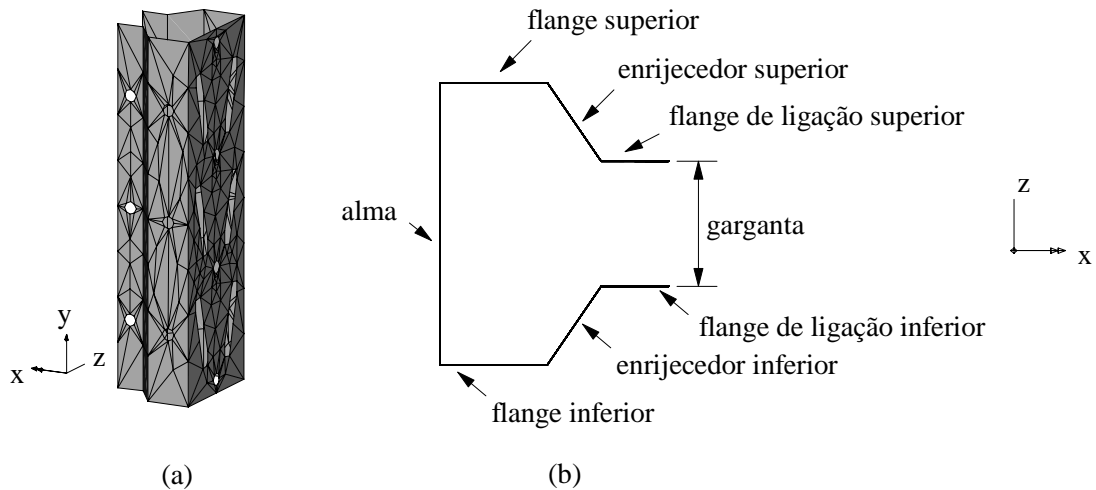


Figura 9.8. Orientação dos eixos na coluna e nomenclatura utilizada para cada face:  
 (a) Vista em perspectiva da coluna; (b) Vista da seção transversal, com orientação dos eixos e nomenclatura das faces.

Na figura 9.9, é apresentado o deslocamento na alma, em escala de cores, para uma carga de 100 kN.

Na figura 9.10 são apresentadas as curvas para o deslocamento na direção x, obtidas ao longo das seções indicadas na figura 9.9.

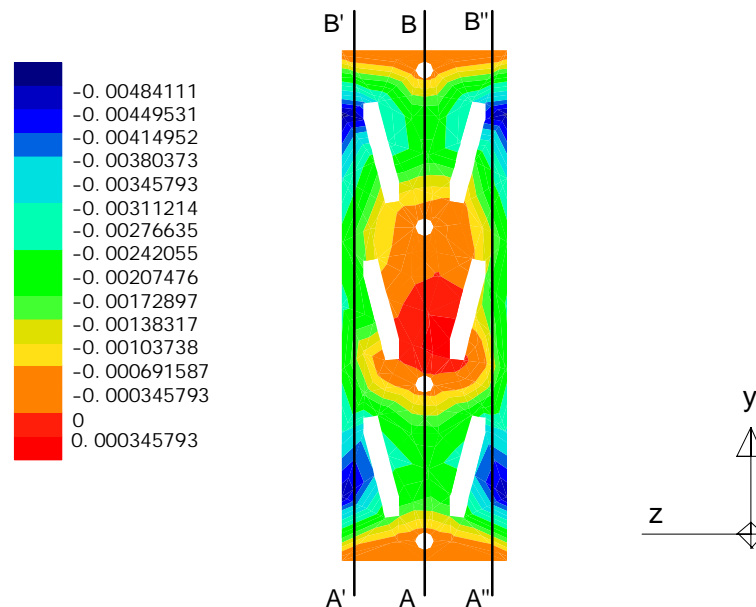


Figura 9.9. Deslocamento na direção x, normal à face da alma.

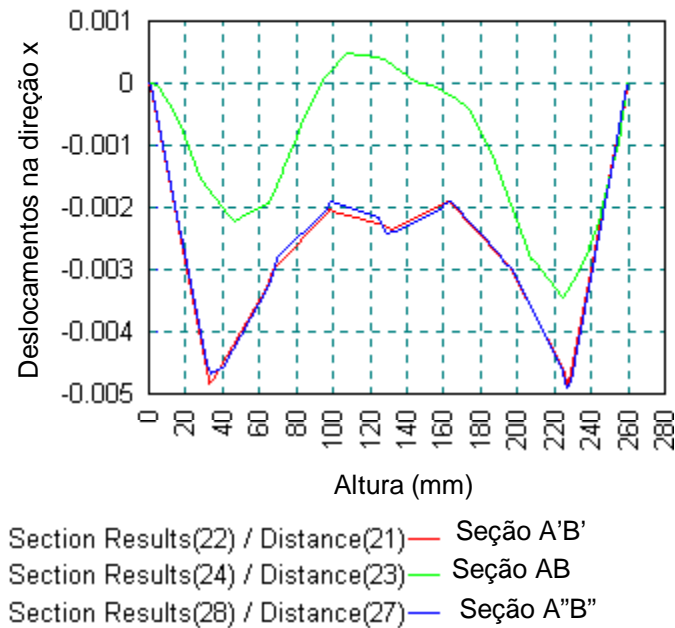


Figura 9.10. Curva deslocamento das seções AB, A'B' e A''B'', na direção x , normal à face da alma.

Pode-se observar uma simetria nos deslocamentos da face da alma, nas seções A'B' e A''B'', e também a coincidência das curvas para estas seções, na figura 9.10.

Na seção intermediária AB, observa-se deslocamentos negativos nas extremidades da face da alma. Esses deslocamentos atingem o máximo nas cotas de aproximadamente 40 e 220 mm, seguindo de um deslocamento no sentido contrário. Comparando-se com a foto 9.2, observa-se que o modelo e o protótipo apresentaram deslocamentos em sentidos contrários o que é ocasionado por imperfeições geométricas nos protótipos, induzindo o sentido das deformações e que não foram consideradas no modelo.

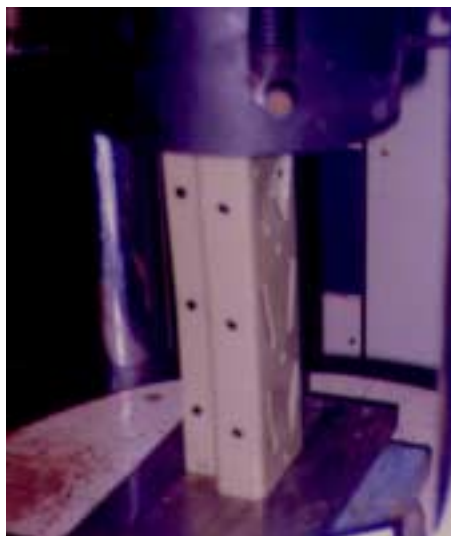


Foto 9.2. Deslocamento na face da alma.

As figuras 9.11 e 9.12 representam respectivamente, os deslocamentos, na direção  $z$ , normal à face dos flanges inferior e superior, utilizando-se escala de cores e gráfico de deslocamentos ao longo das seções intermediárias CD e EF.

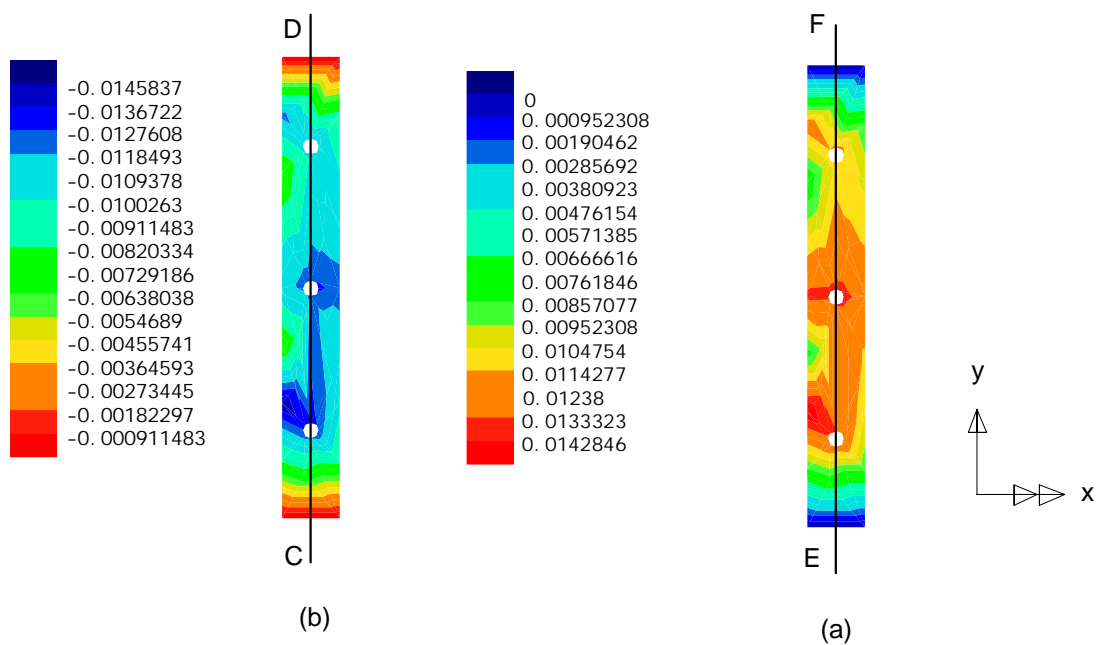


Figura 9.11. Deslocamentos na direção  $z$ , normal à face dos flanges: (a) Flange inferior; (b) Flange superior.

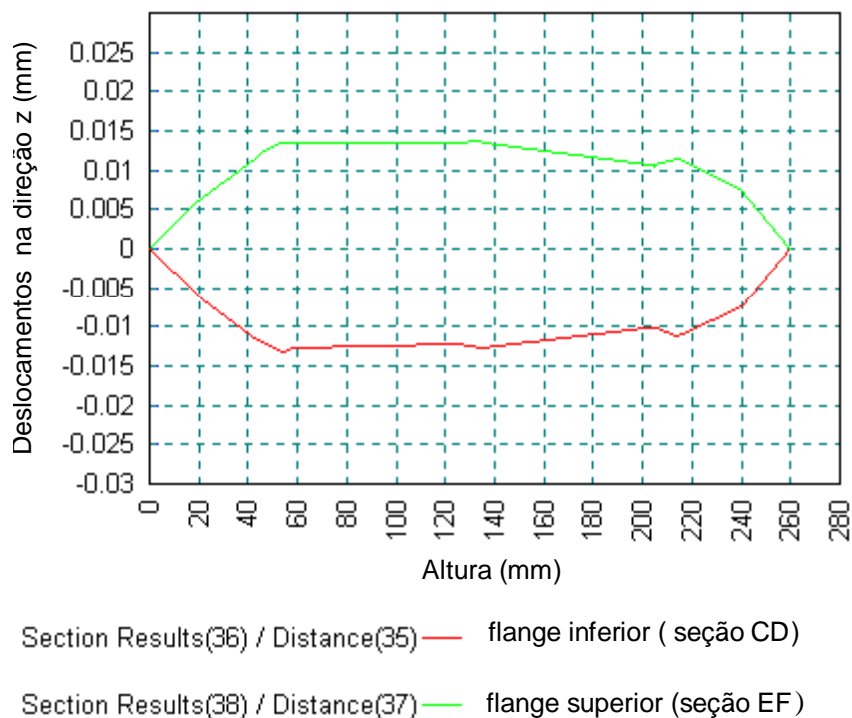


Figura 9.12. Curvas de deslocamentos, na direção z, para as seções CD e EF, respectivamente nos flanges inferior e superior.

Observa-se que há uma simetria entre os dois flanges, pela oposição das cores, e também pela curva de deslocamentos das seções intermediárias CD e EF. Ao observar-se a a direção dos deslocamentos na face dos flanges, conclui-se pela figura 9.12, que nas extremidades, nas cotas de 50 mm e 200mm ocorreram deformações nos flanges com o afastamento dos mesmos.

No ensaio experimental não foi possível observar deformações nas faces dos flanges para se obter um parâmetro comparativo.

Pelo fato dos enrijecedores serem com faces inclinadas, fica impossibilitada obtenção dos deslocamentos na direção normal às suas faces, devido aos deslocamentos obtidos serem em função dos eixos globais. Optou-se por estudar o deslocamento nas direções x e z, respectivamente, normal às faces da alma e flanges.

Pode-se observar na figura 9.13, pela escala de cores apresentando os deslocamentos na direção  $x$ , que há uma anti-simetria dos deslocamentos nesta direção em ambas as faces.

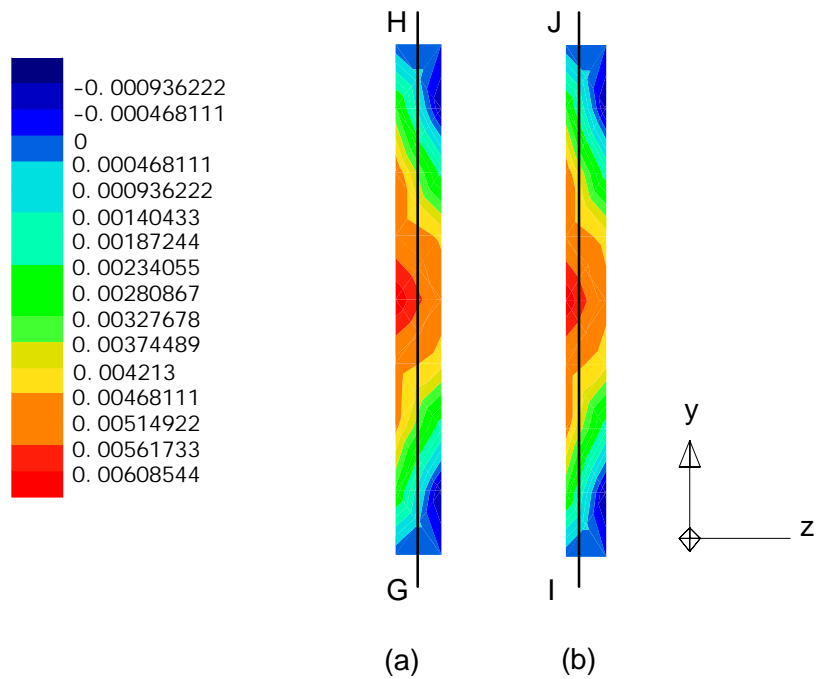
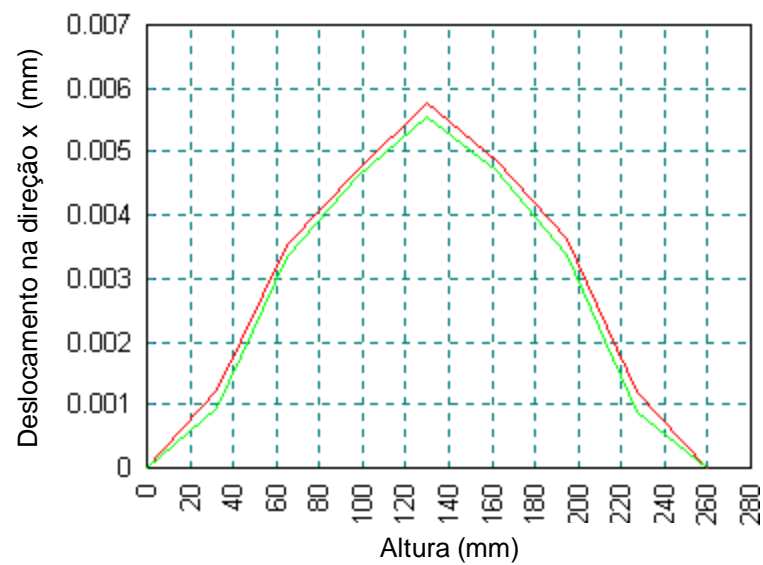


Figura 9.13. Deslocamentos na direção  $x$ , na face dos enrijecedores: (a) Enrijecedor inferior; (b) Enrijecedor superior.

Na figura 9.14, essa anti-simetria é confirmada pela proximidade das curvas das seções intermediárias GH e IJ dos enrijecedores, ocasionando um deslocamento crescente até atingir o máximo à meia altura da coluna.



Section Results(26) / Distance(25) — enrijecedor inferior (seção GH)

Section Results(28) / Distance(27) — enrijecedor superior (seção IJ)

Figura 9.14. Curvas de deslocamentos, na direção x, para as seções intermediárias GH e IJ (enrijecedor inferior e superior).

Na figura 9.15 são apresentados os deslocamentos, na direção z, para os enrijecedores inferior e superior. O comportamento dos deslocamentos nesta direção, pela escala de cores é simétrico, verificando-se a inversão dos valores dos deslocamentos observados nas duas escalas.

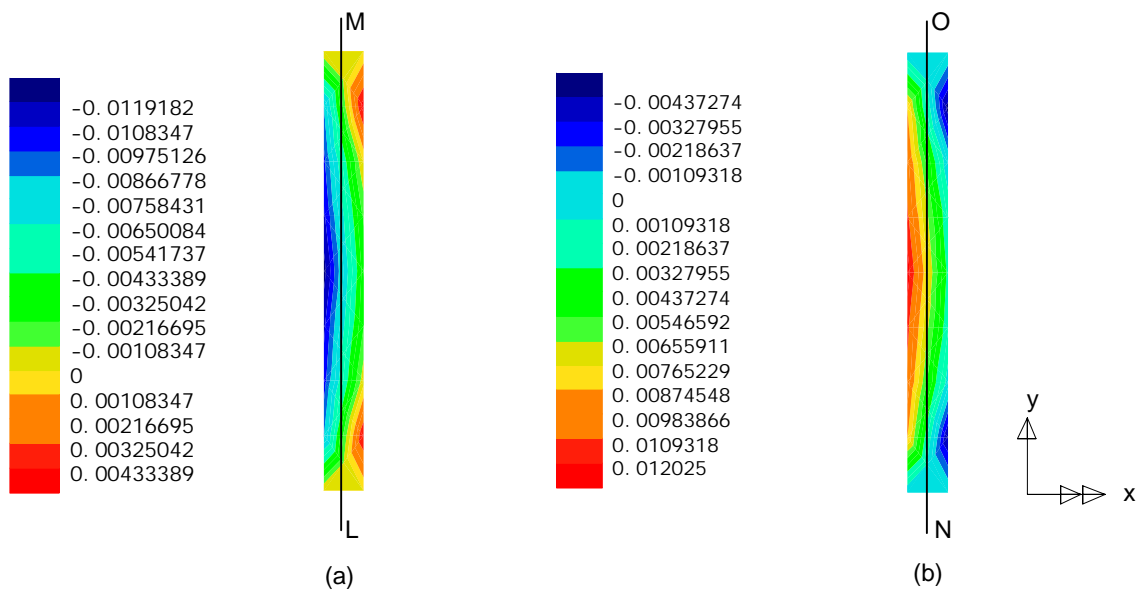
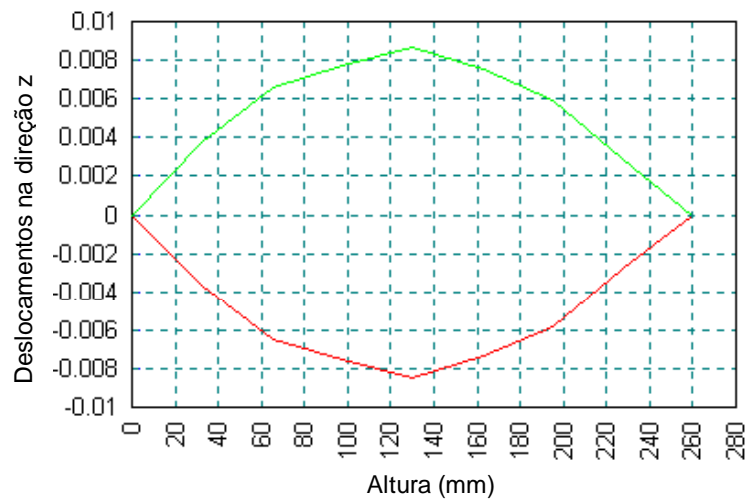


Figura 9.15 Deslocamentos na direção z, na face dos enrijecedores: (a) Enrijecedor inferior; (b) Enrijecedor superior.

Na figura 9.16, que apresenta o gráfico dos deslocamentos, na direção z, das faces dos enrijecedores, pode-se observar a simetria nas faces inferior e superior dos enrijecedores, com deslocamentos crescentes até a meia altura da seção.



Section Results(40) / Distance(39) — enrijecedor inferior (seção LM)  
 Section Results(42) / Distance(41) — enrijecedor superior (seção NO)

Figura 9.16. Curvas de deslocamentos na direção z nas seções intermediárias LM e NO (enrijecedor inferior e superior).

Na figura 9.17 observa-se a variação dos deslocamentos, na direção  $z$ , normal à face dos flanges de ligação. O comportamento dos deslocamentos, nesta face, é similar ao dos flanges, pela simetria observada.

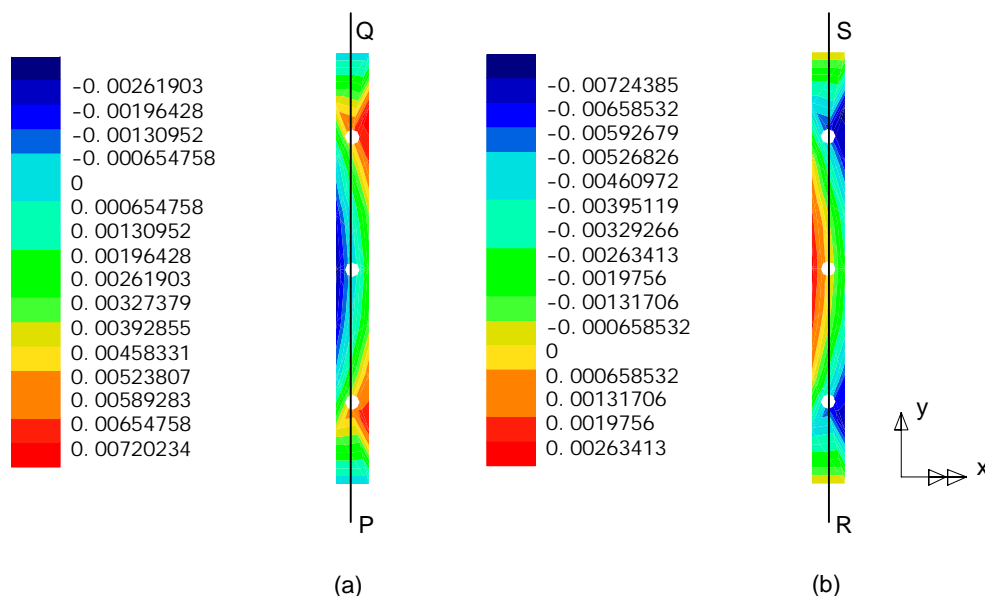


Figura 9.17 Deslocamentos, na direção  $z$ , na face normal aos flanges de ligação;

(a) Flange de ligação inferior; (b) Flange de ligação superior.

A figura 9.18, apresenta o gráfico dos deslocamentos, nas seções PQ e RS, nos flanges de ligação inferior e superior. Observa-se a simetria das faces dos flanges de ligação. As curvas apresentadas nesta figura são relativas à orientação dos eixos mostrada na figura 9.8 (b). Portanto, os deslocamentos na direção  $z$ , positivos para o flange de ligação inferior e negativos para o flange de ligação superior indicam, aproximação dos mesmos, para as cotas de 40 e 220 mm, regiões das primeiras seqüências dos furos das extremidades da coluna nos flanges de ligação. No ponto correspondente à meia altura da coluna, os deslocamentos são praticamente nulos. Nos ensaios experimentais, porém, a aproximação ocorreu na cota de 130 mm, ou seja, à meia altura da coluna.



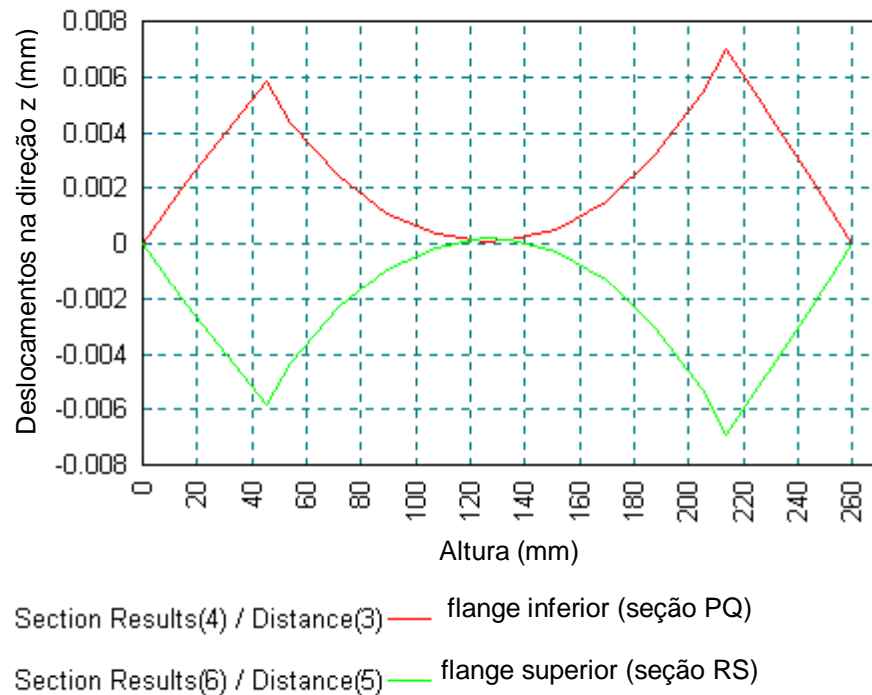


Figura 9.18. Curvas de deslocamentos na direção z nas seções intermediárias PQ e RS, (flange de ligação inferior e superior).

Como pode-se observar ao longo das faces o comportamento do modelo apresentou bons resultados, no que diz respeito às faces paralelas, pela compatibilização dos seus deslocamentos ora simétricos ora anti-simétricos, sendo portanto o tipo de elemento utilizado para modelar a coluna compatível para esta análise linear e que poderá ser utilizado numa análise não-linear.

Um fator que influenciou os resultados dos deslocamentos da coluna foi a condição de contorno das extremidades dos flanges de ligação com a placa. Nos ensaios experimentais ao iniciar-se a aplicação do carregamento, observou-se um afastamento dos flanges de ligação nas extremidades, pois a coluna não foi rigidamente ligada as placas, enquanto no modelo numérico as condições de extremidade foram consideradas rígidas. Um outro fator a ser considerado ainda é a existência de imperfeições geométricas nos protótipos ensaiados e não consideradas no modelo.

## **CAPÍTULO 10**

### **ANÁLISE NUMÉRICA SISTEMA “DRIVE-IN”**

#### **10.1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo é apresentada uma simulação, em elementos finitos utilizando o software LUSAS (1999a,b), de um sistema “drive-in” projetado pela empresa Águia Sistemas de Armazenagem.

O objetivo dessa análise é avaliar a influência da rigidez das ligações em um sistema completo e sua influência na estabilidade deste sistema. Para isto, foram desenvolvidos e comparados dois modelos: o primeiro considerando a rigidez das ligações obtida nos ensaios experimentais, apresentados na tabela 8.2, segundo o procedimento do RMI (1997), e um segundo considerando todas as ligações como rígidas.

#### **10.2. SIMULAÇÃO DO MODELO TRIDIMENSIONAL DE UMA ESTRUTURA “DRIVE-IN”**

Na figura 10.1 é apresentada uma vista geral do sistema “drive-in” com todos os seus componentes. O sistema apresenta contraventamentos nas faces laterais, no fundo e nas face superior.

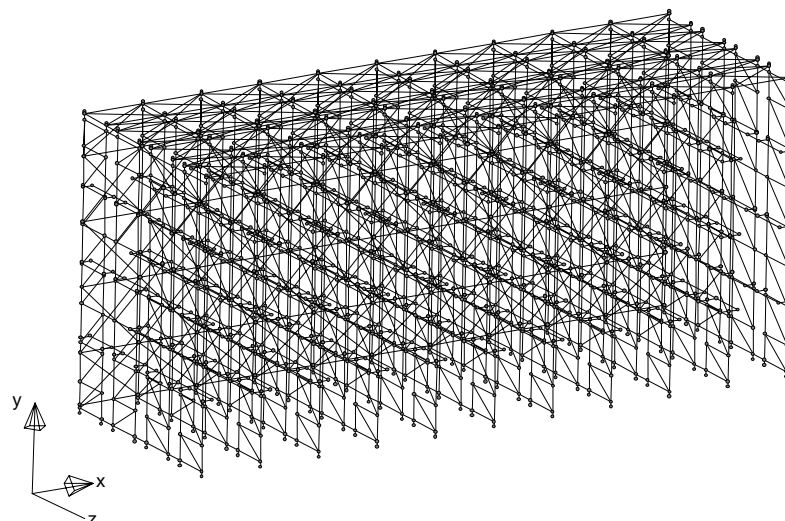


Figura 10.1. Vista geral do modelo em elementos finitos do sistema de armazenagem “drive in”.

No anexo I são apresentados todos os detalhes das vistas do projeto desenvolvido pela empresa Águia Sistemas de Armazenagem. São utilizados dois tipos de ligações diferentes nesta estrutura, localizadas no braço e na longarina. Simulando-se a situação em que todo o sistema esteja completamente carregado. Nos dois modelos foi considerada uma análise linear, com a aplicação máxima do carregamento sendo a especificada no projeto real.

Na figura 10.2 é apresentada a vista frontal do modelo, com a indicação de todos os seus componentes.

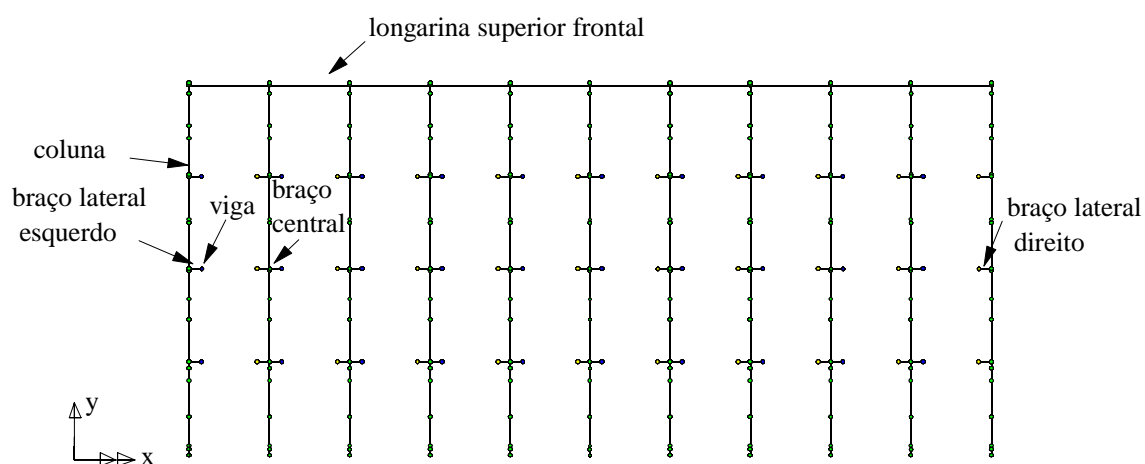


Figura 10.2. Vista frontal do modelo gerado do sistema “drive-in” com a indicação de seus componentes.

Na figura 10.3 tem-se a vista de fundo do sistema “drive-in” com o seu travamento em diagonal e demais componentes.

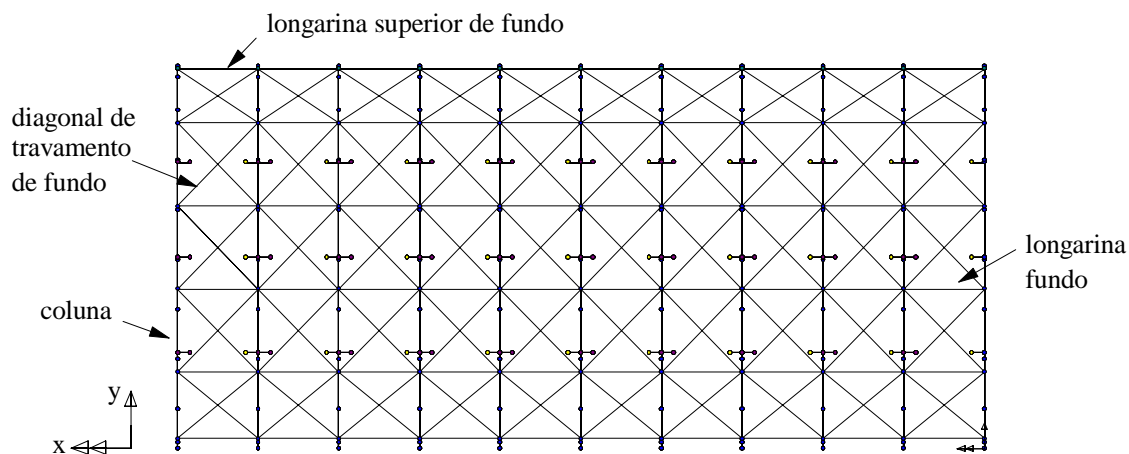


Figura 10.3. Vista de fundo do modelo gerado do sistema “drive-in” com a indicação de seus componentes.

Na figura 10.4 é apresentada a vista superior do modelo, e na figura 10.5 a vista lateral.

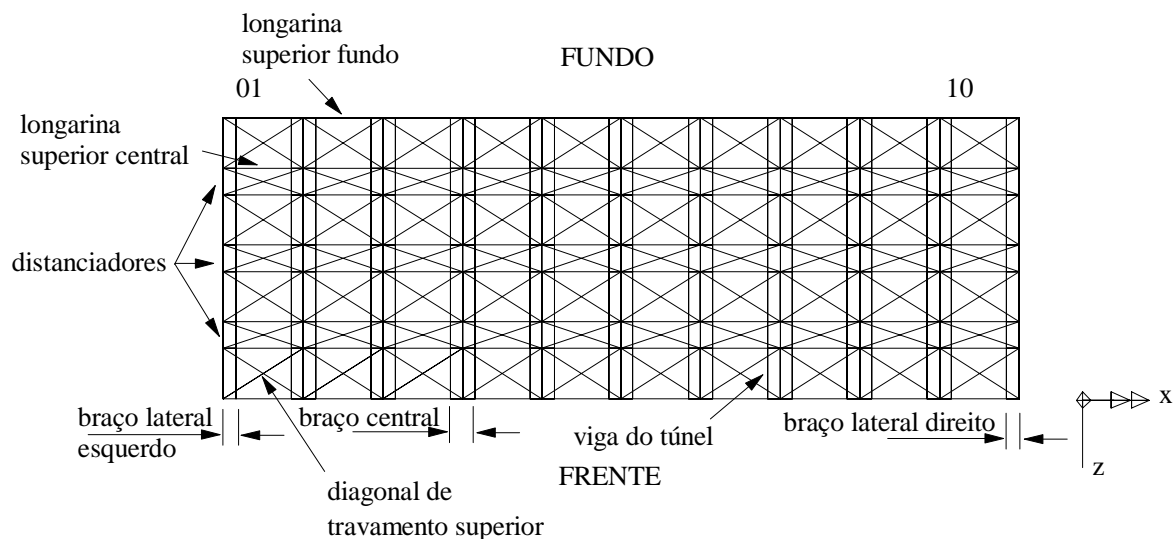


Figura 10.4. Vista superior do modelo gerado do sistema “drive-in” com a indicação de seus componentes.

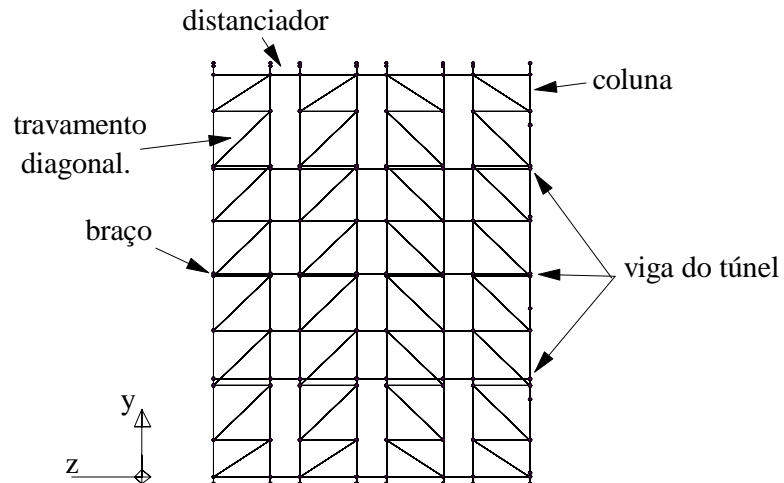


Figura 10.5. Vista lateral do modelo gerado do sistema “drive-in” com a indicação de seus componentes.

Nos próximos itens serão apresentados os tipos de elementos utilizados na análise, o tipo de carregamento e as condições de contorno do sistema.

### **10.3. MALHA EM ELEMENTOS FINITOS**

Foram utilizados dois tipos de elementos na análise dos sistemas “drive-in”. Na figura 10.6 são apresentadas as características do elemento de viga BMS3 utilizado para simulação dos componentes do sistema “drive-in”. São indicados os graus de liberdade em cada eixo e também o número de nós por elemento.

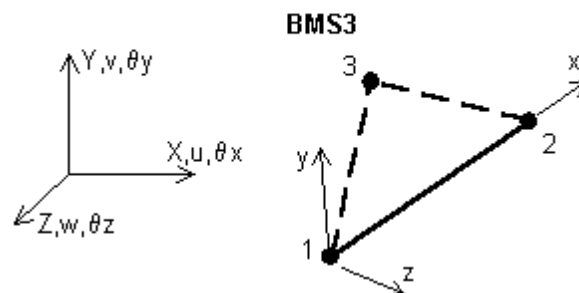


Figura 10.6. Elemento de viga BMS3, LUSAS (1999a).

Para simulação da rigidez das ligações do braço e da longarina, utilizou-se o elemento “joint” JSH4, esquematizado na figura 10.7, constituído de 3 molas translacionais e 3 rotacionais. Os graus de liberdade em cada eixo e o número de nós utilizados para a definição do elemento, estão indicados na figura 10.7.

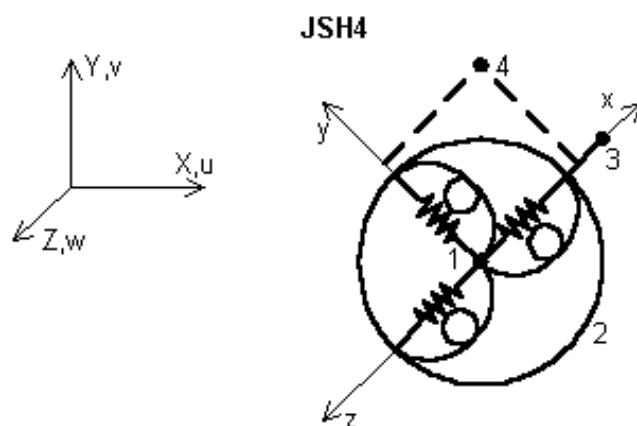


Figura 10.7. Elemento “joint” JSH4, LUSAS (1999a).

A tabela 10.1 apresenta os dois tipos de elementos utilizados na análise do sistema “drive-in”, BMS3 e JSH4, com suas principais características.

Tabela 10.1. Propriedades dos elementos finitos utilizados no modelo do sistema “drive-in”.

Nome do elemento	BMS3	JSH4
Posição do elemento	em toda estrutura.	entre os elementos das colunas e braço e entre colunas e longarinas
Descrição do elemento	elemento linear de viga, em 3 dimensões, para os quais as deformações cisalhantes são incluídas.	elemento “joint” em 3D que é conectado em dois nós por seis molas, rotacionais e translacionais nas direções x, y e z.
Nº de nós	3*	4*
Graus de liberdade em cada nó	U, V, W, $\theta_x$ , $\theta_y$ , $\theta_z$	U, V, W, $\theta_x$ , $\theta_y$ , $\theta_z$
*o terceiro e quarto nós são usados para definir o eixo x local e o plano local xy respectivamente.		

Para ambos os modelos foi considerada uma análise linear adotando-se o módulo de elasticidade  $E = 205000$  MPa e coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$ .

No modelo que considera as ligações rígidas, denominado RACKRIG, foi adotada uma constante de rigidez de  $10^9$  kNm/rad, considerada como representativa de rigidez infinita, atribuída para as 6 direções do elemento “joint” tanto para a ligação do braço como para a ligação da longarina.

No modelo RACKSEMIRIG, que representa o sistema “drive-in” com a rigidez obtida em ensaios experimentais, foi atribuído o mesmo valor de  $10^9$  kNm/rad (rigidez infinita), para os elementos “joint”, com exceção da rotação em torno do eixo z. Para os elementos “joint” que simulam as ligações do braço foi atribuído, na direção da rotação em torno do eixo z, o valor de 73,86 kNm/rad e, para a ligação da longarina, o valor adotado foi de 75,19 kNm/rad.

A figura 10.8 apresenta a vista frontal dos modelos com a esquematização do elemento “joint”, representativo da mola rotacional na direção do eixo z. Os valores adotados para a rigidez da ligação foram obtidos nos ensaios experimentais apresentados na tabela 8.2, segundo o procedimento do RMI.

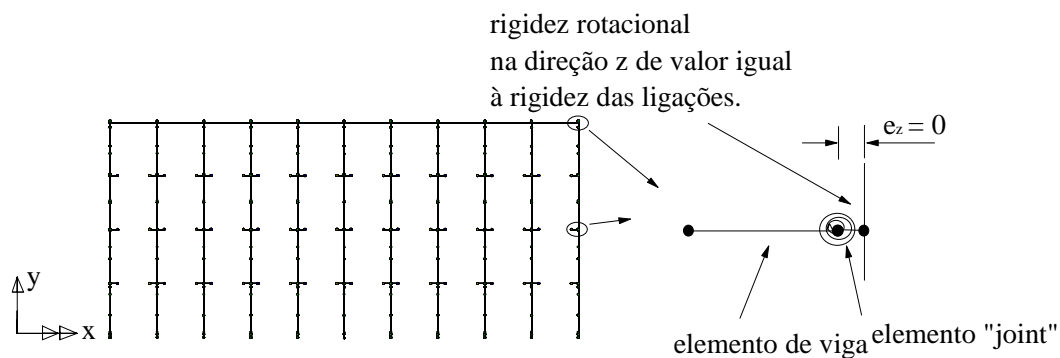


Figura 10.8. Vista frontal dos modelos com o detalhe do posicionamento dos elementos de viga e joints para simulação das ligações.

A tabela 10.2 apresenta as propriedades geométricas de cada membro constituinte do sistema “drive-in” utilizado na análise, com a orientação dos eixos locais, onde:

$A$  = área da seção transversal de cada elemento;

$I_{yy}, I_{zz}$  = momento de Inércia em torno das direções locais dos eixos y e z;

$K_t$  = Constante de torção de “Saint Venant” da seção transversal;

$A_{sz}, A_{sy}$  = áreas efetivas cisalhantes nos plano locais nas direções z e y respectivamente;

$U, V, W$  = translações nos eixos x, y e z, respectivamente;

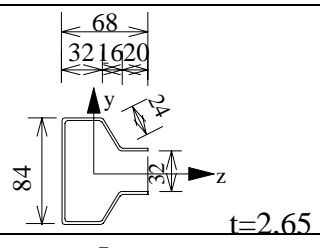
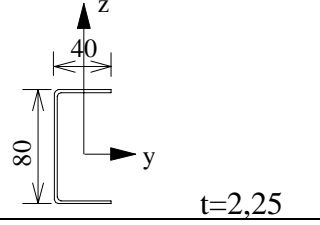
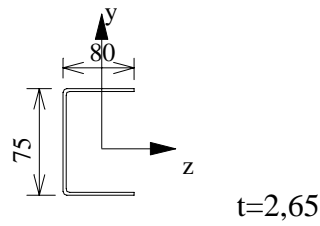
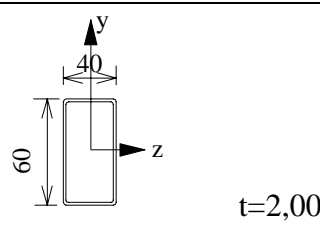
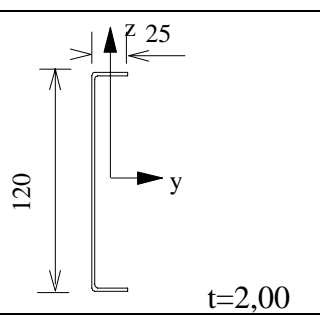
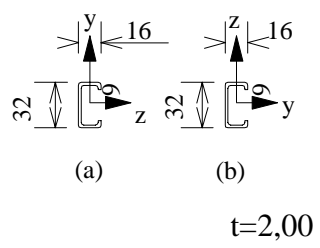
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$  = rotações nos eixos x, y e z, respectivamente.

Nesta análise desconsiderou-se a influência dos esforços cortantes.

Todo o sistema de contraventamento adotado no sistema “drive-in” é rotulado. Para simular essa situação, foram adotados elementos de vigas, com condições de extremidades livres à rotação, (“end realease condition”), para todos os contraventamentos. Foi liberado o movimento de rotação, na direção z, para todos os contraventamentos diagonais e, na direção y, para os contraventamentos horizontais.



Tabela 10.2. Propriedades geométricas de cada membro que compõe o modelo do sistema “drive-in”.

SEÇÃO TRANSVERSAL		$I_{yy} \text{ (cm}^4\text{)}$		$I_{zz} \text{ (cm}^4\text{)}$	$K_t \text{ (cm}^3\text{)}$	$A \text{ (cm}^2\text{)}$
COLUNA						
VIGA DO TÚNEL						
BRAÇO						
LONGARINA						
DISTANCIADOR						
CONTRAV. (A) DIAGONAL. (B) HORIZONTAL.		(a)	0,46	1,87	0,18	1,38
		(b)	1,87	0,46	0,18	1,38

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

#### **10.4. CARREGAMENTO**

Nos dois modelos foi considerado o sistema completamente carregado, como ilustra a figura 10.9. Para representar o carregamento imposto pelos paletes foram adotadas as especificações de projeto, considerando-se a carga  $w = 9 \text{ kN}$  por paleta.

Levando-se em consideração que cada viga de túnel recebe a metade do peso dos paletes, e que cada paleta tem a profundidade  $p = 100 \text{ cm}$ , a carga por unidade de comprimento, uniformemente distribuída ao longo de todas as vigas de túnel é  $q = 0,045 \text{ kN/cm}$ .

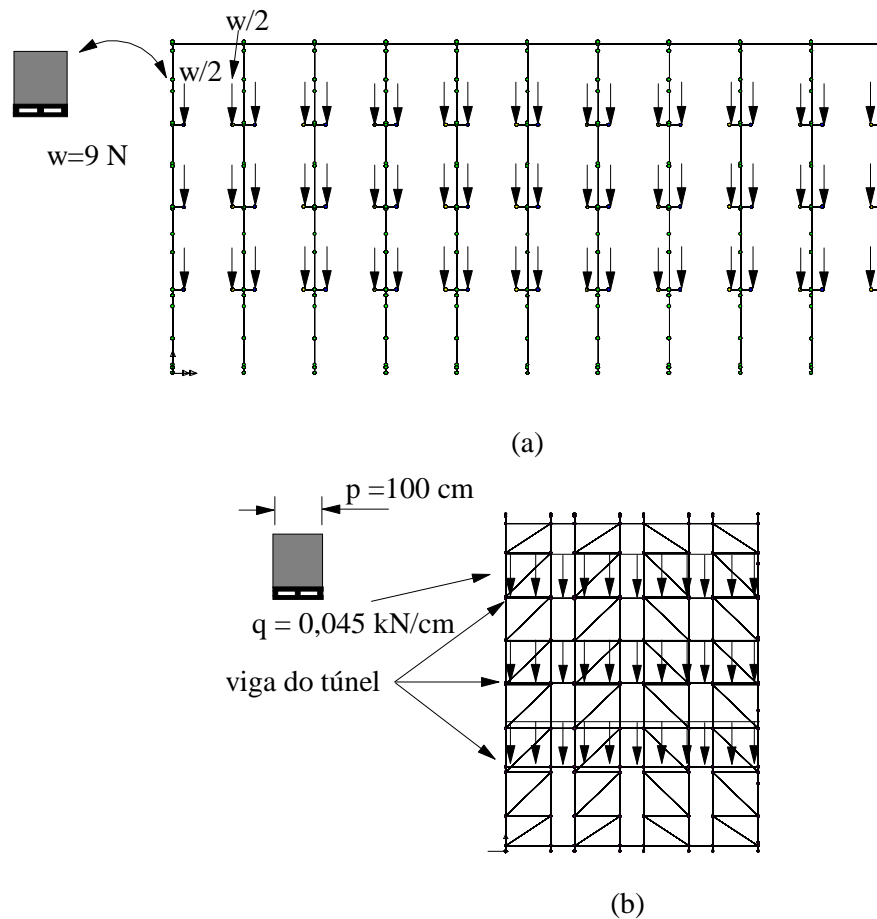


Figura 10.9. Posicionamento do carregamento imposto pelos paletes nos modelos:

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

## **10.5. CONDIÇÕES DE CONTORNO**

Na vista lateral, figura 10.5, a placa de base permite o movimento da coluna pela fixação do parafuso (figura 3.11 (b)). Portanto, nesta direção, o movimento de rotação é livre. Na vista frontal, porém, há uma dificuldade de se avaliar a rigidez da placa de base. Godley (1991) afirma que a rigidez da placa de base é de difícil determinação, pois é governada por diversos parâmetros, tais como a flambagem dos membros. A norma britânica BS 5950 (1985), recomenda que a rigidez da placa de base seja igual a 10% da rigidez da coluna. A FEM (1996) e Stark e Tilburgs (1978) propõem o uso de testes experimentais distintos para o cálculo da rigidez da placa de base.

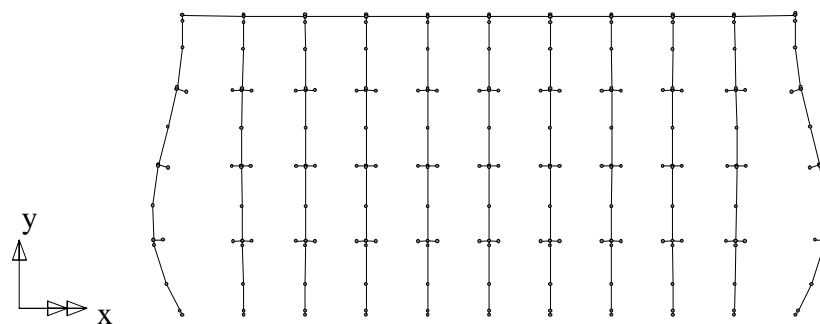
Para simulação do contato entre a placa de base e a coluna, foi restringido o movimentos de translação, na base das colunas, desconsiderando-se qualquer rigidez da placa de base para impedimento das rotações.

## **10.6. RESULTADOS**

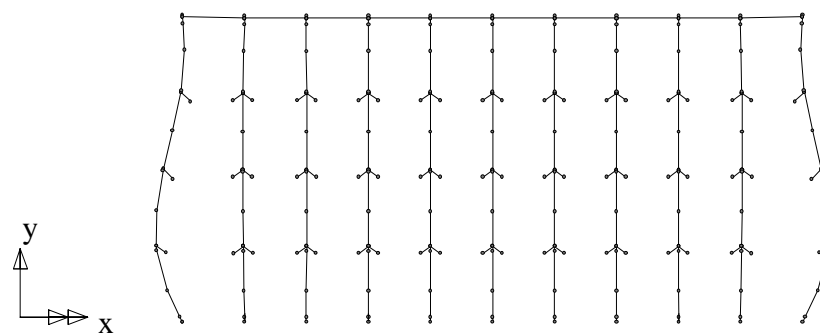
Apresentam-se, a seguir, os resultados dos dois modelos analisados numericamente, considerando-se as ligações como rígidas e semi-rígidas, em termos dos deslocamentos máximos das colunas e também dos braços, considerando-se a influência da rigidez das ligações. Apresenta-se também um estudo analítico relativo à resistência máxima dos elementos de travamento e da coluna, e a comparação com os resultados obtidos numericamente.

### **10.6.1. DESLOCAMENTOS DOS MODELOS**

A figura 10.10, apresenta em vistas frontais as deformadas dos dois modelos de sistemas “drive-in”, utilizando-se um fator de ampliação de 400 vezes. Pode-se observar na figura 10.10 (a), referente ao modelo com ligações rígidas, que o deslocamento dos braços é visivelmente menor que o observado na figura 10.10 (b), que representa o modelo com ligações semi-rígidas.



(a)



(b)

Figura 10.10. Vista frontal da deformada dos modelos com ligações rígidas e semi-rígidas, com um fator de ampliação de 400 vezes: (a) Deformada do modelo com ligações rígidas; (b) Deformada do modelo com ligações semi-rígidas.

Os deslocamentos observados nas figuras 10.10 foram obtidos considerando a estrutura completamente carregada. Observa-se que não há deslocamentos laterais nas colunas internas, pelo equilíbrio proporcionado pelos carregamentos aplicados aos dois braços. Nas colunas externas porém, pela aplicação do carregamento apenas em um de seus lados, há um deslocamento mais acentuado das mesmas influenciando nos deslocamentos totais dos braços externos. Nos braços internos, porém, os deslocamentos não sofrem tais influências pelo equilíbrio de momentos.

A figura 10.11, apresenta painéis em perspectiva dos dois modelos. Observa-se que os maiores deslocamentos estão nas colunas na parte frontal do modelo apresentando menores valores para as colunas mais próximas do contraventamento de fundo. Portanto, a influência do contraventamento de fundo, no comportamento global do sistema é tanto menor quanto maior for a profundidade dos túneis.

No modelo com as ligações rígidas, figura 10.11 (a), o deslocamento máximo na direção global x, foi de 6,51 mm, 0,08% do comprimento total da coluna. No modelo com ligações semi-rígidas, figura 10.11 (b), o deslocamento máxima, foi de 5,54 mm, 0,075% do comprimento total da coluna obtido para as colunas externas.

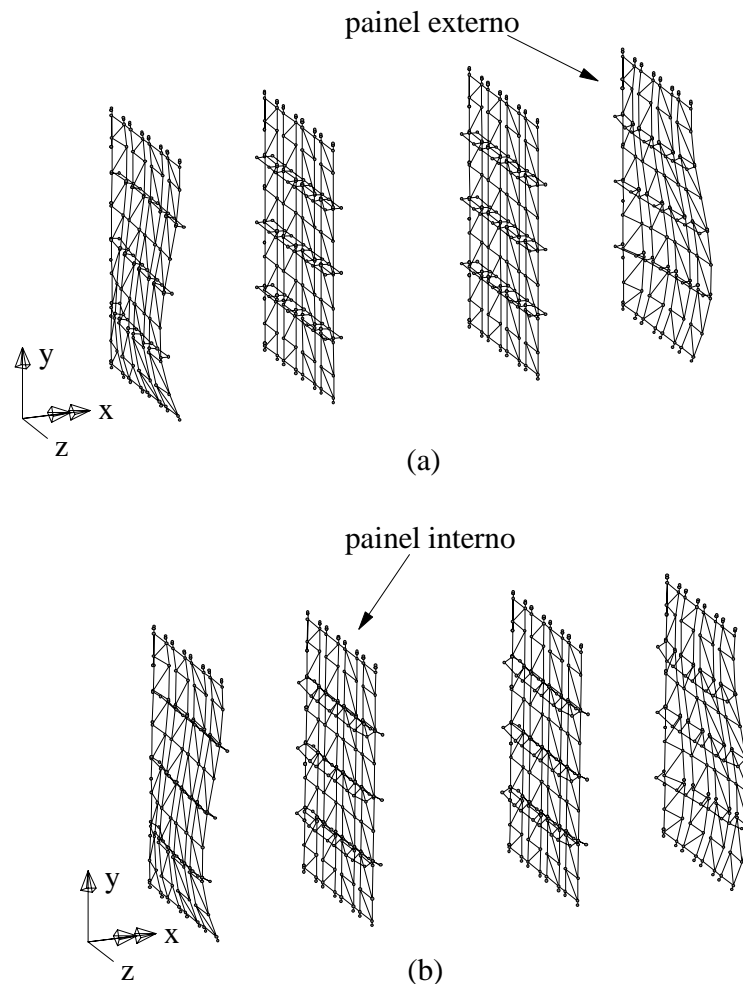


Figura 10.11. Vista de painéis internos e externos dos modelos com ligações rígidas e semi-rígidas: (a) Vista dos painéis com ligações rígidas; (b) Vista dos painéis com ligações semi-rígidas.

O carregamento aplicado na viga do túnel nos modelos é de 0,045 kN/cm. Calculando-se as reações verticais nesta viga, obtém-se a carga concentrada atuante nos braços localizados internamente nos túneis. A reação máxima obtida para os tramos internos da viga de túnel foi de 3,865 kN. Este valor foi adotado como o carregamento atuante nos braços, sendo utilizado para obtenção dos resultados teóricos dos deslocamentos dos braços.

Para uma viga engastada e livre, o deslocamento ( $\delta_r$ ), provocado por uma carga concentrada P, aplicada em sua extremidade livre é igual a:

$$\delta_r = \frac{PL^3}{3EI} \quad (10.1)$$

Onde:

P = reação máxima obtida nos tramos internos das vigas do túnel de valor igual a 3,865 kN.

L = comprimento da viga;

I = momento de inércia da viga.

Considerando-se, o caso semi-rígido, a rigidez F, da mola como apoio de uma viga, com a aplicação de uma carga concentrada, na extremidade livre desta viga, pode-se escrever que o deslocamento ( $\delta_s$ ) é igual a:

$$\delta_s = \frac{PL^2}{F} \quad (10.2)$$

Onde:

F = rigidez da ligação do braço obtida nos ensaios experimentais;

Considerando-se os valores de P = 3,865 kN, E = 20500 kN/cm<sup>2</sup>, o momento de inércia do braço na direção local z, I<sub>zz</sub> = 40,90 cm<sup>4</sup> e o valor de F = 7,387x10<sup>3</sup> kNcm/rad, obtido experimentalmente no ensaio da ligação do braço, calcula-se os valores dos deslocamentos teóricos.

Para os modelos com ligações semi-rígidas e rígidas, foram obtidos os valores dos deslocamentos médios internos dos braços ao longo da viga do túnel, respectivamente  $\delta_{ys}$ , e  $\delta_{yr}$  situada no painel externo e no painel interno.

A tabela 10.3 apresenta os resultados teóricos e numéricos dos deslocamentos nas extremidades dos braços ao longo da viga do túnel nos painéis interno e externo.

Tabela 10.3. Resultados dos deslocamentos dos braços ao longo da viga do túnel, para os modelos com ligações semi-rígidas e ligações rígidas.

	Modelo com ligações semi-rígidas		Modelo com ligações rígidas	
	$\delta_{ys}(\text{mm})$	$\delta_s(\text{mm})$	$\delta_{yr}(\text{mm})$	$\delta_r(\text{mm})$
Externo	3,54	2,79	1,14	0,187
Interno	3,10		0,82	

Observa-se que os deslocamentos obtidos em ambos os modelos atingiram valores maiores que os teóricos, devido à influência dos deslocamentos que ocorreram nas colunas. Para o painel externo a diferença dos resultados teóricos e numéricos é maior que o interno devido à deslocada da coluna. No painel interno, apesar das colunas se encontrarem sem deslocamento lateral, o carregamento imposto nas vigas do túnel às colunas promoveram um deslocamento vertical das mesmas, caracterizando-se na diferença dos resultados teóricos e numéricos apresentados na tabela 10.3.

Para o modelo rígido, em que há a maior diferença entre os resultados teóricos e numéricos, foi feita uma avaliação do encurtamento da coluna que se encontra no painel interno originando em um deslocamento vertical  $\delta_{yc} = 0,652$  mm, sendo portanto o deslocamento real do braço no painel interno igual diferença entre  $\delta_{yr}$  e  $\delta_{yc}$ , ou seja, igual a 0,168 mm. Sendo este valor próximo ao valor teórico apresentado na tabela 10.3 igual a 0,187 mm.

### 10.6.2. SOLICITAÇÕES DOS MODELOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos das solicitações resultantes dos contraventamentos e das colunas dos modelos e a comparação desses resultados com os valores obtidos utilizando-se as recomendações do RMI.

### **10.6.2.1. Contraventamentos**

Para avaliação dos resultados obtidos nos modelos numéricos, quanto à estabilidade e resistência dos componentes, calculou-se a resistência dos travamentos quanto ao esforço normal de tração e compressão, considerando a tensão de escoamento do aço, ( $f_y$ ) especificada pelo fabricante igual a 250 MPa. Foi calculada também a resistência ao momento fletor, em torno do eixo y local, para os contraventamentos em diagonal e para os contraventamentos horizontais, em torno do eixo z local, de acordo com o posicionamento dos eixos locais dos contraventamentos apresentados na tabela 10.2. Como as peças são rotuladas, considerou-se que os comprimentos de flambagem são iguais aos comprimentos dos travamentos.

A tabela 10.4 apresenta as resistências aos esforços normais de tração e compressão e os momentos fletores correspondentes, para os travamentos de maior comprimento situados nos painéis frontal, lateral, de fundo e superior, indicando-se os comprimentos especificados no projeto.

Tabela 10.4. Resistência dos contraventamentos.

PAINÉIS	CONTRAVENTAMENTOS	Resistência				
			Compressão		Tração	
		L(cm)	P <sub>n</sub> (kN)	M <sub>n</sub> (kNcm)*	T <sub>n</sub> (kN)	M <sub>n</sub> (kNcm)*
lateral	diagonal	113	6,354	26,160	43,920	22,930
	horizontal	93	9,381	26,160	43,920	23,660
fundo	diagonal	213	1,788	25,130	43,920	19,900
superior	diagonal	172	2,742	26,150	43,920	21,090
*Momentos fletores resistentes, respectivamente em relação à compressão e tração, em torno do eixo y local para todos os contraventamentos, com exceção do contraventamento horizontal, calculado em torno do eixo z local, de acordo com a tabela 10.2.						



Para comparação dos resultados da resistência das colunas, foram utilizados os valores máximos das solicitações de compressão e tração obtidos nos modelos numéricos com ligações semi-rígidas e rígidas. O momento fletor foi calculado pelo produto do esforços de compressão pela excentricidade de aplicação do carregamento, o qual é aplicado na face externa da alma. Para os esforços de tração foi adotado o mesmo procedimento para o cálculo do momento, considerando-se o produto do esforço de tração pela excentricidade do ponto de aplicação do carregamento.

A tabela 10.5 apresenta os resultados das solicitações de compressão tração e momentos obtidos nos modelos numéricos com ligações semi-rígidas e rígidas.

Tabela 10.5. Solicitações de compressão, tração e momento fletor, obtidos nas análises numéricas de ambos os modelos.

PAINÉIS	CONTRAVENTAMENTOS	Modelo com ligações semi-rígidas				Modelo com ligações rígidas			
		Compressão		Tração		Compressão		Tração	
		$F_{xc}$ (kN)	$M_{fc}$ (kNcm)	$F_{xt}$ (kN)	$M_{ft}$ (kNcm)	$F_{xc}$ (kN)	$M_{fc}$ (kNcm)	$F_{xt}$ (kN)	$M_{ft}$ (kNcm)
lateral	diagonal	1,551	0,865	0,393	0,220	1,802	1,005	0,265	0,148
	horizontal	0,411	0,229	0,599	0,334	0,444	0,247	0,678	0,378
fundo	diagonal	1,770	0,987	0,302	0,168	1,840	1,026	0,298	0,166
superior	diagonal	0,201	0,112	0,074	0,041	0,177	0,099	0,029	0,0163
$F_{xc}$ e $F_{xt}$ = esforços normais de compressão e tração respectivamente, obtidos nos modelos numéricos; $M_{fc}$ e $M_{ft}$ = momentos fletores considerados respectivamente o esforço normal de compressão e tração pela excentricidade de carregamento na extremidade externa da alma.									

Para verificação dos contraventamentos foi utilizada a equação de interação, para atuação conjunta dos esforços axiais e seus momentos fletores respectivos. A tabela 10.6 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 10.6. Verificação dos contraventamentos pelas equações de interação

PAINÉIS	CONTRAVENTAMENTOS	Modelo com ligações semi-rígidas		Modelo com ligações rígidas	
		Equação de interação. (compressão)	Equação de interação (tração)	Equação de interação (compressão)	Equação de interação (tração)
lateral	diagonal	0,277	0,019	0,322	0,013
	horizontal	0,053	0,028	0,057	0,031
fundo	diagonal	<b>1,029</b>	0,015	<b>1,070</b>	0,015
superior	. diagonal	0,078	0,004	0,068	0,001

Observa-se que o contraventamento situado no painel de fundo ultrapassou o limite admissível pela equação de interação para os dois modelos. Observa-se que o maior esforço de compressão ocorre em barras de contraventamento diagonal do painel de fundo (tabela 10.5), para ambos os modelos.

#### **10.6.2.2. Colunas**

Para avaliação da resistência da coluna, foi adotado o procedimento de cálculo recomendado pelo RMI (1997). O esforço normal resistente foi obtido seguindo a metodologia descrita no item 4.2.2, com os resultados experimentais para o fator  $Q = 0,914$ , item 7.3.

Para avaliação dos comprimentos de flambagem dos modelos, foi adotado o procedimento descrito a seguir:

No painel frontal, por questões de simplificação, foi adotado o comprimento  $L = 7360$  mm, com  $K_z$  (coeficiente de flambagem) igual 0,7 na direção do eixo local  $z$  das colunas, para o modelo com ligações rígidas, de acordo com a figura 10.12. Observa-se que este modelo não considera a influência dos contraventamentos laterais na coluna frontal.

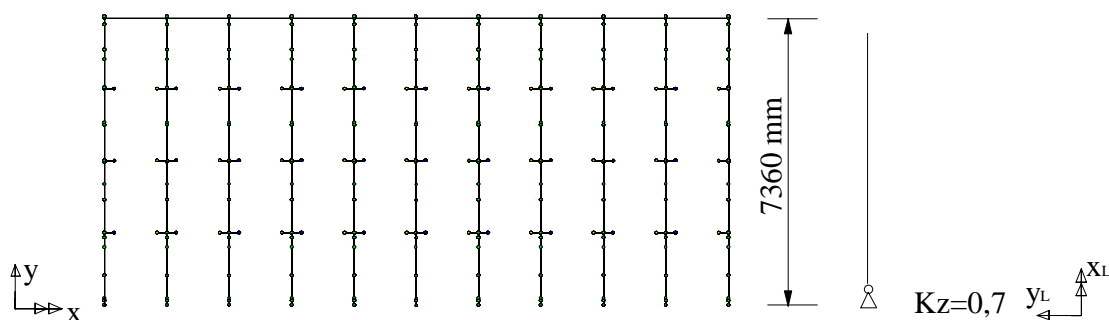


Figura 10.12. Vista frontal do modelo com ligações rígidas com a indicação do comprimento da coluna e coeficientes de flambagem adotado nesta direção.

Para avaliação do coeficiente de flambagem do modelo semi-rígido adotou-se o modelo apresentado na figura 10.13, através do estudo do problema considerando a equação diferencial de equilíbrio da coluna sob esforço de compressão, equação 10.3:

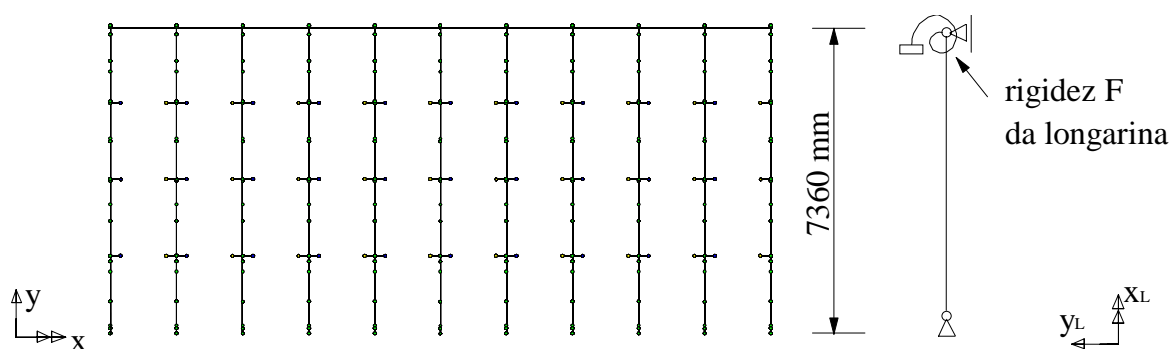


Figura 10.13. Vista frontal do modelo com ligações semi-rígidas com a indicação do comprimento da coluna e coeficientes de flambagem adotados para o cálculo da carga nominal de compressão.

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \mu^2 \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \quad (10.3)$$

sendo:

$$\mu^2 = \frac{P}{EI} \quad (10.3 \text{ (a)})$$

onde:

P = carga axial aplicada na extremidade da coluna;

E = módulo de elasticidade;

$I_{zzc}$  = momento de inércia da coluna;

A solução da equação diferencial de quarta ordem, com as condições de contorno do problema, é dada pela equação 10.4:

$$\tan(\phi) = \frac{\phi}{1 + \lambda \phi^2} \quad (10.4)$$

sendo:

$$\phi = \mu L_c \quad (10.4 (a))$$

$$\lambda = \frac{EI_{zzc}}{F_m L_c} \quad (10.4 (b))$$

onde:

$L_c$  = comprimento da coluna;

$F_m$  = rigidez da longarina obtida por meio de ensaio experimental;

Substituindo na equação 10.4 (b) o valor da rigidez da longarina ( $F_m$ ), obtida experimentalmente igual a  $7,519 \times 10^3$  kNcm/rad; o comprimento da coluna  $L_c = 736$  cm; o momento de inércia da coluna  $I_{zzc} = 44,51$  cm<sup>4</sup> e o módulo de elasticidade  $E = 20500$  kN/cm<sup>2</sup>, tem-se que  $\lambda = 0,165$ .

Levando este parâmetro na equação 10.4, determina-se, de forma gráfica que  $\phi = 3,97$ . Através da equação 10.4 (a) e 10.3 (a), tem-se que a carga crítica,  $P_{cr}$  é igual a:

$$P_{cr} = \frac{1,597\pi^2 EI_{zzc}}{L^2} \quad (10.5)$$

O que resulta em um comprimento equivalente  $L_{eq} = 0,8L_c$ , ou seja, o coeficiente de flambagem  $K = 0,8$ .

Para ambos os modelos, no painel lateral, figura 10.14, adotou-se  $L = 1920$  mm para o comprimento compreendido entre os contraventamentos laterais que restringem a coluna nesta direção, com um coeficiente de flambagem, considerando os eixos locais da coluna,  $K_y = 1$ . Como essas colunas são monossimétricas, pode ocorrer a flambagem por flexo-torção. Nesta avaliação adotou-se o comprimento de flambagem por torção  $K_t = 1$ , para um comprimento  $L = 1920$  mm, valores idênticos aos adotados na direção do painel lateral.

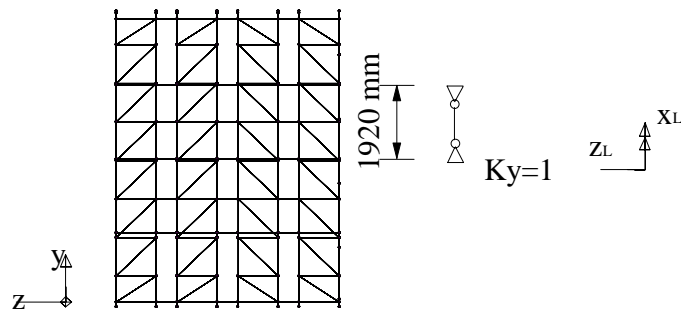


Figura 10.14. Vista lateral dos modelos com indicação dos comprimento da coluna e coeficientes de flambagem adotado nesta direção.

Para cálculo do momento fletor nas colunas, adotou-se procedimento relatado no item 4.2.2, considerando-se as alterações sugeridas pelo RMI, utilizando o fator  $Q$ . O momento atuante na estrutura é em torno dos dois eixos locais, da seção transversal da coluna conforme tabela 10.2.

A tabela 10.7, apresenta a resistência da coluna submetida à compressão e também o seu momento resistente nas direções  $y$  e  $z$  dos eixos locais dos elementos, com as considerações dos comprimentos da coluna para cada painel com seus respectivos coeficientes de flambagem como descrito anteriormente.

Tabela 10.7. Resistência da coluna à compressão e ao momento fletor nas direções y e z locais da seção transversal da coluna.

Resistência					
Modelo Semi-rígido			Modelo Rígido		
$P_n$ (kN)	$M_{nz}$ (kNcm)	$M_{ny}$ (kNcm)	$P_n$ (kN)	$M_{nz}$ (kNcm)	$M_{ny}$ (kNcm)
19,086	264,900	224,900	23,727	264,900	224,900

Na tabela 10.8 apresentam-se os resultados das solicitações obtidos dos modelos numéricos. Foram investigados os nós que apresentavam as máximas solicitações de cada esforço(em negrito) com os demais resultados nos respectivos nós.

Tabela 10.8. Resultados dos esforços máximos de compressão ( $F_{xc}$ ), momento fletor ( $M_{zc}$ ) e momento fletor ( $M_{yc}$ ), das colunas nos modelos com ligações semi-rígidas e ligações rígidas.

	Modelo com ligações semi-rígidas			Modelo com ligações Rígidas		
	$F_{xc}$ (kN)	$M_{zc}$ (kNcm)	$M_{yc}$ (kNcm)	$F_{xc}$ (kN)	$M_{zc}$ (kNcm)	$M_{yc}$ (kNcm)
Máximo esforço de compressão $F_{xc}$	<b>21,200</b>	0	0	<b>20,250</b>	0	0
Máximo esforço de Momento fletor $M_{zc}$	8,218	<b>53,560</b>	1,169	8,636	<b>56,660</b>	1,049
Máximo esforço de momento fletor $M_{yc}$	14,890	7,320	<b>3,974</b>	15,130	9,4950	<b>4,403</b>

A tabela 10.9 apresenta os resultados obtidos utilizando-se a equação de interação, para verificação da combinação de esforços nas colunas. Observando-se os resultados conclui-se que a equação de interação obteve valores menores que a unidade para as combinações de esforços com exceção do esforço normal no modelo com ligações semi-rígidas, igual a 1,11.

Tabela 10.9. Resultados obtidos para as colunas dos modelos semi-rígidos e rígidos utilizando-se a equação de interação.

	<b>Modelo com ligações semi-rígidas</b>	<b>Modelo com ligações rígidas</b>
	<b>Equação de interação (compressão)</b>	<b>Equação de interação (compressão)</b>
Máximo esforço de compressão ( $F_{xc}$ )	<b>1,11</b>	0,853
Máximo esforço de Momento fletor $M_{zc}$	0,554	0,583
Máximo esforço de momento fletor $M_{yc}$	0,673	0,693

É necessário salientar que no dimensionamento empregado, nas considerações dos comprimentos de flambagem para a coluna, não foi considerada a influência dos contraventamentos laterais, o que acarreta em um procedimento de cálculo que deve ser melhor estudado.

## **CAPÍTULO 11**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Os estudos realizados neste trabalho se detiveram na análise de sistemas de armazenagem industriais tipo “drive-in”. As análises foram baseadas em normas existentes em outros países, como por exemplo, as especificações do RMI (1997). No entanto, esta se detém no dimensionamento de sistemas tipo porta palete.

No Brasil não há prescrições de norma sobre os sistemas de armazenagem industriais, sendo portanto necessário o desenvolvimento de estudos nos sistemas utilizados, e de origem nacionais. Neste sentido o sistema “drive-in” analisado neste trabalho é utilizado comercialmente por empresa nacional.

A partir dos estudos desenvolvidos algumas considerações podem se feitas:

Em geral os elementos que compõem o sistema de armazenagem possuem perfurações ao longo de seu comprimento, que visam a rapidez e a eficiência de montagem. Estes elementos usualmente são fabricados em chapa de aço dobrada a frio e a associação das perfurações com as particularidades da análise de perfis de paredes esbeltas levam à dificuldades no dimensionamento da estrutura. Estas dificuldades conduzem a necessidade de estudos teóricos e experimentais para verificação do comportamento da estrutura e dos elementos que a compõem.

O programa experimental desenvolvido para a coluna curta foi baseado nas prescrições do RMI. Os resultados experimentais da carga última, quando comparados com a carga nominal calculada utilizando o fator  $Q$ , apresentaram boa correlação. Assim a utilização daquele fator, que considera a influência das perfurações na capacidade de carga do elemento e é obtido através de ensaios experimentais, é eficiente para obtenção da carga nominal de colunas curtas com perfurações ao longo do seu comprimento.



As ligações utilizadas no sistema “drive-in” são parafusadas e não-parafusadas e possuem um comportamento semi-rígido. O programa experimental desenvolvido constituiu no ensaio de vigas em balanço e foi baseado nas prescrições do RMI.

Foram utilizados dois métodos de análise para determinação da rigidez das ligações a partir dos resultados experimentais, o Método da Inclinação a 50% do Momento Último e o do RMI. Os valores obtidos, para ambos os métodos, mostraram-se bastante semelhantes, divergindo apenas em relação ao cálculo do valor resultante. Essa diferença obtida entre os dois procedimentos foi devido à dispersão entre cada resultado de ensaio. No caso do RMI ao eliminar o menor valor de rigidez obtido nos ensaios, os dois valores restantes apresentaram dispersão entre si, enquanto que no segundo procedimento, em que foi empregado a média aritmética dos valores da rigidez das ligações, esta dispersão foi distribuída. Assim uma melhor avaliação da rigidez resultante das ligações deve empregar um maior número de ensaios.

Na análise numérica da coluna curta, o modelo utilizado conduziu a resultados satisfatórios considerando-se uma análise linear do comportamento das mesmas. Quanto as deformações não foram correspondentes aos modos de colapso observados nos ensaios realizados. Isto pode ser justificado pelas imperfeições existentes nos protótipos ensaiados e que não foram consideradas no modelo numérico. Além disso, as condições de contorno consideradas no modelo não correspondem plenamente as do ensaio, já que no primeiro foi considerado que a placa de apoio foi soldada ao perfil, e no protótipo o perfil foi apenas encostado na placa de apoio.

A análise numérica do sistema “drive-in” foi linear e foram comparados dois modelos: o primeiro com as ligações rígidas e o segundo com as ligações semi-rígidas. No caso deste último foi utilizado a rigidez obtida experimentalmente. Na avaliação comparativa entre os deslocamentos nos dois modelos foram significativos apenas os deslocamentos verticais dos braços, em que foi observado que os valores obtidos no modelo semi-rígido são da ordem de quatro vezes os do modelo rígido. Portanto, o emprego do modelo rígido conduziria a valores subestimados para os deslocamentos.

Quanto às solicitações obtidas nos dois modelos, estas foram comparadas com o valor da resistência do contraventamento de fundo e da coluna, que foram calculadas segundo as prescrições do RMI/AISI. Nos contraventamentos de fundo a resistência nos dois modelos foi menor que a solicitação. Enquanto que nas colunas, o modelo considerando as ligações semi-rígidas tem resistência menor o mesmo não acontecendo com a rígida. No entanto, vale ressaltar que para a determinação da resistência da coluna, segundo as prescrições de norma, no plano frontal não foi considerado o efeito da rigidez das barras do plano lateral. Esta simplificação faz com que mesmo considerando a rigidez real da longarina da extremidade superior, o comprimento de flambagem da coluna não seja o adequado.

Algumas sugestões podem ser citadas para continuidade das pesquisas nesta área.

Para uma maior aproximação entre os modelo numérico e o experimental da coluna curta, é necessário realizar os ensaios experimentais com a placa de apoio da coluna, de tal forma que não seja alterada a condição geométrica inicial da mesma e, no entanto, não seja permitido o deslocamento na sua extremidade, como por exemplo, utilizando apoios a base de resina evitando o uso de solda. Quanto ao modelo numérico a discretização com e sem imperfeições se torna necessário para uma real avaliação da influência das mesmas, além de ser importante o uso de uma análise não-linear do modelo.

Nos modelos do sistema “drive-in” foi considerada a situação em que a estrutura se encontra completamente carregada. Novas avaliações quanto a estabilidade do sistema devem ser realizadas, considerando-se a variação do carregamento da estrutura e também a aplicação de forças horizontais. Estas avaliações podem identificar a situação de carregamento mais desfavorável e ainda possibilitaria uma maior redução de material através da simulação de novas configurações para os contraventamentos.

Para avaliar precisamente o comprimento de flambagem da coluna é necessário estudos teóricos e experimentais em que sejam considerados a influência dos contraventamentos na capacidade de carga da coluna no plano frontal.

Maiores estudos devem ser feitos para a avaliação de outros sistemas de armazenamento também usuais no Brasil, visando inclusive recomendações gerais aos fabricantes dos mesmos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel-Rahman N. e Sivakumaran K. S. (1998). Effective Design Width for Perforated Cold-Formed Steel Compression Members. Canadian Journal Civil Engineering, v. 25 (2) april, p. 319-330.

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

Águia (1999b). Projeto de Sistema de Armazenagem Industrial Tipo “Drive-in”.

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

Anderson, D.; Colson, A. e Jaspart, J. P. (1993). Conections and Frame Design for Economy. New Steel Construction, Oct., p. 30-33.

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

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.

BS 5950 (1985). Structural Use of Steelwork in Building. British Standards Institution Part 1.

BS 5950 (1987) Structural Use of Steelwork in Building. British Standards Institution Part 5.

Davies, J. M. (1992). Down-Aisle Stability of Rack Structures. In Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction. 11<sup>th</sup> International Speciality Conference on Cold-Formed Steel Structures, 20-21 October., p. 106-111, St Louis, MO.

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 (1-4), p. 141-157.

Dexion (1999). [www.dexion.co.uk](http://www.dexion.co.uk) 18/06/99.

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

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

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. (1997). Plastic Design of Pallet Rack Beams. Thin-Walled Structures v. 29 (1-4), p. 175-188.

Isma (2000). Sistemas de Armazenagem”, catálogo, Mogi Mirim, SP.

Jones, S. W.; Kirby, P. A. e Nethercot, D. A. (1983). The Analysis of Frames with Semi-Rigid Connections – A State of the Art Report. Journal of Constructional Steel Research, v. 3, p. 2-13.

Lewis, G. M. (1991). Stability of Rack Structures. Thin-Walled Structures, v. 12 (2), p. 163-174.

Lewis, G. M. (1997). Imperfection Sensitivity of Structures with Semi-Rigid Joints. Thin-Walled Structures, v. 27 (2), p. 187-201.

LUSAS Finite Element System Version 13. (1999a). LUSAS Element Library, FEA Ltd., UK.

LUSAS Finite Element System Version 13. (1999b). LUSAS Modeller User Manual, FEA Ltd., UK.

Markazi, F. D.; Beale R. G. e Godley M. H. R. (1997). Experimental Analysis of Semi-Rigid Boltless Connectors. Thin-Walled Structures, v 28, p. 55-87.

Moll, R. e Rossbach, R. (1984). Entwicklung auf dem Gebiet der Lagertechnik Neueste Erkenntnisse aufgezeigt am Beispiel der Pallettenregals. Fach handbuck für Lagertechnik um Betriebseinrichtungen bei, v. 5, p. 127-136.

Ortiz-Colberg, R. e Pekoz, T. B. (1981). Load Carrying Capacity of Perforated Cold-Formed Steel Columns. Research Report N° 81-12, Cornell University, Ithaca, NY.

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

Parmatec (2000b). Conheça nossos produtos e aumente sua lucratividade- Uma empresa de logística, catálogo, Guarulhos, SP.

Peköz T. (1975). Pallet Rack Test Results. Department of Structural Engineering Report. Cornell University, September.

Peköz T. (1978a). Interpretation of Pallet Rack Test Result. Report for the Rack Manufacturers Institute, Charlotte, NC, February.

Peköz T. (1978b). Pallet Rack Design Criteria. Report for the Rack Manufacturers Institute, Charlotte, NC, February.

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 Washington, DC.

Peköz, T. (1988). Design of Perforated Cold Formed Steel Columns. 9<sup>th</sup> International Specialty Conference Cold-formed Steel Structures, November , St Louis, MO.

Peköz, T. (1992). A Design Approach for Semi-Rigid Connections in Cold-Formed Steels Industrial Racks. Connections in Steel Structures II: Behaviour, Strenght and Design. 2<sup>nd</sup> International Workshop, 10-12 April, p. 106-11, Pittisburgh, PA.

Redirack (1999). [www.redirack.co.uk](http://www.redirack.co.uk). 18/06/1999.

Rhodes, J. e Schneider, F. D. (1994). The Compressional Behaviour of Perforated Elements. Twelfth International Speciality Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, MO.

Rhodes, J. e MacDonald, M. (1996). The Effects of Perforation Length on the Behaviour of Perforated Elements in Compression. Thirteenth International Speciality Conference on Cold-Formed Steel Structures, St Louis, MO.

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

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

Sofima-Indusa (2000a). Sistemas Integrados de Estocagem-1", catálogo, São Paulo, SP.

Sofima-Indusa (2000b). "Estanteria Pesada; Arquivos; Pallets-ups; Mezaninos; Porta-pallets; Cantilevers; Patamares", catálogo, São Paulo, SP.

Stark, J. W. B. e Tilburgs, C. J. (1978). European Research on Pallet, Drive-in and Drive-through Racking. Fourth International Speciality Conference. University of Missouri-Rolla.

Stark, J. W. B. e Tilburgs, C. J. (1979). Frame Instability of Unbraced Pallet Racks. International Conference on Thin-Walled Structures, ed. Rhodes & A. C. Walker, p.160-185, University of Strathclyde.

Steel King (1999a). Steel King Pallet Rack. [www.steelking.com](http://www.steelking.com). 28/04/99

Steel King (1999b). Steel King Pallet Rack Online User's Manual. [www.steelking.com/usersmanuals/prackmanual.htm](http://www.steelking.com/usersmanuals/prackmanual.htm) 28/04/99.

Tomà, A.; Sedlacek, G.; Weynand, K. (1993). Connections in Cold-Formed Steel. Thin-Walled Structures, v. 16, p. 219-37.

Yu, W.-W. (1991). Cold Formed Steel Design. John Wiley & Sons. Inc, Second Edition, Missouri.

## **Anexo I**

### **Projeto do sistema de armazenagem “drive-in” (Empresa Águia Sistemas de Armazenagem)**

Folha1/2: Layout/Vistas;

Folha 2/2: Detalhamento.