

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FERNANDA SIMÕES RIBEIRO

**Análise Teórico-Experimental de Colunas Curtas em
Perfis Formados a Frio de Seção Transversal tipo *Rack***

Vitória
2006

FERNANDA SIMÕES RIBEIRO

Análise Teórico-Experimental de Colunas Curtas em Perfis Formados a Frio de Seção Transversal tipo *Rack*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientadores:

Prof. Dr. Walnório Graça Ferreira

Prof^a. Dra. Arlene M^a Sarmanho Freitas

Vitória
2006

ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE COLUNAS CURTAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO DE SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO *RACK*

Fernanda Simões Ribeiro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 19/06/06 por:

Prof^o. Dr^o. Walnório Graça Ferreira
Orientador – Dept^o. Eng. Civil - UFES

Prof^a. Dr^a. Arlene Maria Sarmanho Freitas
Co-orientadora – Dept^o. Eng. Civil - UFOP

Prof^o. Dr^o. Eduardo de Mirando Batista
Examinador Externo - UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória-ES, junho de 2006.

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

R484a Ribeiro, Fernanda Simões, 1980-
Análise teórico-experimental de colunas curtas em perfis formados a frio de seção transversal tipo rack / Fernanda Simões Ribeiro. – 2006.
135 f. : il.

Orientador: Walnório Graça Ferreira.
Co-Orientadora: Arlene Maria Sarmanho Freitas.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Estruturas metálicas. 2. Colunas metálicas. 3. Deformações e tensões. 4. Sistemas racks. I. Ferreira, Walnório Graça. II. Freitas, Arlene Maria Sarmanho. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

Agradeço a Deus e a todos aqueles que, de alguma forma,
contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

AGRADECIMENTOS

- A Deus por ter me concedido o dom da vida;
- Ao meu filho, Guilherme, que nem nasceu e já é a maior alegria de minha vida;
- Ao Fabiano pelo amor, carinho e incentivo para que seguisse até o final;
- A meus pais e minhas irmãs, pelo apoio e compreensão de sempre;
- Ao Gabriel, sinônimo de felicidade para toda família;
- Aos professores Walnório e Arlene, pela orientação e por compartilharem conhecimentos adquiridos ao longo de suas vidas;
- Aos amigos do mestrado da UFES: Carina, Marita, Macksuel, Márcia e Marcelo, pelos momentos de descontração;
- Aos amigos da UFOP: Mônica, Fabiano (Abel), Flávio de Souza, Paulo, Kátia, José Maria, Flávio e Deilton, por fazerem do período em Ouro Preto mais feliz;
- Aos secretários do mestrado da UFES, Andréa e Wilton, pela prontidão em ajudar e atender;
- Ao presidente da FINDES, Lucas Izoton, aos funcionários do Serviço Nacional da Indústria, SENAI/ES, e ao técnico do curso de Engenharia Mecânica, Manoel Gregório, pelo serviço de acabamento nos protótipos;
- Aos professores Fernando Lordêllo e Fernando Avancini, por concederem o espaço do Laboratório de Materiais da UFES, e aos funcionários: Roger, Márcio e Carlos, por não terem medido esforços para auxiliar na execução dos ensaios experimentais;
- A todos que de alguma maneira contribuíram para que esse trabalho pudesse ser realizado;
- Ao Nexem, pelo apoio financeiro;
- A Águia Sistemas de Armazenagem Industrial, por cederem o material para realização dos ensaios experimentais.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	18
1.1 Considerações Gerais	18
1.2 Prescrições existentes	19
1.3 Estudos realizados	20
1.4 Objetivos e descrição do trabalho.....	24
CAPÍTULO 2 – OS SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL.....	25
2.1 Introdução.....	25
2.2 Histórico	26
2.3 Tipos de sistemas de armazenagem industrial.....	27
2.4 Sistemas estáticos	29
2.5 Sistemas dinâmicos	35
CAPÍTULO 3 – ELEMENTOS DOS SISTEMAS RACKS	39
3.1 Introdução.....	39
3.2 Colunas	40
3.3 Vigas.....	41
3.4 Sistemas de contraventamento.....	45
3.5 Distanciadores	47
3.6 Placas de base	48
3.7 Elementos de proteção.....	49

3.8 Ligações.....	50
3.9 Estabilidade	52
3.10 Integridade dos sistemas <i>racks</i>	53
CAPÍTULO 4 - COLUNAS	55
4.1 Introdução.....	55
4.2 Recomendações do RMI e AISI.....	55
4.3 Formulação proposta por Sarawit e Peköz	59
4.4 Prescrições indicadas pela norma brasileira de perfis formados a frio – NBR 14762	62
4.4.1 Flambagem por flexão, torção ou flexo-torção	62
4.4.2 Flambagem distorcional	64
4.5 Proposição para aplicação da NBR 14762 em elementos perfurados	65
CAPÍTULO 5 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	66
5.1 Introdução.....	66
5.2 Características geométricas das colunas.....	66
5.3 Quantidade e comprimentos dos protótipos	67
5.4 Identificação dos protótipos.....	69
5.5 Imperfeições geométricas	70
5.6 Análise pelo método dos elementos finitos	73
5.7 Instrumentação.....	75
5.8 Sistema de aplicação de carga e aquisição de dados	77
5.9 Metodologia.....	79
5.10 Ensaio de caracterização do aço	81
CAPÍTULO 6 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	84
6.1 Introdução.....	84
6.2 Dimensões geométricas das seções	84

6.3 Avaliação da carga última (P_u)	89
6.4 Avaliação do fator redutor de forma (Q)	95
6.5 Avaliação da área da seção transversal.....	96
6.6 Avaliação da carga nominal axial (P_n).....	101
6.6.1 Colunas sem furos	101
6.6.2 Colunas com furos.....	105
6.7 Avaliação das deformações	108
6.7.1 Seção tipo midi.....	108
6.7.2 Seção tipo maxi	115
6.7.3 Seção tipo super maxi	121
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES	127
CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130

LISTA DE SÍMBOLOS

Capítulo 04

P_n : carga nominal axial;

A_e : área efetiva;

F_n : tensão nominal de flambagem, obtida considerando-se as propriedades da área bruta;

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

f_{ya} : tensão de escoamento, obtida através do ensaio de caracterização do aço;

$A_{net,min}$: área líquida mínima, referente ao plano da seção transversal que intercepta o maior número de furos;

P_{ua} : carga última média, obtida através do ensaio da coluna curta;

Q_{min} : fator redutor de carga para espessura mínima;

Q_{max} : fator redutor de carga para espessura máxima;

t : espessura da chapa;

f_y : tensão de escoamento do aço;

P_y : carga de escoamento;

ρ : coeficiente que leva em consideração a flambagem global;

α : fator que considera a influência das tensões residuais;

λ_0 : índice de esbeltez reduzido para barras submetidas a compressão;

N_{ex} : força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo x ;

N_{et} : força normal de flambagem elástica por torção;

I_x : momento de inércia em relação ao eixo x ;

I_y : momento de inércia em relação ao eixo y ;

I_t : momento de inércia à torção uniforme;

$K_x L_x$: comprimento de flambagem em relação ao eixo x ;

$K_y L_y$: comprimento de flambagem em relação ao eixo y ;

$K_t L_t$: comprimento de flambagem por torção;

C_w : constante de empenamento;

E : módulo de elasticidade;

G : módulo de elasticidade transversal;

r_0 : raio de giração polar em relação ao centro de torção;

x_0 : coordenada do centro de torção na direção do eixo x ;

$P_{n,dist}$: carga axial nominal considerando a flambagem distorcional;

A: área bruta da seção transversal;

λ_{dist} : índice de esbeltez reduzido referente à flambagem distorcional;

Capítulo 06

P_u : carga última de ruptura;

P_{uc} : carga última média dos ensaios das colunas com furos;

P_{us} : carga última média dos ensaios das colunas sem furos;

f_{ya} : tensão de escoamento, obtida através do ensaio de caracterização do aço;

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

$A_{\text{net,min}}$: área líquida mínima, referente ao plano da seção transversal que intercepta o maior número de furos;

$A_{e,\text{RMI}}$: área efetiva, calculada segundo RMI (1997);

$A_{e,\text{S}}$: área efetiva, calculada segundo Sarawit e Peköz (2003);

$A_{e,\text{AISI}}$: área efetiva, calculada segundo AISI (1996);

$A_{e,\text{NBR}}$: área efetiva, calculada segundo NBR14762 (2001);

$\lambda_{p,\text{alma}}$: esbeltez da alma;

P_n : carga nominal axial;

$P_{n,\text{NBR}}$: carga nominal axial, calculada de acordo com NBR 14762 (2001);

$P_{n,\text{AISI}}$: carga nominal axial, calculada de acordo com AISI (1996);

P_y : cargas correspondentes ao início do escoamento do aço;

ϵ_y : deformação correspondente ao início do escoamento do perfil;

$P_{n,\text{RMI}}$: carga nominal axial, calculada de acordo com RMI (1997);

$P_{n,\text{S}}$: carga nominal axial, calculada de acordo com Sarawit e Peköz (2003).

Capítulo 07

Q: fator redutor de forma, obtido através do ensaio da coluna curta.

LISTA DE TABELAS

Capítulo 04

Tabela 4.1 – Espessuras (t) das colunas analisadas por Sarawit e Peköz (2003).	61
--	----

Capítulo 05

Tabela 5.1 – Dimensões nominais das seções tipo <i>midi</i> , <i>maxi</i> e <i>super maxi</i>	67
Tabela 5.2 – Quantidade dos protótipos analisados.	69
Tabela 5.3 – Características dos elementos.	74
Tabela 5.4 – Taxa de incremento de carga.	80
Tabela 5.5 – Valores médios encontrados para f_y , f_u e a	82
Tabela 5.6 – Tipos de aço especificados pelo fabricante.	82

Capítulo 06

Tabela 6.1 – Valores médios das medidas reais das seções tipo <i>midi</i>	85
Tabela 6.2 – Valores médios das medidas reais das seções tipo <i>maxi</i>	86
Tabela 6.3 – Valores médios das medidas reais das seções tipo <i>super maxi</i>	87
Tabela 6.4 – Valores obtidos nos ensaios de colunas com seção tipo <i>midi</i>	89
Tabela 6.5 – Valores obtidos nos ensaios de colunas com seção tipo <i>maxi</i>	90
Tabela 6.6 – Valores obtidos nos ensaios de colunas com seção tipo <i>super maxi</i>	91
Tabela 6.7 – Valores de Q e $A_{net,min}$	95
Tabela 6.8 – Valores da área efetiva e esbeltez da alma para seções tipo <i>midi</i>	97
Tabela 6.9 – Valores da área efetiva e esbeltez da alma para seções tipo <i>maxi</i>	97
Tabela 6.10 – Valores da área efetiva e esbeltez da alma para seções tipo <i>super maxi</i>	98
Tabela 6.11 – Cargas nominais das colunas sem furos analisadas.	102
Tabela 6.12 – Cargas nominais das colunas com furos analisadas.	106
Tabela 6.13 – Cargas nominais e de escoamento para seções tipo <i>midi</i> instrumentadas.	109
Tabela 6.14 – Cargas nominais e de escoamento para seções <i>maxi</i> instrumentadas.	115
Tabela 6.15 - Cargas nominais e de escoamento para seções <i>super maxi</i> instrumentadas.	121

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 01

Figura 1.1 – Sistema do tipo <i>porta-pallets</i> em operação, Isma (2004).	18
Figura 1.2 – Detalhe das ligações dos sistemas <i>racks</i> , Águia (2005).....	19
Figura 2.1 – Sistemas de armazenagem industrial autoportante,	25
Figura 2.2 – Seções transversais comumente utilizadas para colunas dos sistemas <i>racks</i>	31
Figura 2.3 – Produtos apoiado diretamente no <i>rack</i> , (Águia, 2005).	27
Figura 2.4 – Tipos de paletes: a) de madeira; b) metálico,.....	28
Figura 2.5 – Foto de produtos armazenados em contêiner metálico.	28
Figura 2.6 – Foto da movimentação de carga no sistema tipo <i>porta-pallets</i> ,.....	29
Figura 2.7 – Vista esquemática do sistema tipo <i>porta-pallets</i> : a) movimentação das empilhadeiras; b) vista esquemática tridimensional (Bertolini, 2004)......	30
Figura 2.8 - Foto da movimentação de carga feita por meio de transelevadores no	31
Figura 2.9 - Foto de edificação com vedação fixada diretamente na	31
Figura 2.10 – Estrutura do sistema <i>porta-pallets deslizante</i> ,	32
Figura 2.11 - Sistemas <i>drive-in</i> : (a) Vista superior esquematizada;.....	33
Figura 2.12 - Vista esquemática da operação do sistema <i>drive-through</i>	34
Figura 2.13 – Foto de um sistema tipo <i>cantilever</i> , (Águia, 2005).....	35
Figura 2.14 - Foto do conjunto de rolos utilizados na movimentação dos paletes no.....	36
Figura 2.15 - Vista esquemática do sistema de armazenagem dinâmica,.....	36
Figura 2.16 - Sistema <i>push-back</i> : (a) Foto do sistema de trilhos utilizados na movimentação interna da carga; (b) Foto do sistema em operação, (Águia, 2005).....	37
Figura 2.17 - Foto da estrutura do sistema <i>flow-rack</i> , (Isma, 2004).....	38
Figura 2.18 - Foto do sistema de rodas sobre trilhos, (Sofima, 2004).....	38
Figura 3.1 – Elementos do sistema tipo <i>cantilever</i> (Movsan, 2005).	39
Figura 3.2 – Elementos do sistema tipo <i>drive-in</i> (Movsan, 2005).	40
Figura 3.3 – Perfil <i>rack</i> ou <i>garrafa</i> com flanges de ligação que permitem a fixação dos elementos de contraventamento.....	41
Figura 3.4 – Perfil U enrijecido com cantoneiras adicionais para ligação dos elementos de contraventamento.....	41
Figura 3.5 – Seções transversais mais aplicadas em vigas dos sistemas <i>porta-pallets</i> :	41
Figura 3.6 – Configurações comumente utilizadas nos sistemas <i>porta-pallets</i> :	42

Figura 3.7 – Esquema das posições do braço e da viga de túnel.....	43
Figura 3.8 – Longarina com garras para encaixe das ligações.....	43
Figura 3.9 – Configuração do armazenamento de paletes no sistema.....	44
Figura 3.10 – Vigas e conjunto de rolos do sistema de armazenagem dinâmica,	44
Figura 3.11 – Sistemas <i>cantilever</i> : (a) com braço simples; (b) com braço duplo,	45
Figura 3.12 - Sistema <i>porta-pallets</i> : esquema dos planos de contraventamento laterais,.....	46
Figura 3.13 – Esquema do sistema tipo <i>drive-in</i> com planos de contraventamento nas laterais, 46	
Figura 3.14 – Vista esquemática de um sistema <i>cantilever</i> com plano de	47
Figura 3.15 – Foto do posicionamento do distanciador de colunas.....	48
Figura 3.16 – Foto da placa de base parafusada no piso.	48
Figura 3.17 – Foto do elemento de proteção de colunas.	49
Figura 3.18 – Elementos de proteção: a) barra horizontal de proteção (<i>guard-rail</i>);.....	50
Figura 3.19 – Detalhe de ligações feitas por meio de parafusos,	50
Figura 3.20 – Foto da ligação por meio de garra dentada com detalhe.....	51
Figura 3.21 – Elementos que compõe o sistema <i>porta-pallets</i> , (Águia, 2005b).	51
Figura 3.22 – Esquema da elevação frontal e lateral do sistema <i>porta-pallets</i>	52
Figura 3.23 – Vista esquemática de um sistema <i>drive-in</i> com longarinas nas	53
Figura 3.24 – Elementos de estabilização do sistema <i>cantilever</i> ,	53
Figura 4.1 – Comprimento mínimo da coluna curta para diferentes configurações.....	58
Figura 4.2 – Esquema de montagem do ensaio da coluna curta.....	59
Figura 4.3 – Dimensões, em milímetros, da coluna utilizada no estudo,	60
Figura 4.4 – Correlação entre a equação indicada pelo RMI e a.....	61
Figura 4.5 – Correlação entre a nova formulação proposta por Peköz e Sarawit e a.....	62
Figura 4.6 – Eixos principais da seção tipo <i>rack</i>	63
Figura 5.1 – Elementos que compõe as seções tipo <i>rack</i> ou <i>garrafa</i>	66
Figura 5.2 – Nomenclatura adotada para identificação das dimensões.	67
Figura 5.3 – Comprimento dos protótipos com e sem furos:	68
Figura 5.4 – Exemplo da nomenclatura adotada para os protótipos.....	69
Figura 5.5 - Nomenclatura usada no controle dimensional: a) posições d_1 , d_2 e d_3 ;.....	71
Figura 5.6 – Exemplo do controle dimensional feito nos protótipos.....	72
Figura 5.7 – Malha utilizada na análise pelo método dos elementos finitos: a) vista frontal; b) vista posterior; c) vista lateral.....	73
Figura 5.8 – Distribuição das tensões de Von Mises obtidas na análise	75
Figura 5.9 – Posicionamento dos extensômetros nas colunas <i>midi</i> e <i>maxi</i> com furos:	76

Figura 5.10 - Posicionamento dos extensômetros nas <i>super maxi</i> com furos:	76
Figura 5.11 - Posicionamento dos extensômetros nas colunas <i>midi</i> , <i>maxi</i> e <i>super maxi</i>	77
Figura 5.12 – Foto do equipamento utilizado na aplicação de carga.	78
Figura 5.13 – Vista esquemática da montagem do ensaio.....	78
Figura 5.14 – Vista esquemática do <i>Spider</i> (HBM, 2003).	79
Figura 5.15 – Indicação da seção transversal correspondente a área líquida mínima ($A_{net,mín}$)	80
Figura 5.16 – Nomenclatura utilizada na geometria dos corpos de prova para o.....	81
Figura 5.17 – Posição de retirada dos corpos de prova: a) colunas com furos;.....	81
Figura 6.1 – Nomenclatura para identificação das dimensões.	84
Figura 6.2 – Fotos das colunas <i>midi</i> 2,00mm após realização dos ensaios:	92
Figura 6.3 – Fotos das colunas <i>midi</i> 2,25 mm após realização dos ensaios:	92
Figura 6.4 – Fotos das colunas <i>maxi</i> 2,00mm após realização dos ensaios:	92
Figura 6.5 – Fotos das colunas <i>maxi</i> 2,25mm após realização dos ensaios:	93
Figura 6.6 – Fotos das colunas <i>maxi</i> 2,65mm após realização dos ensaios:	93
Figura 6.7 – Fotos das colunas <i>super maxi</i> 2,00mm após realização dos ensaios:	93
Figura 6.8 – Fotos das colunas <i>super maxi</i> 2,25mm após realização dos ensaios:	94
Figura 6.9 – Fotos das colunas <i>super maxi</i> 2,65mm após realização dos ensaios:	94
Figura 6.10 – Fotos das colunas <i>super maxi</i> 3,00mm após realização dos ensaios:	94
Figura 6.11 – Gráfico Q x t.....	92
Figura 6.12 – Gráfico das áreas calculadas para colunas com furos.	100
Figura 6.13 – Gráfico das cargas nominal e última para protótipos sem furos.	104
Figura 6.14 – Gráfico das cargas nominais e últimas para protótipos com furos.....	107
Figura 6.15 – Gráfico das cargas nominais e de escoamento das colunas <i>midi</i> com furos. ...	110
Figura 6.16 – Gráfico das cargas nominais e de escoamento das colunas <i>midi</i> sem furos.....	111
Figura 6.17 – Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna MI1C3.....	112
Figura 6.18 – Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna MI2C6.....	113
Figura 6.19 – Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna MI1S1.....	114
Figura 6.20 – Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna MI2S5.....	114
Figura 6.21 – Gráfico das cargas nominais e de escoamento das colunas <i>maxi</i> com furos. ..	116
Figura 6.22 – Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna MA1C4.....	117
Figura 6.23 – Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna MA2C1.....	117
Figura 6.24 – Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna MA3C4.....	118
Figura 6.25 – Gráfico das cargas nominais e de escoamento das colunas <i>maxi</i> sem furos....	119
Figura 6.26 – Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna MA1S2.....	120

Figura 6.27 – Gráfico Carga x Deformação da coluna MA3S4.....	120
Figura 6.28 – Gráfico das cargas nominais e de escoamento das colunas tipo	122
Figura 6.29 - Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna SM1S3.....	123
Figura 6.30 - Gráfico Carga x Deformação da coluna SM2S2.....	123
Figura 6.31 - Gráfico Carga x Deformação da coluna SM3S3.....	124
Figura 6.32 - Gráfico Carga x Deformação da coluna SM4S1.....	124
Figura 6.33 - Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna SM1C4.	125
Figura 6.34 - Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna SM2C4.	125
Figura 6.35 - Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna SM3C3.	126
Figura 6.36 - Gráfico <i>Carga x Deformação</i> da coluna SM4C1.	126

RESUMO

A facilidade de montagem, a versatilidade de uso e a variedade de modelos fizeram com que os sistemas de armazenagem industrial conquistassem significativo espaço no mercado nacional de armazenagem e estocagem de materiais. Mais conhecidos como *racks*, a maioria desses sistemas são constituídos por perfis formados a frio e o encaixe entre as peças é feito através de ligações semi-rígidas, parafusadas ou não-parafusadas. Geralmente suas colunas têm seção transversal aberta e possuem diversas perfurações que facilitam os encaixes das ligações com os demais elementos do sistema.

As normas existentes para dimensionamento de perfis formados a frio não se aplicam a essas estruturas por diversos fatores, tais como: verificação da estabilidade global do sistema, deformações construtivas, solicitações horizontais e verticais impostas acidentalmente pelos equipamentos de transporte e a influência das perfurações na capacidade de carga das colunas. Essas particularidades fizeram com que alguns fabricantes desenvolvessem procedimentos para verificação estrutural desses elementos. A “Storage Equipment Manufacturers’ Association”, SEMA (1980), o “Rack Manufacturers Institute”, RMI (1997) e a “Federation Européenne de la Manutention”, FEM (1996), respectivamente empregados na Inglaterra, Estados Unidos e Europa, são exemplos de especificações desenvolvidas para o dimensionamento dos sistemas de armazenagem industriais.

Neste trabalho foram realizadas análises experimentais em colunas curtas com seção tipo *rack* de diferentes espessuras, com e sem furos, de modo a avaliar a influência das perfurações na capacidade de carga e nas deformações sofridas durante os ensaios.

Os resultados experimentais das colunas com furos foram comparados com as prescrições do RMI e a formulação proposta por Sarawit e Peköz (2003). Já para as colunas sem furos, a comparação foi feita com as prescrições indicadas pela norma americana e pela norma brasileira de dimensionamento de perfis formados a frio. Finalmente, é proposta uma formulação para aplicar as recomendações da NBR 14762 às colunas com furos, utilizando o método indicado pelo RMI para o cálculo da área efetiva.

ABSTRACT

The assembly facility, flexibility and diversity had made with that the storage racks systems to be widely used in Brazil. These systems normally consist of cold-formed steel members, and the connections of these are made by semi-rigid links, with bolts or not. Its columns are usually open thin walled perforated to accept the rabbet with other members.

The design codes of cold-formed steel structures do not could be apply for racks systems for several reasons: verification of global stability, effect of the out-of-plumbness, horizontal and vertical imposed accidentally by transport equipments and the influence of perforations in the columns load capacity. Due these particularities, some manufactures have developed specific procedures for structural verification and design of these systems. The Storage Equipment Manufactures Association (SEMA, England, 1980), the Rack Manufactures Institute (RMI, USA, 1997) and Federation Européene de la Manutetion (FEM, 1996), applied in England, United States and Europe, respectively, are examples of specification developed for design of racks.

In this work, experimental analysis in short columns with section had been carried through *rack* sections with different thicknesses, with and without holes, in order to evaluate the influence of the perforations in the load capacity and the deformations suffer during the test.

The experimental results of perforated columns had been compared with RMI procedure and the proposed equation by Sarawit and Peköz (2003). Already for columns without holes, the association was made between the American and Brazilian codes for cold-formed steel structures. And, finally, is considered a new formulation to apply the NBR 14762 to perforated columns, using the effective area design by RMI.

1.1 Considerações Gerais

Os sistemas de armazenagem industrial são estruturas amplamente utilizadas em depósitos e armazéns comerciais e industriais. Também conhecidos como *racks*, estão disponíveis em diversos tipos, variando desde pequenas estantes carregadas manualmente até sistemas automatizados que chegam a atingir 30 metros de altura. Conhecendo as necessidades do cliente, o sistema deve ser projetado de maneira a atender eficientemente a estocagem de produtos, permitindo o acesso dos mesmos (Godley, 2001).

A variedade de opções, aliada a facilidade e rapidez de montagem, fizeram com que os sistemas *racks* conquistassem significativo espaço no mercado brasileiro de estocagem e movimentação de produtos. A Figura 1.1 ilustra um destes sistemas em operação.



Figura 1.1 – Sistema do tipo *porta-pallets* em operação, Isma (2004).

Geralmente os sistemas de armazenagem industrial são compostos por perfis formados a frio e o encaixe entre seus elementos é feito por meio de ligações semi-rígidas, parafusadas, soldadas ou conectadas por sistema de encaixe (Figura 1.2). As seções transversais utilizadas nos diversos elementos que compõem os *racks* são de tipologias variadas, como por exemplo:

U enrijecido, caixa e a seção tipo *rack* ou *garrafa*, que foi inicialmente desenvolvida para estes sistemas. As colunas apresentam perfurações ao longo de seu comprimento que facilitam o encaixe das ligações e influenciam significativamente o seu comportamento estrutural. A variedade de tamanhos e configurações destes furos dificulta a avaliação teórica da resistência das colunas, sendo indicado, inclusive por prescrições de normas, como será apresentado posteriormente, o uso de análises experimentais para cálculo da capacidade de carga destes elementos estruturais.



Figura 1.2 – Detalhe das ligações dos sistemas *racks*, Águia (2005).

Quanto à estabilidade do sistema, devem ser consideradas as imperfeições iniciais quando a estrutura é instalada fora do prumo e os impactos acidentais de empilhadeiras durante a operação. Também deve ser verificada a influência das ligações semi-rígidas, inclusive das ligações entre colunas e placas de base, além do uso de contraventamentos.

1.2 Prescrições existentes

Por serem compostos por perfis formados a frio, os sistemas *racks* utilizam para avaliação de seus elementos que se enquadram nesta categoria, as normas existentes para os mesmos. No entanto, as considerações particulares, como os furos, carregamentos e etc. são previstas em prescrições adicionais e específicas que foram propostas por associações de fabricantes destes sistemas.

Nos Estados Unidos, são utilizadas as indicações do *Rack Manufacturers Institute* (RMI, 1997), aplicadas em conjunto com a norma de dimensionamento de perfis formados a frio do *American Iron and Steel Institute* (AISI, 1996).

Nos países europeus, a avaliação do comportamento estrutural dos sistemas *racks* é feita de acordo com as recomendações da *Federation Européenne de la Manutention* – (FEM, 1997) utilizada em paralelo com a norma de dimensionamento de estruturas de aço, Eurocode 3 (2005).

Na Inglaterra são empregadas as prescrições desenvolvidas pela *Storage Equipment Manufactures' Association* – (SEMA, 1980), paralelamente com a norma britânica BS-499 (1969), (1975).

Na Austrália, são aplicadas as especificações do *Australian Steel Storage Racking Standard* AS 4084 (1993) que é similar ao RMI (1990), com modificações relativas a combinação de cargas, tolerâncias e folgas, descritas conforme a FEM (1986).

No Brasil, tem-se o conjunto de recomendações *Especificação para projeto, testes e utilização de Sistemas de Armazenagem*, elaborado pela Associação Brasileira de Movimentação e Logística, ABML (2001), com base no RMI (1997) e no AISI (1991). No entanto, as empresas brasileiras, de um modo geral, utilizam procedimentos próprios para a fabricação e montagem destes sistemas.

1.3 Estudos realizados

As especificações do RMI, SEMA, FEM e AS 4084 basearam-se em diversas pesquisas que foram desenvolvidas sobre o comportamento dos sistemas de armazenagem industrial. A seguir, são citados alguns trabalhos que contribuíram para elaboração destas prescrições, e outros que vem sendo desenvolvidos a fim de melhorar os procedimentos de dimensionamento dos sistemas *racks*.

Godley (1991) fez uma apresentação dos principais tipos dos sistemas *racks* e apresentou um histórico da evolução destes sistemas, dando ênfase às modificações sofridas pelas seções das colunas e pelos encaixes das ligações. Baseado nas especificações do SEMA e FEM, fez também um roteiro para dimensionamento de colunas, vigas e avaliação da estabilidade global.

Kesti e Davies (1999) avaliaram as prescrições do Eurocode 3 para dimensionamento de colunas curtas sujeitas a esforços de compressão. Foram comparados diferentes métodos para avaliação de colunas com seções transversais tipo U enrijecido, cartola e *rack*, levando em consideração os efeitos das flambagens local e distorcional. Verificou-se que o método introduzido por Lau e Hancock (1987) apresenta melhor correlação com o *Generalized Beam Theory*, GBT (Schardt, 1994), que as recomendações do Eurocode 3, tendo este último apresentado valores bastante conservativos. Observou-se ainda a influência das condições de apoio na tensão de flambagem distorcional e na capacidade de carga de colunas curtas comprimidas.

Markazi et al. (2001) fizeram uma análise linear tri-dimensional do comportamento das ligações semi-rígidas dos sistemas *racks*, utilizando como ferramenta o método dos elementos finitos. Os efeitos dos diferentes tipos de encaixes foram considerados. Foram feitos sub-modelos de trechos de colunas em contato com os conectores para determinação da influência destes na relação momento-curvatura. Os resultados numéricos foram validados através da comparação com os obtidos experimentalmente por Markazi et al. (1997), observando-se boa concordância entre os dois. Concluiu-se com este estudo que as conexões rígidas apresentaram resultados conservativos tendo, portanto, sua utilização recomendada.

Bernuzzi e Castiglioni (2001) desenvolveram um estudo experimental para analisar o comportamento de ligações viga-coluna, considerando os sistemas tipo *Porta-pallets*. Os ensaios foram realizados simulando os efeitos de uma zona sísmica, utilizando para isso carregamentos cíclicos. No total, foram realizados onze testes em dois diferentes produtos comerciais. Através dos resultados, verificaram que as ligações perdem a capacidade inicial de dissipação de energia com o aumento dos ciclos de carga, bem como a capacidade resistente. Futuramente serão executados testes experimentais com o objetivo de definir um modelo simplificado para simular a curva momento-rotação associada com o histórico do carregamento.

Dhanalakshmi e Shanmugam (2001) desenvolveram uma equação para avaliar a capacidade de carga de colunas curtas perfuradas. Utilizando diversos parâmetros, como esbeltez da placa, formato e tamanho das aberturas, calcularam a capacidade de carga para perfis com configurações diversas de perfurações. A formulação foi calibrada a partir de um extensivo estudo, usando como ferramenta o método dos elementos finitos. Os resultados foram validados através da comparação com os obtidos em análises experimentais e pelo método dos elementos finitos, tendo sido verificada uma boa concordância entre esses valores.

A influência da ligação de apoio na capacidade de carga das colunas foi estudada por Lau et al. (2003). Neste trabalho foram desenvolvidas análises teóricas e experimentais para colunas com diferentes valores de esbeltez relativa. O modelo geral apresenta uma extremidade rotulada e a outra engastada, estando submetido a carregamento axial vertical e a uma carga concentrada aplicada horizontalmente no comprimento médio da coluna. Os autores concluíram que, se os carregamentos horizontais forem inferiores aos chamados *valores de transição*, é possível dimensionar as colunas para cargas próximas à carga de Euler.

Sarawit e Peköz (2003) propuseram novas equações para determinação da área efetiva e do módulo elástico da seção efetiva, para o caso de colunas perfuradas. Para validação destas equações, foram feitas simulações numéricas do ensaio da coluna curta através do programa computacional ABAQUS, baseado no método dos elementos finitos. Comparando os resultados, observaram que os valores obtidos utilizando as novas formulações concordam melhor com os gerados numericamente que aqueles obtidos aplicando-se as equações atualmente indicadas pelo RMI.

Beale e Godley (2004) introduziram uma metodologia para dimensionamento de sistemas de armazenagem industrial que possuem colunas emendadas, sujeitas a esforços verticais e horizontais. As análises foram feitas considerando a não-linearidade do efeito $P-\Delta$ e as semi-rigidezes das emendas das colunas, ligações viga-coluna e ligações coluna-placa de base. Os resultados foram comparados com os valores na análise numérica feita no programa computacional LUSAS, utilizando o método dos elementos finitos, tendo sido observado uma boa concordância entre os dois.

No Brasil, diversos estudos tem sido realizados para avaliação dos modos de estabilidades inerentes às seções tipo *rack*, como o modo distorcional, bem como estudos dos elementos que compõem o sistema e deste em escala real. A seguir tem-se uma síntese destas pesquisas.

O Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ) em Parceria com o Instituto Técnico de Lisboa tem desenvolvido diversos trabalhos de análise teórica, experimental e numérica de estabilidade de perfis de paredes finas com seções abertas, como a seção tipo *rack* (Batista et al, 1998; Nagahama, 2003; Pérez, 2003; Vasquez, 2002; Venanci, 2005).

Na Universidade Federal de Ouro Preto, diversas pesquisas vêm sendo feitas sobre os elementos que compõem o sistema *rack*, suas ligações e comportamento. As pesquisas

realizadas por Freitas e colaboradores envolveram procedimentos experimentais, teóricos e numéricos. Alguns destes trabalhos são descritos a seguir.

Oliveira (2000) estudou o comportamento estrutural dos sistemas de armazenagem tipo *Drive-in*. Em seu programa experimental foram analisadas as rigidezes das ligações braço-coluna e longarina-coluna, e a influência dos furos na capacidade de carga das colunas. Os valores experimentais para carga última das colunas apresentaram boa correlação com a carga nominal calculada conforme indicação do RMI (1997). Quanto à análise da rigidez das ligações, os valores obtidos por diferentes métodos mostraram-se bastante semelhantes.

Campos (2003) avaliou de maneira global o comportamento do sistema de armazenagem do tipo *Drive-in*, condicionando sua estrutura a vários parâmetros já estudados para o sistema *Porta-pallets*. Em seu trabalho, foram considerados valores reais da rigidez das ligações entre as vigas e as colunas, determinadas experimentalmente por Oliveira (2000) e entre a coluna e a placa de base, determinada a partir de ensaios experimentais. Foi verificado que a combinação de carga que conduz a maiores esforços na estrutura é a que considera como estado limite a carga de armazenagem e, no caso de avaliações numéricas, a análise não-linear é a mais adequada em função da não linearidade do comportamento do sistema *Drive-in*.

Freitas et al. (2005) desenvolveram um estudo teórico-experimental para avaliar a influência das perfurações na capacidade de carga das colunas dos sistemas *racks*. Foram realizadas análises numéricas utilizando o método dos elementos finitos e posteriormente os resultados foram comparados com os dados experimentais de Oliveira (2000). Neste trabalho, os autores concluíram que, utilizando valores reais para a tensão de escoamento do aço, obtidos através do ensaio de caracterização, e considerando os efeitos das imperfeições geométricas, tem-se uma boa aproximação entre os resultados numéricos e experimentais.

Souza (2005) realizou um estudo teórico-experimental do sistema *drive-in*, analisando seu comportamento global e avaliando a interação entre seus diversos elementos. Os resultados dos ensaios experimentais foram comparados com os valores numéricos, obtidos utilizando o método dos elementos finitos. Para uma melhor aproximação entre estes resultados alguns parâmetros foram considerados na avaliação numérica, tais como imperfeições geométricas, influência da fixação da base, rigidez das ligações entre a longarina e a coluna e entre o braço e a coluna.

1.4 Objetivos e descrição do trabalho

A partir dos estudos desenvolvidos na Universidade Federal de Ouro Preto foram definidos os objetivos deste trabalho que são a análise experimental de colunas curtas de tipologia diversas com e sem furos de modo a avaliar a influência das perfurações no seu comportamento, bem como sua distribuição de tensões na região perfurada. Com os resultados obtidos será realizada uma avaliação das prescrições do RMI e da proposição de Sarawit e Peköz (2003) para consideração dos furos na resistência das colunas que compõem os sistemas de armazenagem industrial.

A seguir tem-se a descrição da estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é feito inicialmente um breve histórico dos sistemas *racks*. Em seguida são apresentados os tipos de sistemas de armazenagem mais utilizados no Brasil e suas características mais relevantes.

No capítulo 3 estão descritos os principais elementos que compõe os sistemas *racks*, assim como suas características e funções estruturais. É comentado também sobre os critérios de utilização indicados pelo RMI para assegurar a integridade destas estruturas.

No capítulo 4 faz-se a indicação das prescrições do RMI e das proposições feitas por Sarawit e Peköz (2003) para o cálculo da capacidade de carga e momento fletor resistente de colunas perfuradas, por meio do ensaio da coluna curta. Em seguida, é proposta uma formulação para utilização da NBR 14762 (2001) no dimensionamento de colunas perfuradas.

No capítulo 5 tem-se o programa experimental utilizado no ensaio da coluna curta e os resultados encontrados para tensão limite de escoamento do aço (f_y), tensão limite de resistência à tração (f_u) e alongamento residual após a ruptura (a), obtidos através de ensaios de tração.

No capítulo 6 são apresentadas e analisadas as cargas últimas experimentais de ruptura, as áreas efetivas calculadas segundo especificações do RMI e Sarawit e as deformações dos extensômetros utilizados nos ensaios experimentais. Em seguida, são feitas comparações entre as cargas nominais obtidas através das recomendações do RMI, Sarawit, AISI (1996) e pela proposição para utilização da NBR 14762.

No capítulo 7 têm-se as conclusões do estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – OS SISTEMAS DE ARMAZENAGEM INDUSTRIAL

2.1 Introdução

Os sistemas de armazenagem industrial são soluções em movimentação e estocagem de produtos que, devido a grande variedade de tipos disponíveis no mercado, atendem aos mais diversos perfis de clientes. Atualmente, encontram-se disponíveis opções que vão desde estantes carregadas manualmente até sistemas autoportantes (Figura 2.1), onde a movimentação interna da carga é feita por meio de transelevadores computadorizados.



Figura 2.1 – Sistemas de armazenagem industrial autoportante, (Águia, 2005).

A escolha do sistema adequado depende de diversos fatores. Segundo Scheffer (1998), cada cliente apresenta suas características e peculiaridades, sendo necessário para cada projeto uma avaliação da natureza do negócio, espaço físico disponível, fluxo de materiais, estocagem, mecanismos de transporte e de controle de movimentação, entre outros. Na escolha do sistema ideal, é necessário adequar as diversas variáveis a soluções específicas, atendendo requisitos como aproveitamento de espaço, acessibilidade, produtividade, segurança, flexibilidade e viabilidade financeira.

Neste capítulo serão apresentados os principais tipos de sistemas de armazenagem industrial, suas características principais e os mecanismos de transporte de carga aplicável a cada um.

2.2 Histórico

Segundo Godley (1991), os sistemas de armazenagem tiveram sua origem em 1930 e a princípio, eram compostos por cantoneiras de aço formado a frio com perfurações ao longo de seu comprimento. A ligação entre os elementos era feita através de parafusos, o que permitia boa flexibilidade para o projetista produzir uma variedade de formas e configurações.

Porém, as conexões por meio de parafusos eram trabalhosas e de alto custo, e exigiam grande quantidade de contraventamentos para garantir a estabilidade do sistema, já que as cantoneiras possuem baixa resistência à torção. Além disso, percebeu-se que os sistemas de armazenagem não apresentavam grande flexibilidade de configuração o que restringia as condições de projeto. Com isso, as perfurações foram restringidas às colunas e as vigas passaram a apresentar garras dentadas, dispensando o uso de parafusos para o encaixe das ligações e tornando assim a montagem do sistema mais rápida e econômica.

As seções utilizadas nas colunas também sofreram modificações. De cantoneiras passaram a U enrijecido, melhorando assim a resistência à torção. No entanto, foi verificado que essa seção ainda apresentava dificuldades para instalação de contraventamentos e, como soluções para este problema, foram criadas seções específicas, como a seção do tipo *rack* ou *garrafa*, que apresentam flanges adicionais para facilitar a fixação dos contraventamentos (Figura 2.2).

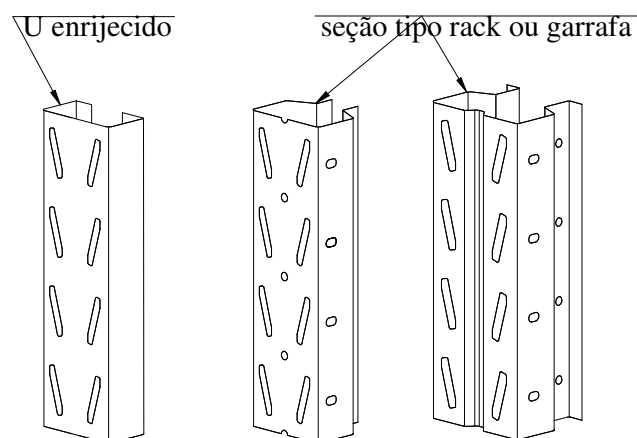


Figura 2.2 – Seções transversais comumente utilizadas para colunas dos sistemas *racks*.

No mercado nacional, os sistemas de armazenagem industrial surgiram em 1980 quando a multinacional Mercedes-Benz decidiu reformular o almoxarifado de suas concessionárias. A empresa queria que as prateleiras fossem de aço, como as que já eram utilizadas na matriz alemã. Com isso, uma empresa brasileira, que até então só produzia cofres, roupeiros e prateleiras convencionais, desenvolveu um sistema de prateleiras em aço de montagem rápida e ligações não-parafusadas, se adequando à necessidade do cliente e iniciando assim a fabricação dos sistemas *rack* no Brasil (Fluxo, 2002).

Desde então várias empresas surgiram nessa área. Atualmente, são vários os fabricantes de sistemas de armazenagem industrial no Brasil, como a Águia Sistemas de Armazenagem Ltda., a Altamira Indústria Metalúrgica Ltda., a Bertolini S/A – Sistemas de Armazenagem, a Esmena do Brasil S.A., a Fiel S/A Móveis e Equipamentos Industriais, a Isma S/A Indústria Silveira de Móveis de Aço, a A.Boletti & Cia Ltda e a Sofima S/A. Essas empresas utilizam em seus sistemas tipos variados de ligações e colunas e estão vinculadas à ABML – Associação Brasileira de Movimentação e Logística criada em abril de 1997.

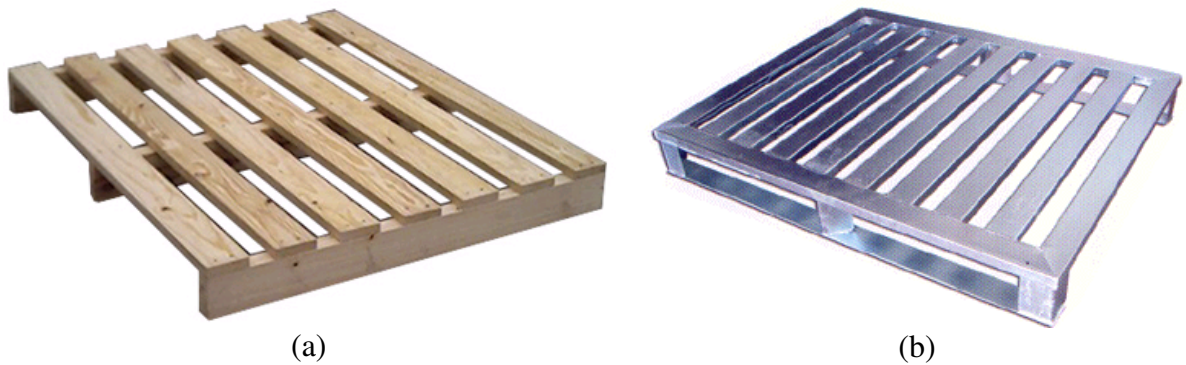
2.3 Tipos de sistemas de armazenagem industrial

Como já foi dito anteriormente, existem vários tipos de sistemas de armazenagem industrial. O mecanismo de transporte varia conforme o sistema empregado, podendo ser manual, por meio de empilhadeiras ou através de transelevadores computadorizados.



Figura 2.3 – Produtos apoiado diretamente no *rack*, (Águia, 2005).

Quanto à estocagem de produtos, poderá ser feito diretamente sobre o *rack* (Figura 2.3), empilhado em um gradil conhecido como palete, que pode ser de madeira (Figura 2.4 a), plástico ou metálico (Figura 2.4 b), ou ainda, armazenado em contêiner metálico (Figura 2.5).



(a) (b)
Figura 2.4 – Tipos de paletes: a) de madeira; b) metálico,
(Bellaforma, 2004).



Figura 2.5 – Foto de produtos armazenados em contêiner metálico.

Nos sistemas paletizados o carregamento pode ser feito de maneira estática ou dinâmica. Na primeira, somente a empilhadeira é responsável pela movimentação da carga, ou seja, uma vez armazenado o produto não se desloca no interior do *rack*. Na segunda, o sistema dispõe de trilhos ou conjunto de roletes que promovem a movimentação interna do material, deslocando o produto para dentro ou para fora do sistema.

2.4 Sistemas estáticos

Dentre os sistemas estáticos disponíveis no país, os mais utilizados são: *porta-pallets* (convencional, autoportante e deslizante), *drive-in*, *drive-through* e *cantilever* (Oliveira, 2000).

Sistema porta-pallets convencional

É um dos mais populares sistemas de armazenagem industrial. Sua configuração permite acesso direto aos itens estocados, combinando seletividade e rotatividade de materiais. Outra grande vantagem do sistema *porta-pallets* é a versatilidade quanto às formas de armazenamento, que poderá ser feita por meio de paletes, contêineres, tambores, bobinas ou em embalagens individuais. A altura deste sistema é determinada pelo alcance do equipamento de movimentação de carga. A Figura 2.6 ilustra um este sistema em operação.



Figura 2.6 – Foto da movimentação de carga no sistema tipo *porta-pallets*, Altamira (2004).

No sistema tipo *porta-pallets* o acesso aos produtos armazenados é feito por meio de corredores. A Figura 2.7a é uma vista superior deste sistema, através do qual podem ser observados estes corredores de acesso e o sentido de movimentação das empilhadeiras. Já a Figura 2.7b permite uma visão global da operação de carga e descarga do sistema.

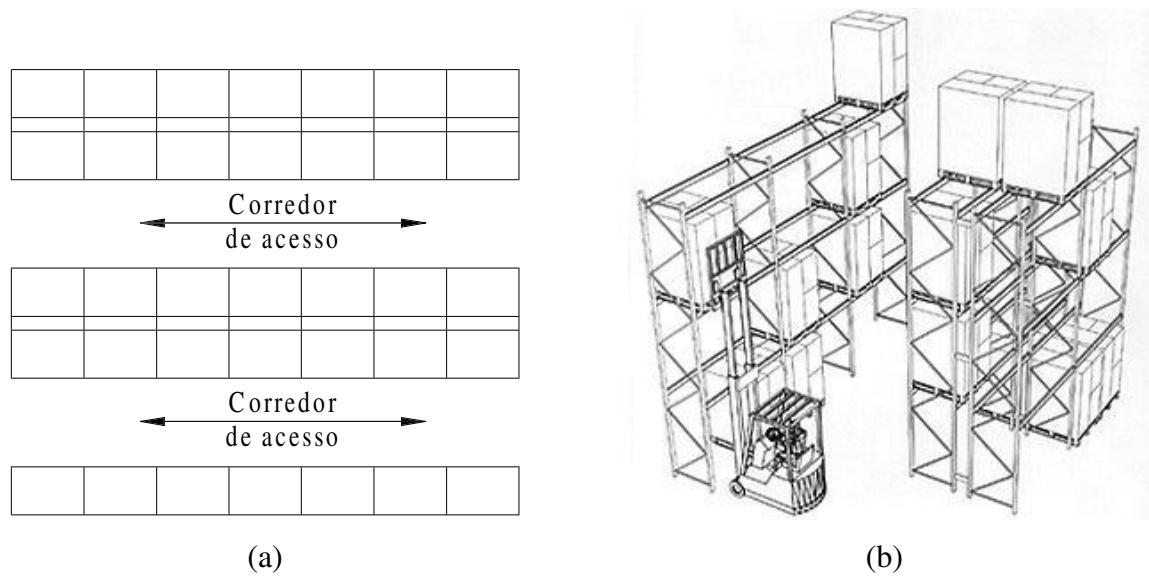


Figura 2.7 – Vista esquemática do sistema tipo *porta-pallets*: a) movimentação das empilhadeiras; b) vista esquemática tridimensional (Bertolini, 2004).

Sistema porta-pallets autoportante

Trata-se de um sistema indicado para armazenagem de materiais de alta rotatividade, que combina alta densidade de carga, rapidez de movimentação e máxima seletividade individual. O transporte de carga é feito por meio de empilhadeiras trilaterais e selecionadoras de pedidos ou, no caso de alturas mais elevadas, transelevadores com controle automático (Figura 2.8). O sistema apresenta colunas autoportantes, permitindo que a fixação dos elementos de vedação seja feita diretamente na estrutura do sistema, reduzindo assim tempo e custo necessários para construção prévia de um edifício convencional (Figura 2.9).



Figura 2.8 - Foto da movimentação de carga feita por meio de transelevadores no sistema *porta-pallets autoportante*, (Águia, 2005).

A maior desvantagem da utilização deste tipo sistema é a necessidade de investimentos adicionais, tais como, nivelamento excepcional do piso da região de armazenamento, equipamentos adicionais para transporte da carga fora da área de armazenagem e elevado custo dos equipamentos de movimentação no interior do sistema.

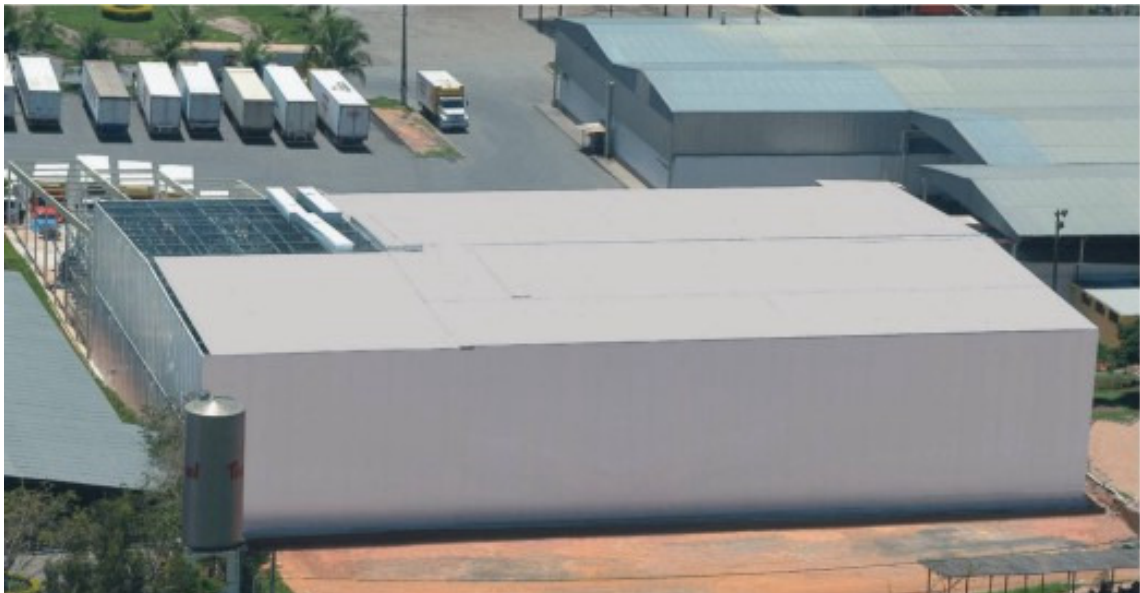


Figura 2.9 - Foto de edificação com vedação fixada diretamente na estrutura do sistema de armazenagem, (Águia, 2005).

Sistema porta-pallets deslizante

Neste sistema as estantes ficam apoiadas sobre rodas que deslizam através dos trilhos fixados no chão. O deslocamento lateral dos montantes, que pode ser feito por meio manual ou eletromecânico (Figura 2.10), permite a abertura de corredores de acordo com a necessidade de retirada de material. Sua configuração proporciona alta seletividade e densidade de materiais, além de reduzir o número de pessoas e, conseqüentemente, o risco de acidentes no local de armazenamento. No entanto, assim como o *porta-pallets autoportante*, esse sistema requer um elevado investimento inicial.



Figura 2.10 – Estrutura do sistema *porta-pallets deslizante*,
(Águia, 2005).

Sistema drive-in

O sistema de armazenagem industrial tipo *drive-in* é constituído por um bloco contínuo de montantes e sua configuração possibilita o trânsito interno de empilhadeiras, eliminando corredores e permitindo um grande aproveitamento da área de armazenagem. Possui apenas uma face de operação, sendo a extremidade oposta destinada ao plano de contraventamento (Figura 2.11a).

A movimentação dos paletes no interior do sistema é feita através de longarinas que se apóiam em vigas curtas em balanço, conhecidas como braços (Figura 2.11b). O movimento

das empilhadeiras é feito através dos vãos existentes entre os braços. Na Figura 2.11c tem-se uma visão geral da operação de um sistema do tipo *drive-in*.

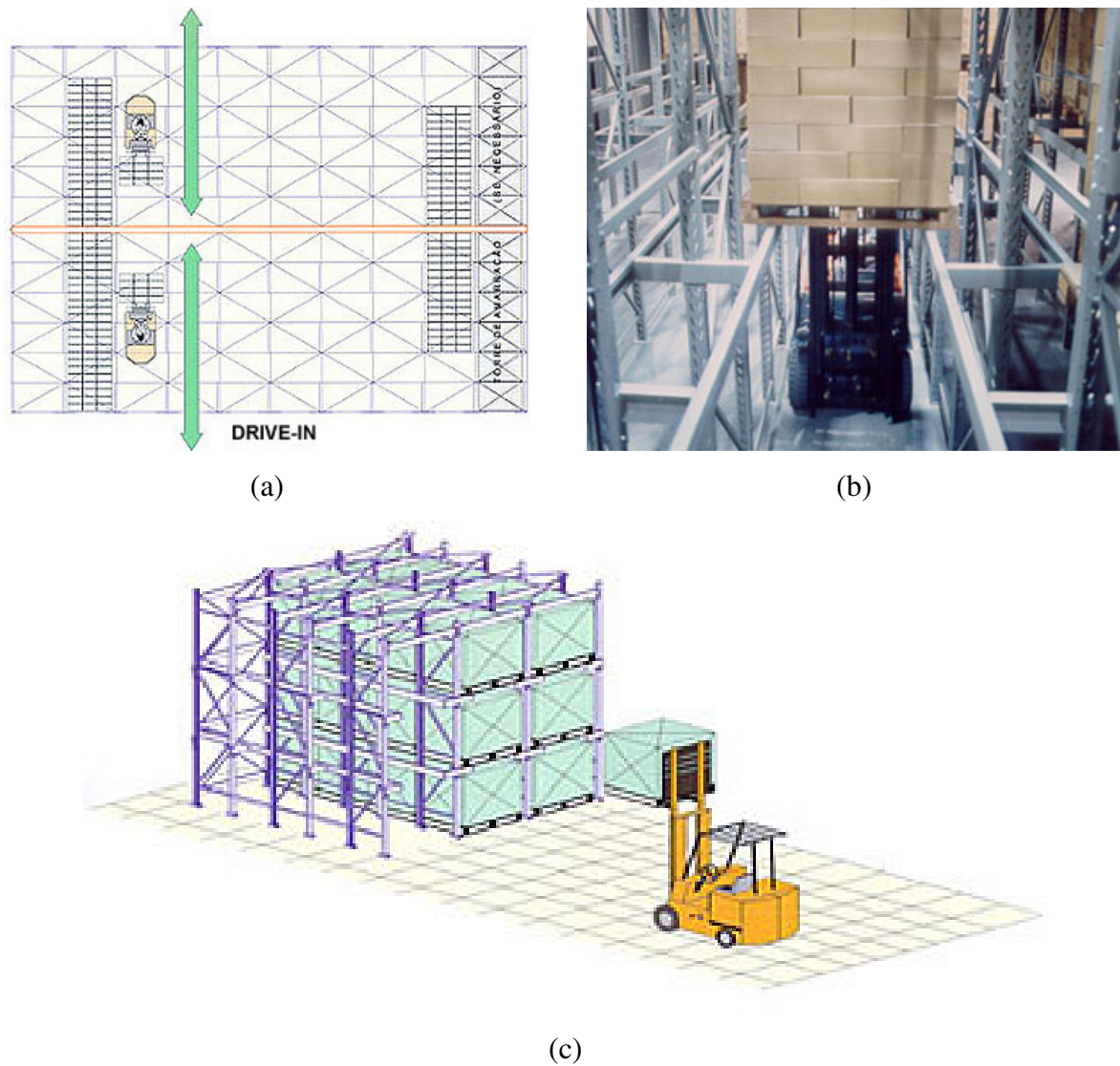


Figura 2.11 - Sistemas *drive-in*: (a) Vista superior esquematizada; (b) Foto frontal da movimentação do palete no interior do sistema; (c) Vista esquemática tridimensional do sistema em operação, (Altamira, 2004).

Sistema drive-through

A configuração do sistema *drive-through* é semelhante ao do *drive-in*, sendo que o primeiro apresenta duas faces de operação, fazendo com que a seletividade deste sistema dobre em

relação ao *drive-in*. A Figura 2.12 ilustra o sentido de movimentação das empilhadeiras no interior do sistema *drive-through*.

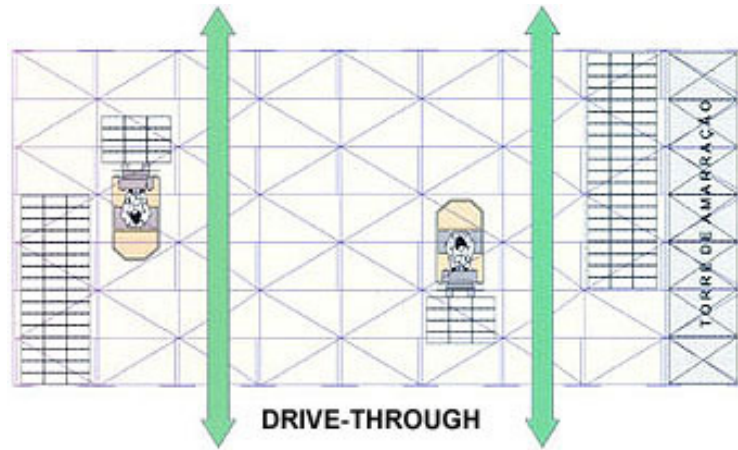


Figura 2.12 - Vista esquemática da operação do sistema *drive-through*.
(Altamira, 2004).

Sistema cantilever

É um sistema ideal para armazenagem de produtos com volumes e pesos variados, paletizados ou não. Sua configuração é caracterizada por uma coluna central onde são fixadas as vigas em balanço que servirão de apoio para a carga ou planos de armazenagem (Figura 2.13). O carregamento pode ser feito manualmente, por meio de empilhadeiras ou pontes rolantes.



Figura 2.13 – Foto de um sistema tipo *cantilever*, (Águia, 2005).

2.5 Sistemas dinâmicos

Os sistemas de carregamento dinâmico mais utilizados são: *sistema de armazenagem dinâmica*, *push back* e *flow rack*.

Sistema de armazenagem dinâmica

O sistema de armazenagem dinâmica combina alta rotatividade e densidade de carga. Utiliza a filosofia FIFO - *first-in first-out* (primeiro que entra primeiro que sai). Sua configuração apresenta duas faces de operação, uma de entrada e outra de saída, sendo que a primeira fica num nível mais alto que a segunda. Os paletes são colocados no sistema em uma das extremidades (entrada) e deslizam em direção a outra (saída) sobre rolos (Figura 2.14) ou trilhos de roldana pela ação da gravidade, sendo a aceleração da carga controlada por reguladores de velocidade.



Figura 2.14 - Foto do conjunto de rolos utilizados na movimentação dos paletes no interior do sistema de armazenagem dinâmica, (Águia, 2005).

A Figura 2.15 ilustra o funcionamento do sistema de armazenagem dinâmica, indicando a direção de fluxo de produtos e o posicionamento do sistema de roldanas.

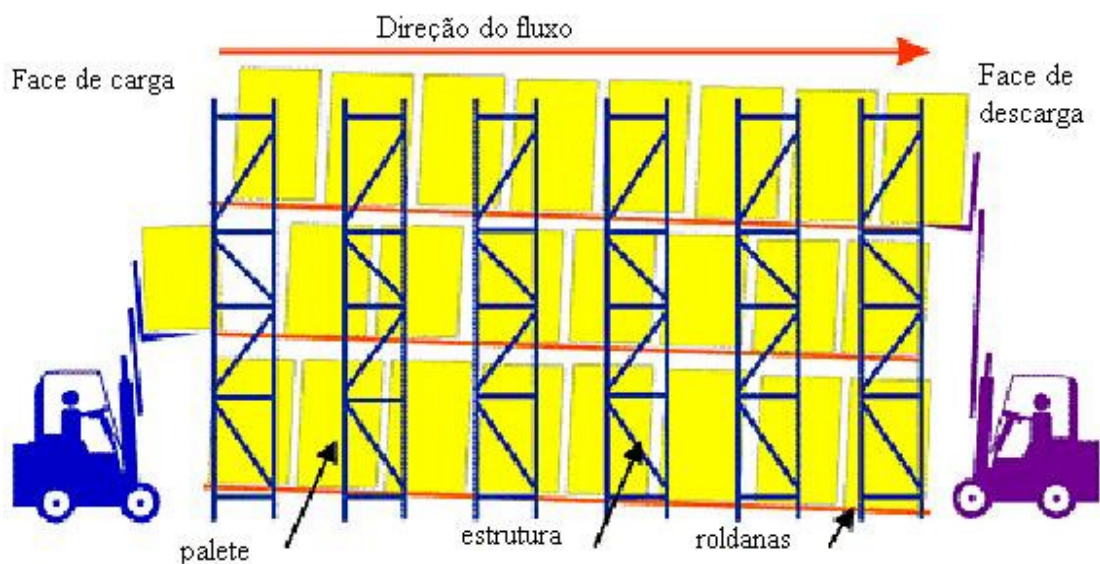


Figura 2.15 - Vista esquemática do sistema de armazenagem dinâmica, (Steel King, 2004).

Sistema push-back

O funcionamento deste sistema é similar ao da armazenagem dinâmica, onde a principal diferença é que o sistema *push-back* possui apenas uma face de operação, por onde são feitos o carregamento e descarregamento dos montantes.

No carregamento deste sistema o palete é colocado sobre os trilhos e empurrado pela empilhadeira para o interior do sistema. O processo de descarga acontece de maneira inversa de forma que, ao se retirar o palete mais próximo da face de operação, o palete anterior desce uma posição, devido à inclinação dos trilhos (Figura 2.16a), ocupando o lugar do que saiu (Figura 2.16b). Esta configuração utiliza o princípio LIFO - *last-in first-out* (último que entra primeiro que sai), indicado para cargas não perecíveis e com pouca variabilidade de itens.



(a)



(b)

Figura 2.16 - Sistema *push-back*: (a) Foto do sistema de trilhos utilizados na movimentação interna da carga; (b) Foto do sistema em operação, (Águia, 2005).

Sistema flow-rack

Este sistema é indicado para armazenagem de pequenos volumes, com grande variedade de forma e alta rotatividade. Sua estrutura apresenta longarinas longitudinais e sobre elas apóiam-se trilhos através do qual a carga é movimentada (Figura 2.17).



Figura 2.17 - Foto da estrutura do sistema *flow-rack*, (Isma, 2004).

Alguns fabricantes utilizam sistema de rodas sobre os trilhos, que facilita o deslizamento dos itens armazenados, como ilustrado na Figura 2.18. O carregamento é feito pelo nível mais alto e a retirada do material pelo lado oposto, o que caracteriza o princípio FIFO - *first-in first-out* (primeiro que entra primeiro que sai).



Figura 2.18 - Foto do sistema de rodas sobre trilhos, (Sofima, 2004).

Capítulo 3 – ELEMENTOS DOS SISTEMAS RACKS

3.1 Introdução

Os sistemas de armazenagem industrial apresentam peculiaridades em sua configuração, sendo observadas diferenças quanto aos tipos de elementos utilizados e o posicionamento dos mesmos. Por exemplo, o sistema *cantilever* apresenta apenas um plano de colunas, nas quais são fixados os braços em balanço que receberão os itens a serem armazenados (Figura 3.1). Já o *drive-in* apresenta vários planos de colunas e os produtos são estocados sobre vigas que percorrem toda profundidade do sistema (vigas de túnel), apoiadas em vigas curtas em balanço (braços) que transmitem a carga para as colunas do sistema (Figura 3.2).

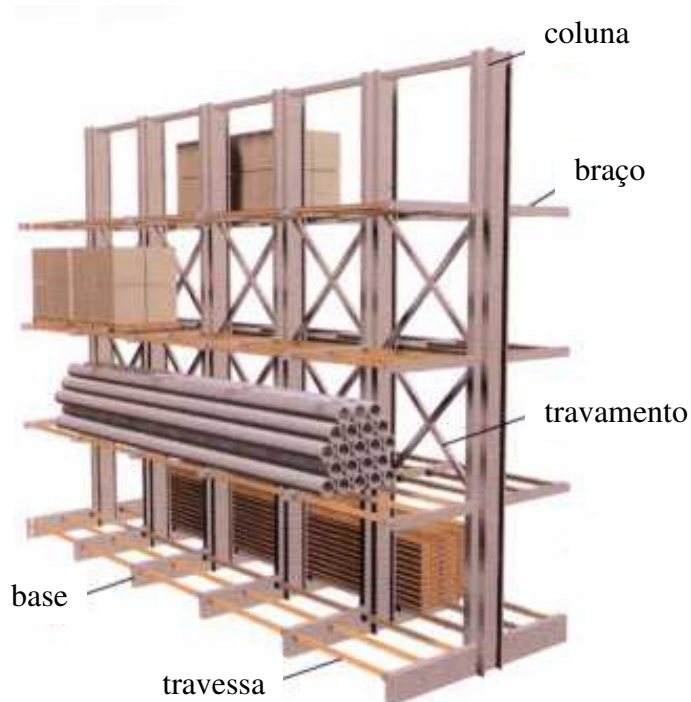


Figura 3.1 – Elementos do sistema tipo *cantilever* (Movsan, 2005).

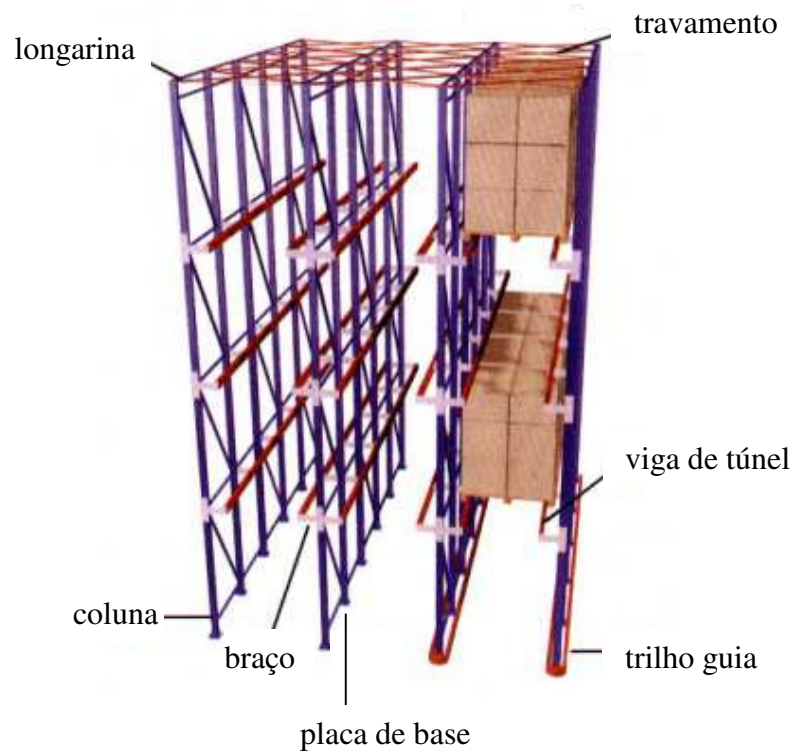


Figura 3.2 – Elementos do sistema tipo *drive-in* (Movsan, 2005).

Neste capítulo serão apresentados os elementos que compõem os principais tipos de sistemas *racks* existentes no mercado nacional, enfatizando suas funções e características principais.

3.2 Colunas

As colunas normalmente utilizadas nos sistemas de armazenagem industrial possuem seções abertas, sendo amplamente empregadas as do tipo U enrijecido e *rack* ou *garrafa*. Em geral, apresentam perfurações de configurações diversas ao longo de seu comprimento, que facilitam o encaixe das ligações com vigas e elementos de contraventamento.

A seção tipo *rack* é mais vantajosa que a seção tipo U enrijecido, já que a primeira apresenta flanges de ligação que permitem a fixação do sistema de contraventamento diretamente no perfil (Figura 3.3), dispensando o uso de cantoneiras adicionais, necessárias quando se utiliza a seção U enrijecido (Figura 3.4).



Figura 3.3 – Perfil *rack* ou *garrafa* com flanges de ligação que permitem a fixação dos elementos de contraventamento.

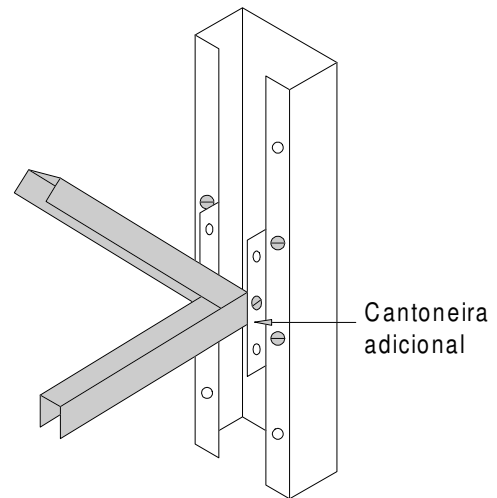


Figura 3.4 – Perfil U enrijecido com cantoneiras adicionais para ligação dos elementos de contraventamento.

3.3 Vigas

Nos sistemas *porta-pallets* as vigas podem apresentar seções transversais abertas ou fechadas. As fechadas possuem melhor eficiência devido à sua estabilidade geométrica, porém o uso das seções abertas é mais atrativo em função da economia do material e da facilidade no processo de fabricação através da conformação a frio (Oliveira, 2000). A Figura 3.5 ilustra as seções mais utilizadas nos sistemas *porta-pallets* do Brasil.

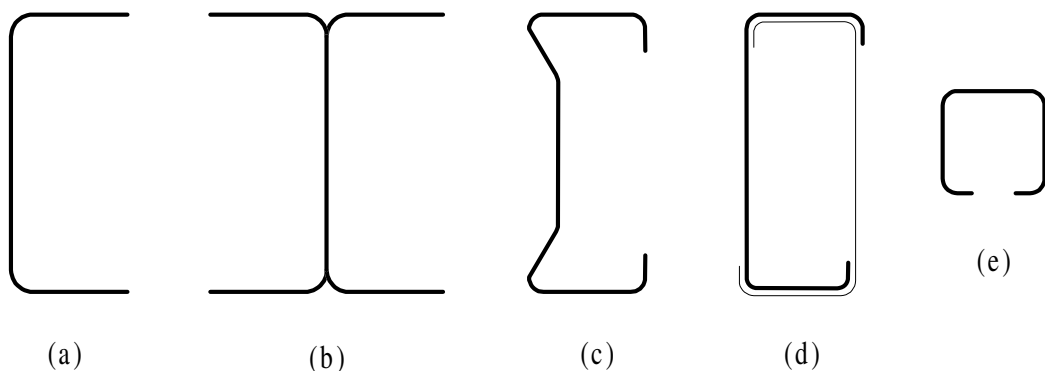


Figura 3.5 – Seções transversais mais aplicadas em vigas dos sistemas *porta-pallets*:
(a) seção U; (b) seção I; (c) seção sigma; (d) fechada; (e) semi-aberta.

A configuração mais utilizada para o carregamento dos sistemas tipo *porta-pallets* é o de dois paletes por viga (Figura 3.6a). No entanto, a necessidade de um melhor aproveitamento do espaço pode fazer com que sejam utilizadas as configurações de três (Figura 3.6b) ou um (Figura 3.6c) paleta por viga.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.6 – Configurações comumente utilizadas nos sistemas *porta-pallets*:

a) dois paletes por viga; b) três paletes por viga; c) um paleta por viga.

Ao contrário do sistema *porta-pallets*, no qual é utilizada apenas uma configuração para as vigas, os sistemas *drive-in/drive-through* são compostos por três diferentes tipos: braços, vigas do túnel e longarinas (Figura 3.2), tendo cada uma sua característica e função específica.

Os braços são elementos curtos, de seção transversal aberta, ligados diretamente às colunas do sistema. Nas extremidades dos braços estão ligadas as vigas do túnel (trilhos), elementos que têm a finalidade de suportar os paletes, transmitindo a carga para os braços. As vigas de túnel geralmente possuem seção transversal aberta, estando sujeitos a fenômenos de flexão e à flambagem lateral por torção. A Figura 3.7 ilustra estes dois tipos de viga.

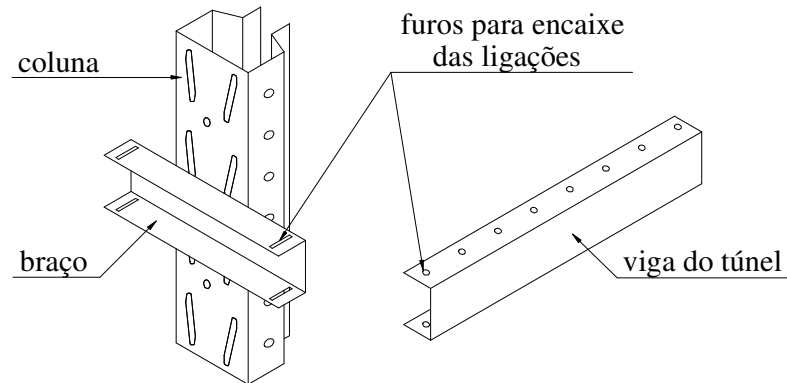


Figura 3.7 – Esquema das posições do braço e da viga de túnel.

A terceira viga que compõe os sistemas tipo *drive-in/drive-through* é denominada longarina. É fixada no topo do sistema, fazendo a amarração das colunas (Figura 3.2), auxiliando assim na estabilidade do sistema. A Figura 3.8 ilustra uma longarina e suas garras dentadas utilizadas nas ligações com as colunas.

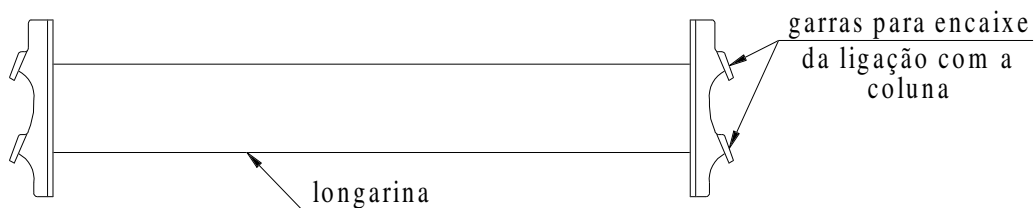


Figura 3.8 – Longarina com garras para encaixe das ligações.

A configuração normalmente utilizada para o armazenamento nos sistemas *drive-in/drive-through* é a de uma fileira de paletes por nível, conforme ilustrado na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Configuração do armazenamento de paletes no sistema *drive-in/drive-through*, (Isma, 2004).

Os sistemas de armazenagem dinâmica apresentam conjuntos de rolos ou trilhos de roldanas responsáveis por fazer a movimentação interna do produto e distribuir o carregamento para as vigas. A Figura 3.10 ilustra o posicionamento destes elementos dentro do sistema.

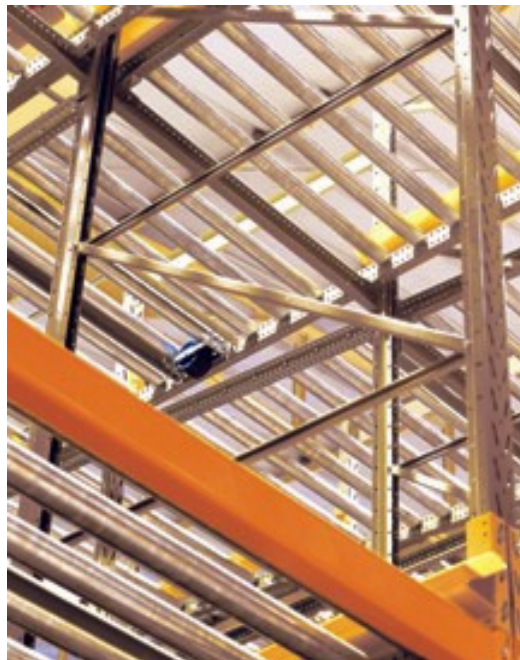


Figura 3.10 – Vigas e conjunto de rolos do sistema de armazenagem dinâmica, (Águia, 2005).

Já no sistema *cantilever* as vigas ficam em balanço (braços), podendo ser do tipo simples (Figura 3.11a), com apenas um plano de armazenagem, ou duplo (Figura 3.11b), permitindo o dobro da capacidade de estocagem. Os braços são fixados diretamente nas colunas, e o encaixe é normalmente feito por meio de ligações parafusadas. Elementos semelhantes são utilizados na base, sendo que estes normalmente apresentam maior seção transversal e, além de ligados às colunas, estão fixos no chão, impedindo assim a rotação do sistema.

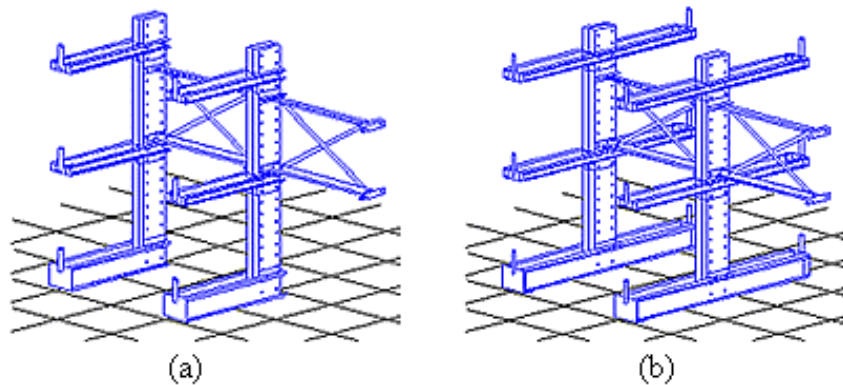


Figura 3.11 – Sistemas *cantilever*: (a) com braço simples; (b) com braço duplo, (A.Boletti, 2005).

3.4 Sistemas de contraventamento

As seções transversais normalmente utilizadas nos sistemas de contraventamento são do tipo cantoneira e U enrijecido. A ligação destes elementos pode ser feita por meio de soldagem ou por ligações parafusadas, sendo a segunda mais vantajosa que a primeira, em função da praticidade e rapidez na montagem.

Os planos de contraventamento podem ser utilizados em diversos locais dos sistemas, com a finalidade de garantir a estabilidade da estrutura. Nos sistemas tipo *porta-pallets* e similares (*porta-pallets*, *autoportante* e *deslizante*) são utilizados elementos de contraventamento apenas nas laterais do sistema, como indicado na Figura 3.12.

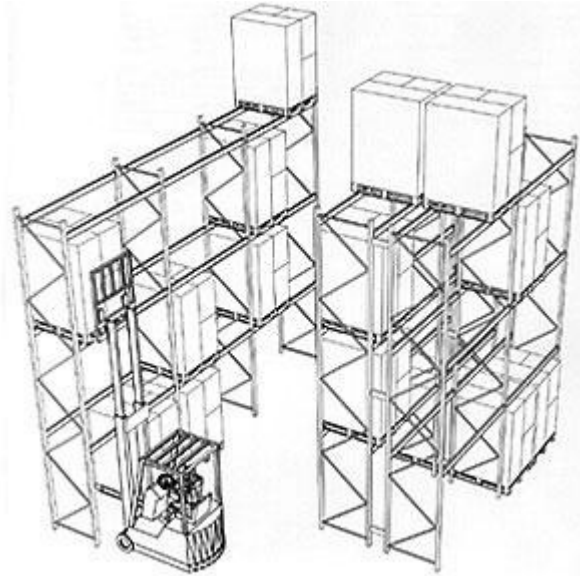


Figura 3.12 - Sistema *porta-pallets*: esquema dos planos de contraventamento laterais, (Bertolini, 2004).

Em sistemas tipo *drive-through* são utilizados elementos de contraventamento nas laterais e no plano horizontal superior. Já para o sistema *drive-in*, além dos planos de contraventamento utilizados no *drive-through*, utiliza-se um a mais, instalado no fundo do sistema. O esquema da Figura 3.13 ilustra os elementos de contraventamento do sistema tipo *drive-in*.

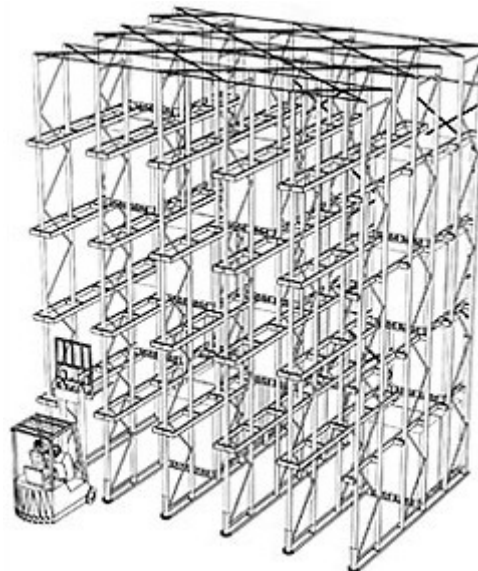


Figura 3.13 – Esquema do sistema tipo *drive-in* com planos de contraventamento nas laterais, no fundo e no plano horizontal superior, (Bertolini, 2004).

No sistema *cantilever* os elementos de contraventamento são posicionados no plano vertical, seguindo o alinhamento das colunas, como pode ser observado através da Figura 3.14.

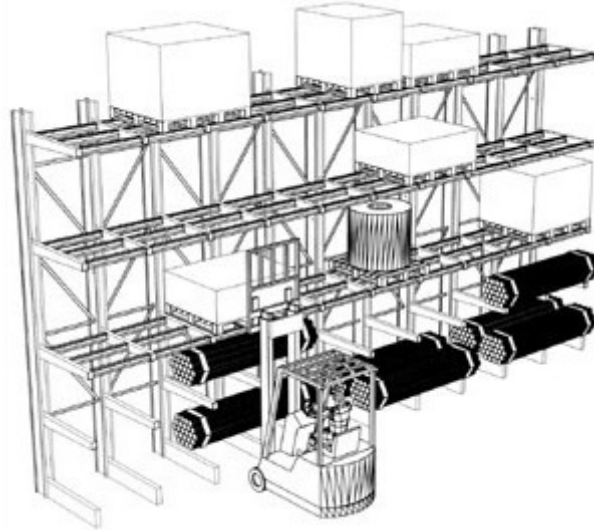


Figura 3.14 – Vista esquemática de um sistema *cantilever* com plano de contraventamento alinhado às colunas, (Bertolini, 2004).

3.5 Distanciadores

São elementos instalados entre colunas adjacentes que não dispõem de contraventamentos entre elas (Figura 3.15), com a finalidade de evitar a colisão entre os paletes durante o processo de carregamento. São posicionados nos mesmos planos de contraventamento do sistema e apresentam seção transversal do tipo U simples.



distanciador

Figura 3.15 – Foto do posicionamento do distanciador de colunas.

3.6 Placas de base

As placas de base distribuem a carga proveniente das colunas no chão. São constituídas por chapas finas e estão ligadas ao piso por meio de ligações parafusadas que garantem a resistência a impactos ascendentes causados por equipamentos de movimentação. A Figura 3.16 ilustra a configuração mais comumente utilizada para placas de base.



Figura 3.16 – Foto da placa de base parafusada no piso.

A placa de base é extremamente importante quando se trata de estruturas altas, principalmente para os sistemas tipo *drive-in/drive-through*, pois a estabilização destes é garantida pelo pórtico considerando a rigidez da coluna, da longarina superior e da fixação da placa de base, Godley (1991).

3.7 Elementos de proteção

Alguns acessórios são utilizados para garantir melhores condições de segurança e maior durabilidade dos elementos dos sistemas *racks*. A Figura 3.17 ilustra um acessório para proteção da coluna. Como pode ser observado, este protetor de coluna é inclinado e apresenta roda emborrachada na base com a finalidade de desviar o equipamento de transporte sem danificá-lo.



Figura 3.17 – Foto do elemento de proteção de colunas.

A barra horizontal de proteção ou *guard-rail* (Figura 3.18b) e guias para empilhadeiras ou *guide-rail* (Figura 3.18c) são outros exemplos de acessórios amplamente utilizados para proteção dos sistemas de armazenagem industrial.



(a) (b)
Figura 3.18 – Elementos de proteção: a) barra horizontal de proteção (*guard-rail*);
b) guia para empilhadeiras (*guide-rail*), (Águia, 2005a).

3.8 Ligações

As ligações dos sistemas de armazenagem industrial são normalmente do tipo semi-rígidas. A conexão da ligação pode ser feita por meio de parafusos (Figura 3.19), fixados na alma ou flanges da coluna, ou através de garras dentadas, encaixados na alma da coluna.

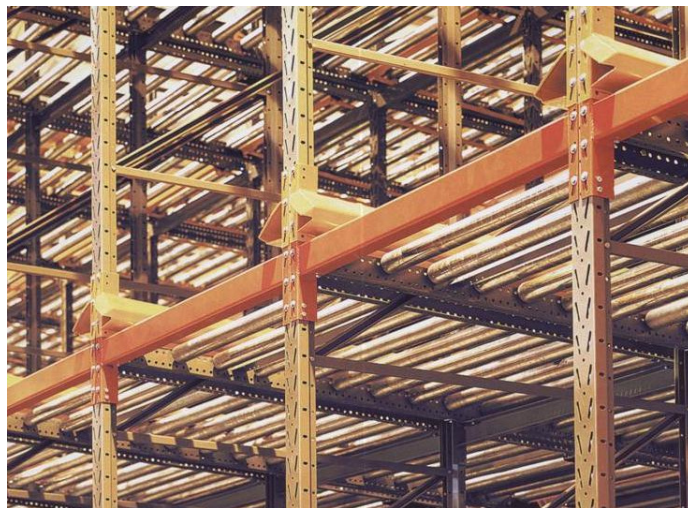


Figura 3.19 – Detalhe de ligações feitas por meio de parafusos,
(Águia, 2005a).

Na conexão por meio de garras dentadas são necessários pinos de segurança para resistir aos impactos verticais ascendentes provocados acidentalmente pelos equipamentos de movimentação.



Figura 3.20 – Foto da ligação por meio de garra dentada com detalhe do pino de segurança.

A Figura 3.21 apresenta os elementos até agora citados para um sistema tipo *porta-pallets*, permitindo assim uma visão geral da posição destes.

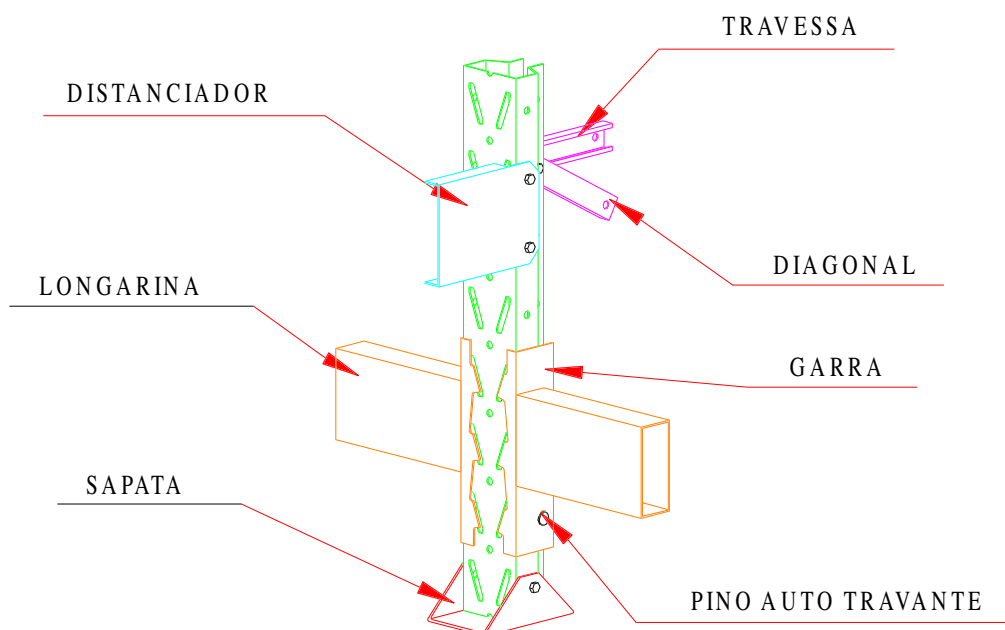


Figura 3.21 – Elementos que compõem o sistema *porta-pallets*, (Águia, 2005b).

3.9 Estabilidade

A estabilidade nos sistemas de armazenagem industrial é um fator crítico de dimensionamento e o efeito não-linear $P-\Delta$, que relaciona as forças axiais P com seus correspondentes deslocamentos laterais Δ , precisa ser considerado (Beale et al., 2004).

Nos sistemas de armazenagem dinâmica, *push back* e *porta-pallets* a estabilidade é garantida pelos elementos de contraventamento na direção de estocagem dos paletes, e pelas ligações entre viga-coluna e viga-placa de base na direção oposta a esta. A Figura 3.22 ilustra o posicionamento dos elementos de estabilização para um sistema tipo *porta-pallets*.

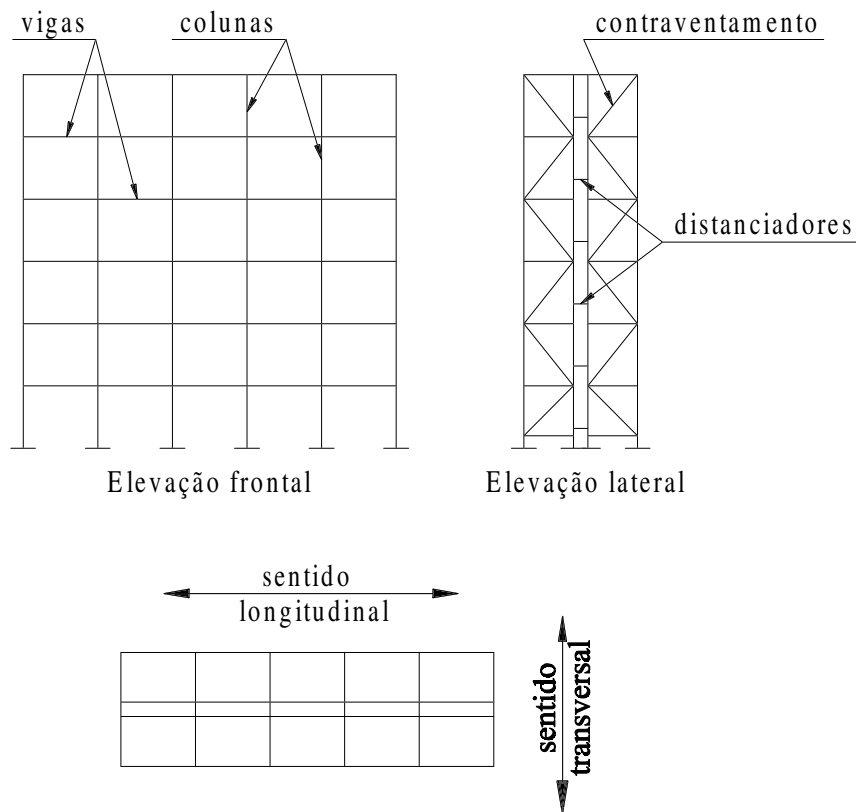


Figura 3.22 – Esquema da elevação frontal e lateral do sistema *porta-pallets*.

Nos sistemas tipo *drive-in/drive-through* a estabilidade na direção longitudinal, onde as vigas não são contínuas, é garantida pela rigidez das ligações coluna-placa de base e colunas-longarinas (Figura 3.23).

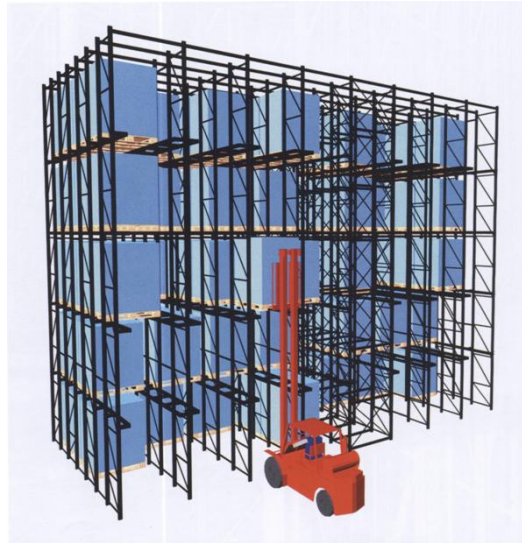


Figura 3.23 – Vista esquemática de um sistema *drive-in* com longarinas nas extremidades superiores dos pilares, (Águia, 2005a).

A estabilidade dos sistemas *cantilever* é garantida pelos elementos de contraventamento, na direção longitudinal, e pelos braços (vigas) fixados no piso, na direção transversal (Figura 3.24).

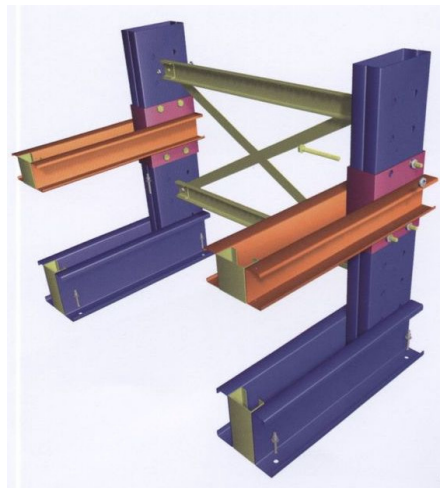


Figura 3.24 – Elementos de estabilização do sistema *cantilever*, (Isma, 2005).

3.10 Integridade dos sistemas *racks*

De acordo com o RMI (1997), a integridade do sistema instalado no armazém é de responsabilidade do proprietário, devendo este garantir condições adequadas de utilização e manutenção. Segue abaixo algumas tarefas recomendadas para boa conservação dos sistemas *racks*:

- Não permitir que o carregamento ao qual a estrutura foi dimensionada seja ultrapassado;
- Promover inspeções regulares para verificação de possíveis danos. Caso seja detectada alguma lesão em elementos estruturais, a área afetada deverá ser imediatamente descarregada e o reparo realizado;
- Manter a integridade dos paletes, garantindo segurança e boas condições de operação;
- Assegurar a correta posição de armazenagem dos paletes, verificando se os mesmos encontram-se apoiados em posições e elementos adequados;
- Verificar a estabilidade e empilhamento dos itens apoiados nos paletes;
- Não permitir mudança na configuração do sistema sem devida autorização do fabricante;
- Instalar placas informando a carga máxima permitida por unidade e a carga máxima admitida para o sistema todo.

4.1 Introdução

As colunas normalmente utilizadas nos sistemas *racks* são compostas por perfis formados a frio e apresentam seções monossimétricas sujeitas a cargas axiais combinadas a momentos em torno dos eixos principais (Davies et al., 1997). De uma maneira geral, possuem perfurações que auxiliam no encaixe das ligações com os demais elementos do sistema. Estes furos são de diversos tamanhos e configurações, o que dificulta a avaliação teórica do comportamento estrutural das colunas. A seguir são apresentadas as especificações do RMI (1997) para o cálculo da capacidade de carga de colunas parâmetros obtidos através do ensaio da coluna curta. Serão mostrados também os procedimentos indicados para realização deste ensaio e as modificações propostas por Sarawit e Peköz (2003) no cálculo da área efetiva de colunas perfuradas. Como a norma brasileira não prevê prescrições para elementos perfurados, será proposta neste capítulo uma formulação que utiliza as especificações da NBR 14762 (2001) e considera os efeitos das perfurações.

4.2 Recomendações do RMI e AISI

A capacidade de carga da coluna, segundo as prescrições do AISI (1996), deve ser calculada conforme equação (4.1).

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

onde:

P_n : carga nominal axial;

A_e : área efetiva, calculada considerando a flambagem local;

F_n : tensão nominal de flambagem, obtida considerando-se as propriedades da área bruta, a tensão de escoamento especificada pelo fabricante e a menor tensão de flambagem elástica.

O AISI indica uma expressão para cálculo da área efetiva de perfis com furos circulares regulares. Porém, as perfurações das colunas dos sistemas *rack* são normalmente de configurações diversas e geometrias irregulares, impedindo a aplicação dessa formulação e dificultando uma avaliação analítica do problema. Como solução, o RMI sugere a equação (4.2) para determinação da área efetiva de colunas perfuradas, baseada em análises experimentais.

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

onde:

A_e : área efetiva;

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

F_n : tensão nominal de flambagem, obtida considerando-se as propriedades da área bruta, a tensão de escoamento especificada pelo fabricante e a menor tensão de flambagem elástica.

f_{ya} : tensão de escoamento, obtida através do ensaio de caracterização do aço;

$A_{net,mín}$: área líquida mínima, referente ao plano da seção transversal que intercepta o maior número de furos.

De acordo com a equação (4.2) é necessário que se determine o valor do fator redutor de carga. Este parâmetro é obtido através do ensaio da coluna curta e considera os efeitos dos furos na resistência do perfil. O valor de Q é calculado conforme equação (4.3) (RMI, 1997).

$$Q = \frac{P_{ua}}{f_{ya} A_{net,mín}} \quad (4.3)$$

onde:

P_{ua} : carga última média, obtida através do ensaio da coluna curta;

f_{ya} : tensão de escoamento média, obtida através do ensaio de caracterização do aço;

$A_{net,mín}$: área líquida mínima, referente ao plano da seção transversal com maior área furada.

Para uma série de colunas com seções transversais idênticas e diferentes espessuras, pode-se ensaiar apenas as de maior e menor espessura, sendo permitido o uso de interpolação para as colunas de espessuras intermediárias. No entanto, este método somente poderá ser aplicado se a diferença da tensão de escoamento entre as colunas a serem ensaiadas não exceder 25%. Sendo as condições anteriores atendidas, o fator de carga de uma seção com espessura intermediária qualquer será calculado conforme equação:

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

onde:

- Q_{\min} : fator redutor de carga para espessura mínima, obtido através do ensaio da coluna curta;
- Q_{\max} : fator redutor de carga para espessura máxima, obtido através do ensaio da coluna curta;
- t : espessura intermediária qualquer que se deseja determinar o fator redutor de carga.

Sabe-se que a presença de perfurações reduz a capacidade de carga da coluna, assim, entende-se que o fator Q somente terá significado físico se for menor que 1,0 (um). Porém, devido ao acréscimo na tensão de escoamento oriunda da conformação a frio, esse valor poderá superar a unidade. Se isso ocorrer, deve-se considerar esse parâmetro igual a 1,0 (um).

Conforme as prescrições do AISI, para cada grupo de colunas com as mesmas propriedades geométricas, físicas e químicas, deverão ser ensaiados pelo menos três corpos de prova no ensaio da coluna curta e dois no ensaio de caracterização do aço, feito conforme as prescrições do ASTM A370 (1995). Os corpos de prova de um grupo devem ser retirados, preferencialmente, do mesmo lote de fabricação.

O comprimento do corpo de prova (L) para o ensaio da coluna curta deve ser pequeno o suficiente para eliminar os efeitos da flambagem global e longo o bastante para minimizar os efeitos de extremidade na região de aplicação do carregamento. Segundo indicações do AISI, o valor de L deve ser inferior a 20 vezes o raio de giração mínimo e superior ao valor mínimo indicado na Figura 4.1. Esta figura ilustra algumas configurações de furos e seus respectivos comprimentos mínimos para o ensaio da coluna curta.

Para colunas com furos circulares como as mostradas nas Figura 4.1 (b), (g) e (c) será adotado o comprimento da coluna curta (L), maior ou igual a $3W$. Para as colunas indicadas nas Figura 4.1 (d), (e), (f) e (h), com $W < L_p$, o comprimento mínimo será $3L_p$. Para o caso especial, em que as extremidades da coluna possuem influência dos furos, Figura 4.1 (i), deverá ser fabricada uma coluna com seção transversal sem furos nas extremidades, como indicado na Figura 4.1 (j).

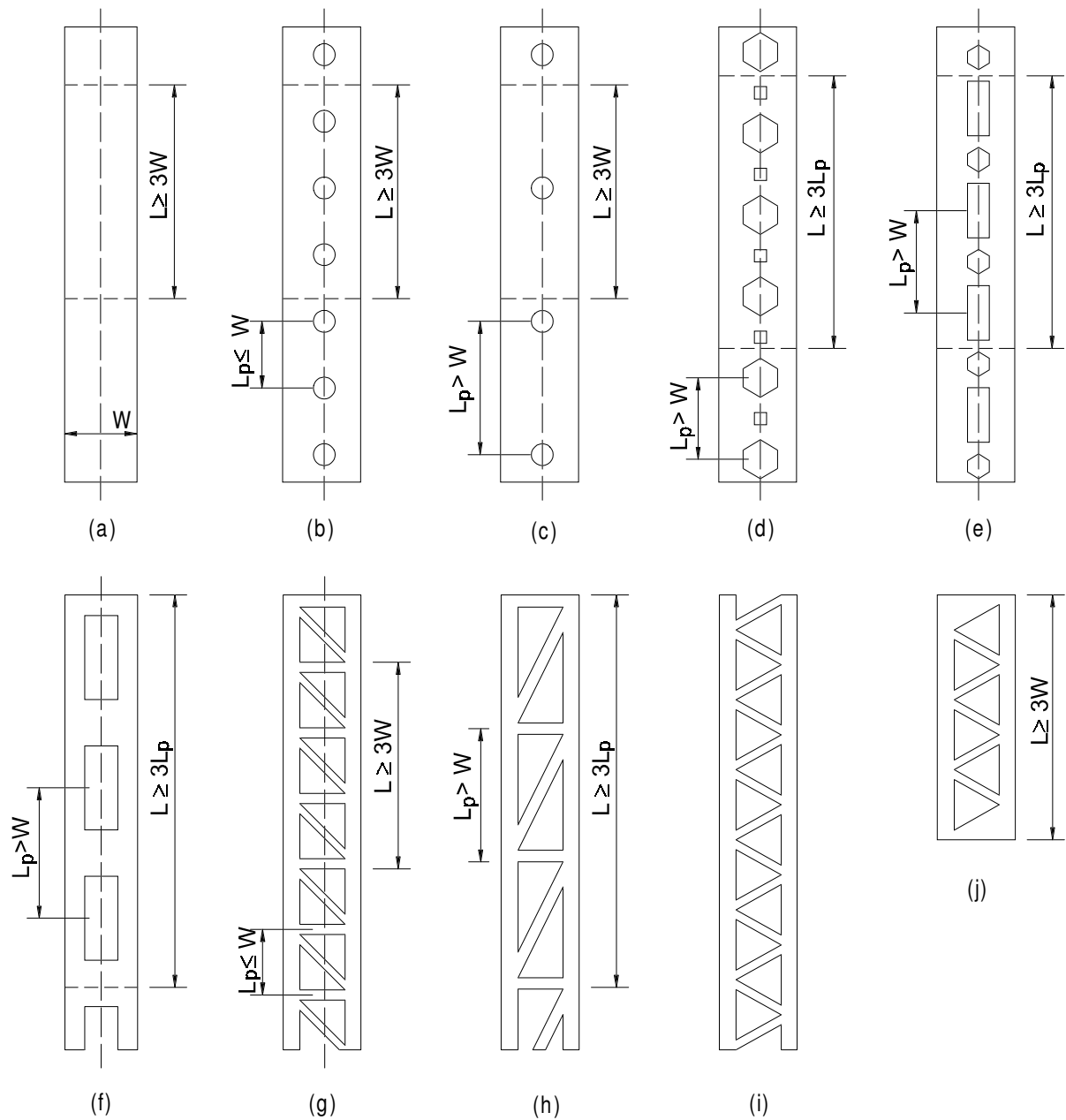


Figura 4.1 – Comprimento mínimo da coluna curta para diferentes configurações de furos, AISI (1996).

Com relação a metodologia de ensaio da coluna curta, cuidados especiais devem ser tomados em relação ao alinhamento vertical do corpo de prova e ao ponto de aplicação de carga, que deverá ser no centro de gravidade da área líquida mínima. Os incrementos de carga durante a realização do ensaio não poderão ser superior a 10% da carga última estimada, nem a tensão de 21 MPa, aplicada na seção transversal, por minuto.

O esquema de montagem do ensaio, segundo recomendação do AISI, está apresentado na Figura 4.2.

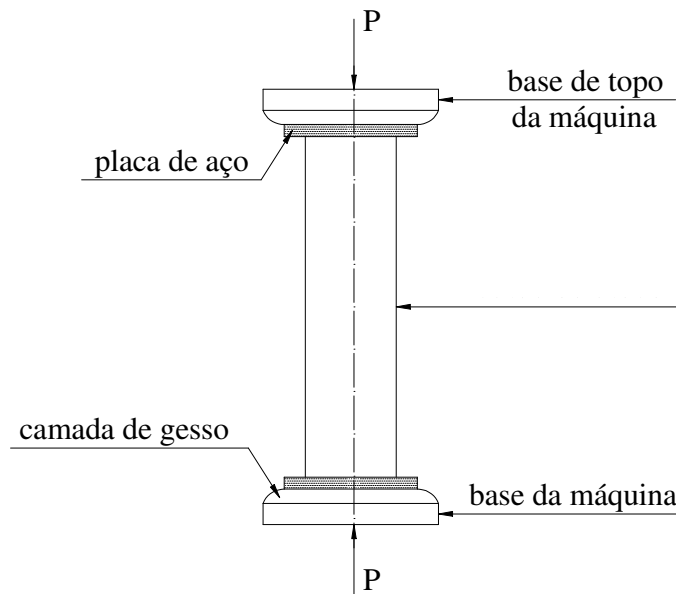


Figura 4.2 – Esquema de montagem do ensaio da coluna curta.

4.3 Formulação proposta por Sarawit e Peköz

Sarawit e Peköz (2003) propuseram modificações na equação indicada pelo RMI para determinação da área efetiva (A_e) de colunas perfuradas, conforme indicado na equação (4.5).

$$A_e = \left[1 - (1 - Q) \left(\frac{F_n}{f_{ya}} \right)^{\frac{Q}{1-Q}} \right] A_{\text{net,mín}} \quad (4.5)$$

Para validação do trabalho os autores fizeram uma comparação entre o uso das formulações propostas, a utilização das equações atualmente indicadas pelo RMI e os resultados obtidos a partir de simulações numéricas do ensaio da coluna curta, feitas através do programa computacional ABAQUS, considerando o método dos elementos finitos. Foram analisados diversos perfis, com e sem furos, de diferentes tamanhos e espessuras, e os resultados foram demonstrados por meio de gráficos, com a relação F_n/f_y na abscissa e P_n/P_y na ordenada, onde:

- F_n : tensão nominal de flambagem, obtida considerando-se as propriedades da área bruta, a tensão de escoamento especificada pelo fabricante e a menor tensão de flambagem elástica.
- f_y : tensão de escoamento do aço;
- P_n : carga nominal axial;
- P_y : carga de escoamento: $P_y = A_{\text{net min}} F_y$.

A seguir são mostrados os resultados encontrados por Sarawit e Peköz, para análise de uma série de colunas perfuradas de seção tubular aberta, cujas dimensões estão ilustradas na Figura 4.3. Tabela 4.1

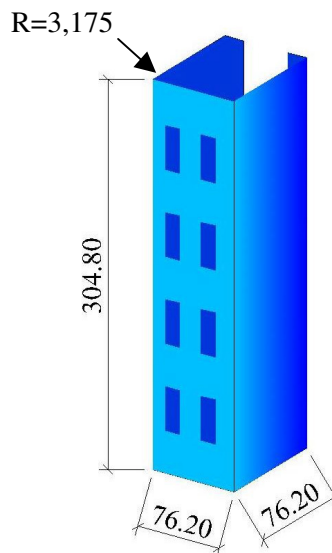


Figura 4.3 – Dimensões, em milímetros, da coluna utilizada no estudo, (Sarawit e Peköz, 2003).

Tabela 4.1 – Espessuras (t) das colunas analisadas por Sarawit e Peköz (2003).

<i>Seção</i>	<i>t (mm)</i>
TBO-1	1.143
TBO -2	1.524
TBO -3	1.753
TBO -4	2.058
TBO -5	2.540
TBO -6	3.124

Foi verificado que os valores obtidos a partir da equação (4.5) apresentaram melhor correlação com os gerados numericamente que aqueles calculados através da equação (4.2). A Figura 4.4 apresenta uma correlação entre a análise numérica e a formulação do RMI, enquanto a Figura 4.5 ilustra a comparação com os resultados da equação proposta.

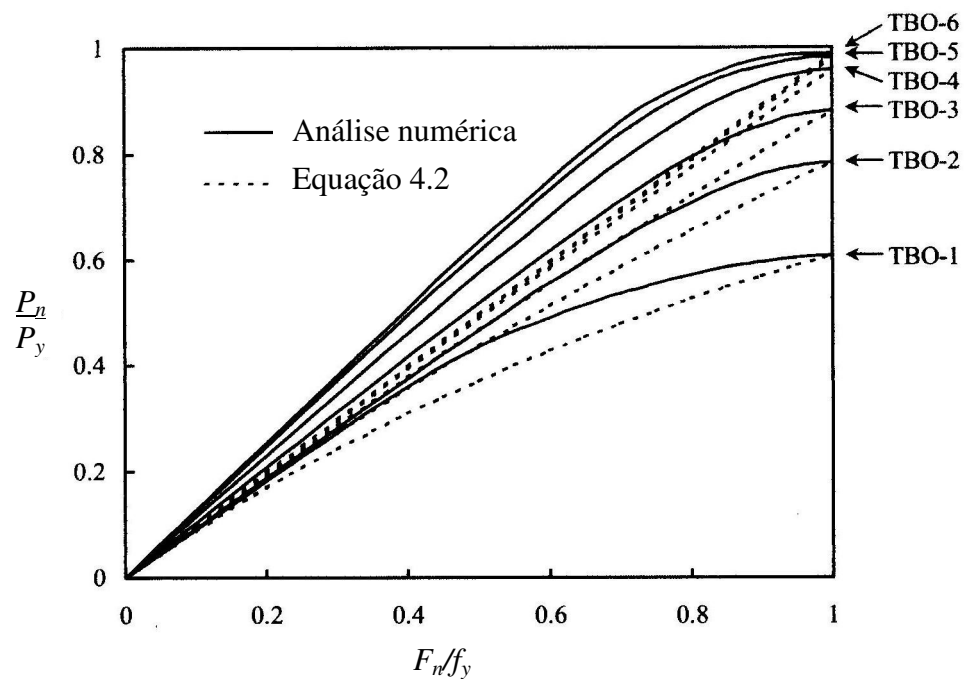


Figura 4.4 – Correlação entre a equação indicada pelo RMI e a análise numérica (Sarawit e Peköz, 2003).

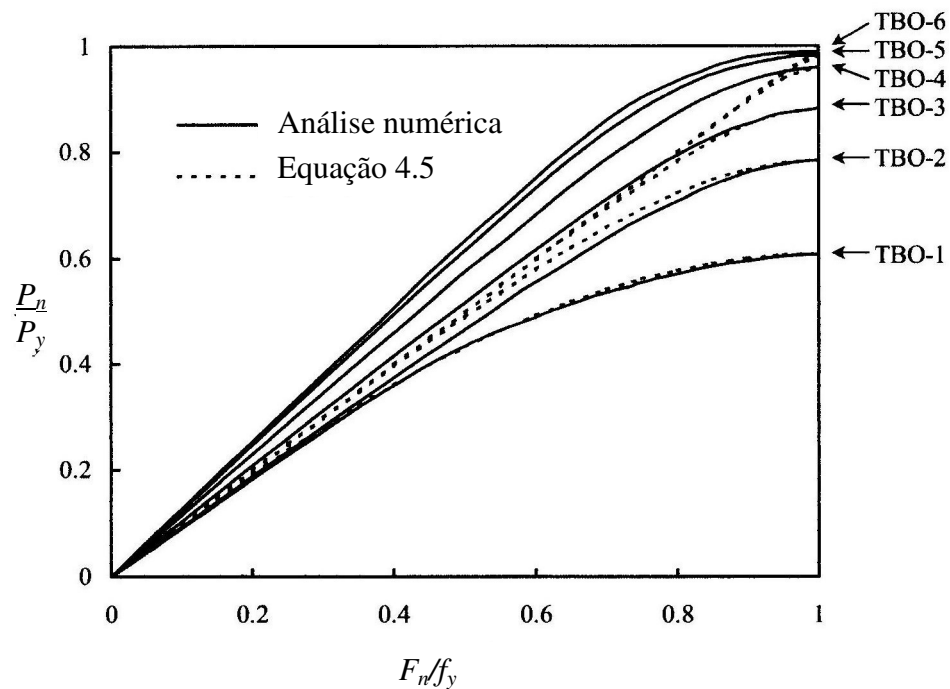


Figura 4.5 – Correlação entre a nova formulação proposta por Peköz e Sarawit e a análise numérica (Sarawit e Peköz, 2003).

4.4 Prescrições indicadas pela norma brasileira de perfis formados a frio – NBR 14762

A NBR 14762 recomenda que sejam feitas duas observações para o cálculo da capacidade resistente (P_n) de colunas submetidas à compressão centrada: a primeira em relação à flambagem por flexão, torção ou flexo-torção e a segunda em relação ao modo distorcional de flambagem. A capacidade resistente nominal deve ser considerada como o menor valor calculado pelas duas considerações.

4.4.1 Flambagem por flexão, torção ou flexo-torção

A capacidade resistente de colunas submetidas à flambagem por flexão, torção ou flexo-torção deve ser calculada por:

$$P_n = \rho A_e f_y \quad (4.6)$$

onde:

P_n : carga nominal axial;

ρ : coeficiente que leva em consideração a flambagem global, obtido através da

equação (4.7) ou pela Tabela 8 da NBR 14762

A_e : área efetiva, calculada considerando a flambagem local.

$$\rho = \frac{1}{\beta + (\beta^2 - \lambda_0^2)^{1/2}} \leq 1,0 \quad (4.7)$$

sendo:

$$\beta = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\lambda_0 - 0,2) + \lambda_0^2]$$

α : fator que considera a influência das tensões residuais.

índice de esbeltez reduzido para barras submetidas a compressão igual a¹:

$$\lambda_0 = \left(\frac{A_e f_y}{N_e} \right)^{1/2}, \text{ onde } N_e \text{ é a força normal de flambagem elástica.}$$

No caso de seções monossimétricas, como a seção *rack* indicada na Figura 4.6, N_e será o menor valor entre a força normal de flambagem elástica em relação ao eixo y (N_{ey}) e a força normal de flambagem elástica por flexo-torção (N_e^{FT}), indicadas pelas equações (4.8) e (4.9), respectivamente.

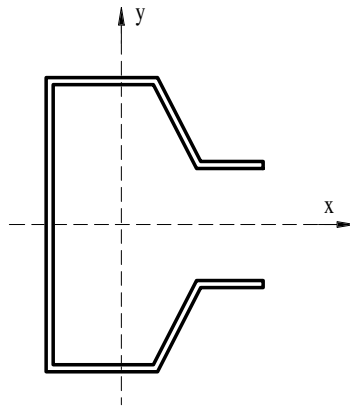


Figura 4.6 – Eixos principais da seção tipo *rack*.

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (4.8)$$

¹ Para simplificação do cálculo de λ_0 , pode-se considerar $A_e = A$.

$$N_e^{FT} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{et}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right] \quad (4.9)$$

onde N_{ex} é a força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo x da Figura 4.6 e N_{et} é a força normal de flambagem elástica por torção, conforme indicado nas equações abaixo.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (4.10)$$

$$N_{et} = \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} + GI_t \right] \frac{1}{r_0^2} \quad (4.11)$$

sendo:

- I_x : momento de inércia em relação ao eixo x ;
- I_y : momento de inércia em relação ao eixo y ;
- I_t : momento de inércia à torção uniforme;
- $K_x L_x$: comprimento de flambagem em relação ao eixo x ;
- $K_y L_y$: comprimento de flambagem em relação ao eixo y ;
- $K_t L_t$: comprimento de flambagem por torção;
- C_w : constante de empenamento;
- E : módulo de elasticidade;
- G : módulo de elasticidade transversal;
- r_0 : raio de giração polar em relação ao centro de torção;
- x_0 : coordenada do centro de torção na direção do eixo x .

4.4.2 Flambagem distorcional

A norma brasileira indica o uso da equação (4.12) para o cálculo da carga normal axial em seções abertas sujeitas à flambagem distorcional.

$$\begin{aligned}
 P_n &= Af_y (1 - 0.25\lambda_{dist}^2) \rightarrow \lambda_{dist} < 1.414 \\
 P_n &= Af_y \{0.055(\lambda_{dist} - 3.6)^2 + 0.237\} \rightarrow 1.414 \leq \lambda_{dist} \leq 3.6
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

onde:

$P_{n,dist}$: carga axial nominal considerando a flambagem distorcional;

A: área bruta da seção transversal;

λ_{dist} : índice de esbeltez reduzido referente à flambagem distorcional: $\lambda_{dist} = (f_y / \sigma_{dist})^{1/2}$, sendo σ_{dist} a tensão crítica de flambagem distorcional, calculada com base na teoria da estabilidade elástica ou conforme Anexo D da NBR 14762.

4.5 Proposição para aplicação da NBR 14762 em elementos perfurados

As especificações do AISI, assim como as formulações do RMI e as equações propostas por Sarawit e Peköz (2003), não consideram o modo distorcional de flambagem, normalmente presente em seções tipo *rack*. No entanto, a norma brasileira, que prevê o cálculo da distorção para essas seções não a influência dos furos na capacidade de carga de colunas perfuradas.

Assim, para considerar a influência das perfurações nos protótipos analisados e, simultaneamente, prever os efeitos do modo distorcional de flambagem são feitas as seguintes proposições:

- Na equação (4.6), a área efetiva (A_e) é calculada considerando a influência dos furos na capacidade de carga, através da equação (4.2), indicada pelo RMI;
- Na equação (4.12), que considera os efeitos da flambagem distorcional, a área bruta (A) é substituída pela área líquida mínima ($A_{net,min}$), considerando assim a presença dos furos na análise.

Capítulo 5 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o programa experimental utilizado no ensaio da coluna curta, envolvendo a definição dos protótipos, o levantamento das imperfeições geométricas dos mesmos, a metodologia de ensaio, a instrumentação, o sistema de aplicação de carga e os mecanismos de aquisição de dados. São apresentados também os valores encontrados para tensão limite de escoamento do aço (f_y), tensão limite de resistência à tração (f_u) e alongamento residual após a ruptura (a), obtidos através de ensaios de tração.

5.2 Características geométricas das colunas

As colunas utilizadas nos ensaios possuem seção transversal do tipo *rack* ou *garrafa*, sendo compostas por alma, flanges, enrijecedores e flanges de ligação, conforme ilustrado na Figura 5.1, onde se observa também uma abertura entre os flanges de ligação, denominada garganta.

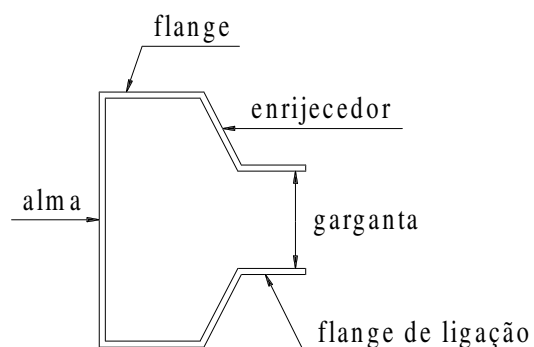


Figura 5.1 – Elementos que compõe as seções tipo *rack* ou *garrafa*.

As colunas ensaiadas foram fabricadas pela Águia Sistemas de Armazenagem Industrial Ltda, que atribui uma nomenclatura comercial às colunas em função das dimensões das seções, agrupando-as como *midi*, *maxi* e *super maxi*. Na Tabela 5.1 tem-se as dimensões nominais das seções transversais, classificadas segundo agrupamento citado. A nomenclatura utilizada está representada na Figura 5.2.

Tabela 5.1 – Dimensões nominais das seções tipo *midi*, *maxi* e *super maxi*.

<i>Dimensões Nominiais (mm)</i>	<i>Midi</i>	<i>Maxi</i>	<i>Super Maxi</i>
Lt (mm)	54,0	68,0	84,0
L1 (mm)	76,0	84,0	94,0
L2 (mm)	30,0	34,0	50,0
L3 (mm)	4,0	12,0	13,0
L4 (mm)	20,0	21,0	21,0
L5 (mm)	32,0	32,0	32,0
L6 (mm)	22,0	26,0	31,0
L7 (mm)	22,4	28,6	33,6

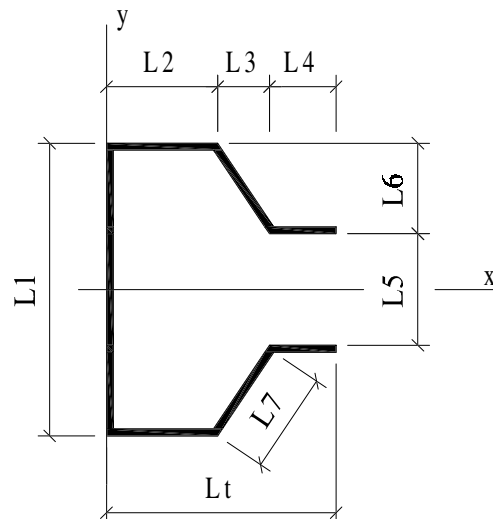


Figura 5.2 – Nomenclatura adotada para identificação das dimensões.

Apenas as colunas com furos são utilizadas comercialmente pela fabricante. No entanto, para uma melhor avaliação da influência das perfurações na capacidade de carga foram solicitadas colunas sem furos, ou seja, que não passaram pelo processo de estampagem.

5.3 Quantidade e comprimentos dos protótipos

O procedimento adotado para determinação do comprimento e quantidade dos protótipos foi o indicado pelo AISI (1996), conforme descrito no item 4.2. Para a seqüência de perfurações dos perfis analisados o comprimento deve ser superior a $3W$, onde W é a largura da maior

dimensão do perfil, e inferior a 20 vezes o raio de giração mínimo, tendo sido encontrados os valores representados na Figura 5.3. Além de atender ao comprimento mínimo especificado pelo AISI, foi preciso evitar a presença de perfurações nas extremidades das colunas para não precipitarem efeitos localizados durante o carregamento.

No caso dos perfis analisados os limites para o comprimento de colunas sem furos coincidem com os limites das colunas com furos. Assim, os valores adotados para as colunas sem furos são os mesmos indicados na Figura 5.3.

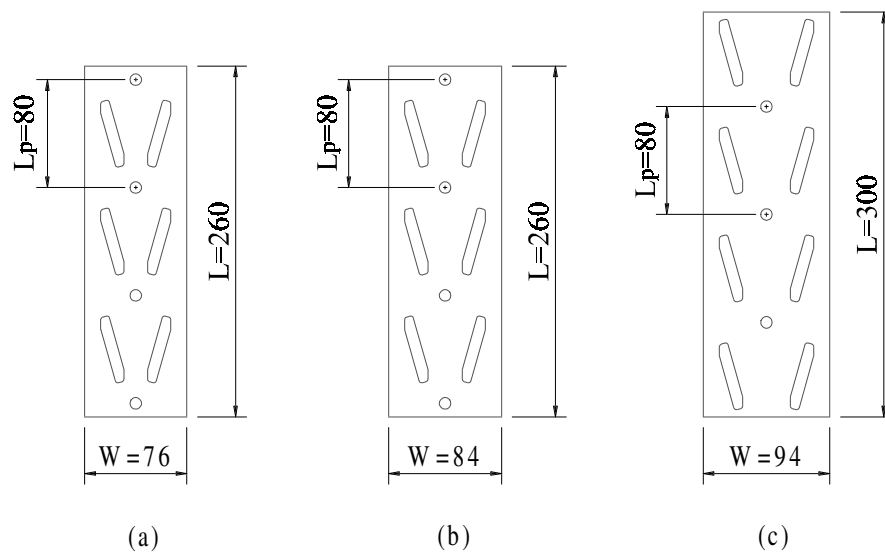


Figura 5.3 – Comprimento dos protótipos com e sem furos:

a) seção *midi*; b) seção *maxi*; c) seção *super maxi*.

Segundo as recomendações do AISI, para cada grupo de colunas com as mesmas propriedades geométricas, físicas e químicas os ensaios devem ser realizados de modo a obter no mínimo três valores de carga de ruptura (P_u) com dispersão máxima de 10%. Para atender a essa especificação foram ensaiadas 36 colunas com furos e 28 colunas sem furos, totalizando 64 ensaios experimentais. Na Tabela 5.2 tem-se os valores das colunas classificadas como *midi*, *maxi* e *super maxi* para diferentes espessuras. Ressalta-se que a classificação obedece as dimensões de seção segundo Tabela 5.1 e Figura 5.2.

A princípio, pretendia-se realizar ensaios experimentais em colunas *maxi*, de espessura 2,25 mm, sem furos. No entanto, em função de problemas no fornecimento do material, não foi possível a realização dos mesmos.

Tabela 5.2 – Quantidade dos protótipos analisados.

<i>Tipo de Seção</i>	<i>Espessura Nominal (mm)</i>	<i>Quantidade de protótipos</i>	
		<i>Com furos</i>	<i>Sem furos</i>
Midi	2,00	6	3
Midi	2,25	4	4
Maxi	2,00	4	3
Maxi	2,25	3	-
Maxi	2,65	3	3
Super Maxi	2,00	3	4
Super Maxi	2,25	4	4
Super Maxi	2,65	6	4
Super Maxi	3,00	3	3
TOTAL	-	36	28

5.4 Identificação dos protótipos

Uma nomenclatura própria para este trabalho foi utilizada a fim de facilitar a identificação das colunas, no qual os dois primeiros caracteres indicam se a seção é do tipo *midi*, *maxi* ou *super maxi*; o terceiro é uma numeração que varia de 1 a 4 e representa a espessura das paredes; as letras *C* ou *S* indica se a coluna é com ou sem furos e o último numero é referente ao protótipo ensaiado. Na Figura 5.4 tem-se o exemplo da coluna MI1C1 que corresponde ao protótipo 1 da coluna *midi* de espessura 2,00mm com furos. Na mesma figura observam-se as possíveis variações de cada caractere.

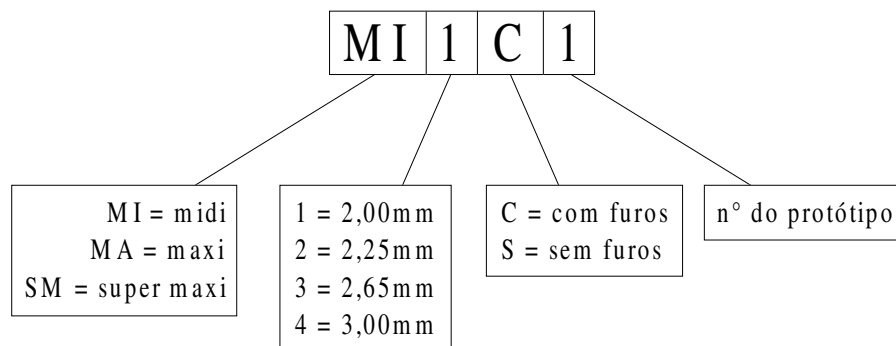


Figura 5.4 – Exemplo da nomenclatura adotada para os protótipos.

5.5 Imperfeições geométricas

A primeira etapa no processo de fabricação dos perfis utilizados nos ensaios experimentais é a estampagem, ou seja, a execução dos furos nas chapas planas. Em seguida é iniciado o processo de conformação a frio que, nos caso dos perfis analisados, foi feito de modo contínuo e gradual, através de mesa de roletes. Neste processo a chapa de aço desloca entre pares de roletes, que conferem sucessivas dobras ao perfil até a obtenção da seção final desejada (Yu, 1991).

Tanto os processos de estampagem quanto de dobragem adicionam tensões residuais e imperfeições geométricas aos perfis. As tensões reais foram obtidas através do ensaio de caracterização do aço, que será apresentado no item 5.10 e as imperfeições geométricas foram identificadas através do controle dimensional das peças, cujos valores estão indicados no ANEXO I. Neste trabalho as medidas chamadas *medidas diretas* (Figura 5.5b) são aquelas obtidas utilizando paquímetro ou micrômetro e as chamadas *medidas por decalque* (Figura 5.5c) são aquelas obtidas por meio de desenhos das seções transversais das faces superior e inferior de cada protótipo em papel milimetrado.

As medidas foram assim obtidas para avaliar o nível de imperfeições existentes no comprimento, as variações da seção transversal e da espessura. O controle foi realizado a partir do preenchimento de uma tabela, como aquela apresentada na Figura 5.6. Observa-se que as medidas da seção transversal foram realizadas em três posições: 1, 2 e 3, distantes d_1 , d_2 e d_3 , respectivamente, conforme indicado na Figura 5.5a. Foram identificadas ainda as faces 1 e 2, onde foram feitas as medidas por decalque.

Com relação às espessuras, foram obtidas cinco medidas: t_1 , t_2 , t_3 , t_4 e t_5 , retiradas nas posições d_1 , d_2 e d_3 . Os valores que não estão indicados na tabela estavam fora do alcance do instrumento de medida.

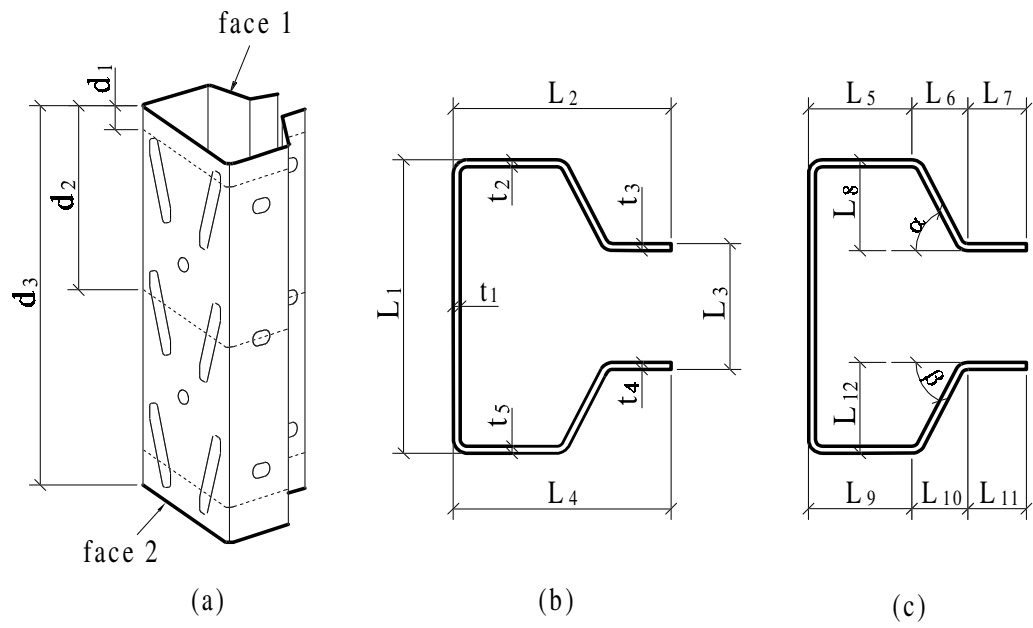
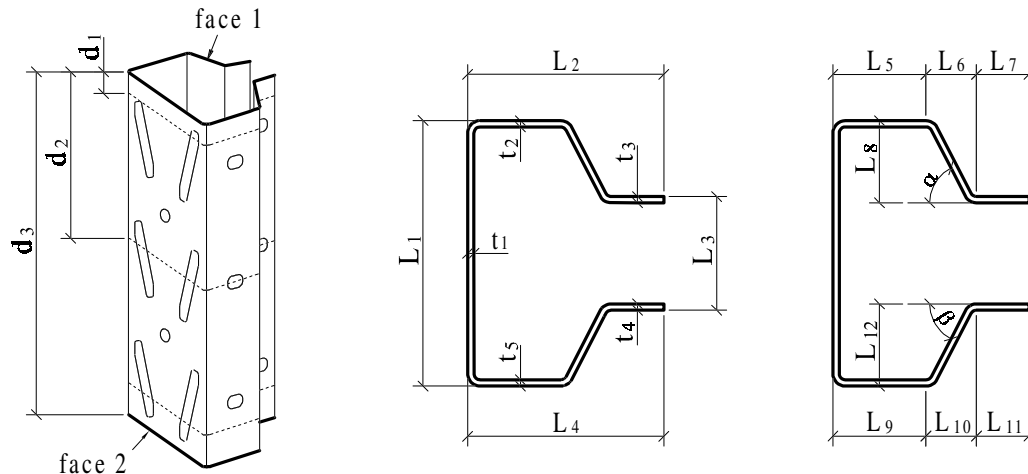


Figura 5.5 - Nomenclatura usada no controle dimensional: a) posições d_1 , d_2 e d_3 ; b) medidas diretas, c) medidas por decalque.

Figura 5.6 – Exemplo do controle dimensional feito nos protótipos.

IDENTIFICAÇÃO DO PROTÓTIPO: MI1C3													
MEDIDAS DIRETAS (mm)										DECALQUE (mm)			
POSIÇÃO	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅		face 1	face 2	Média
D1 = 20	76.80	53.85	40.30	53.80	1.95	1.95	1.98	1.98	2.15	L ₅	23.00	23.00	23.00
	76.55	53.80	40.30	53.85	1.99	1.94	1.96	1.98	2.12	L ₆	13.00	13.00	13.00
Média:	76.68	53.83	40.30	53.83	1.97	1.95	1.97	1.98	2.14	L ₇	18.00	18.00	18.00
D2 = 20	76.65	53.45	39.75	53.75	1.97	2.18	2.00	2.00	1.98	L ₈	18.50	18.50	18.50
	76.50	53.50	39.70	53.70	1.96	1.98	1.97	1.98	1.96	L ₉	23.00	22.00	22.50
Média:	76.58	53.48	39.73	53.73	1.97	2.08	1.99	1.99	1.97	L ₁₀	15.00	14.00	14.50
D3 = 130	76.65	53.35	38.90	53.55	-	-	2.01	1.96	-	L ₁₁	16.50	17.50	17.00
	76.60	53.35	38.85	53.55	-	-	1.98	2.00	-	L ₁₂	19.00	19.50	19.25
Média:	76.62	53.48	39.73	53.73	-	-	2.00	1.98	-	α (°)	71.57	69.14	70.36
Comprimento da coluna (L):					260.20	260.08	260.40	260.18	260.00	β (°)	67.75	68.20	67.98

Obs: As dimensões das seções transversais indicadas abaixo são referentes à face 1.



5.6 Análise pelo método dos elementos finitos

A fim de se obter uma prévia do comportamento estrutural da coluna e nortear o posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência (descritos no item 5.7) foram realizadas simulações numéricas do ensaio, utilizando o método dos elementos finitos.

As análises foram feitas através do programa computacional ANSYS (2001), considerando a coluna, a placa de base e a rótula, além da superfície de contato entre elas. A Figura 5.7 ilustra a malha utilizada.

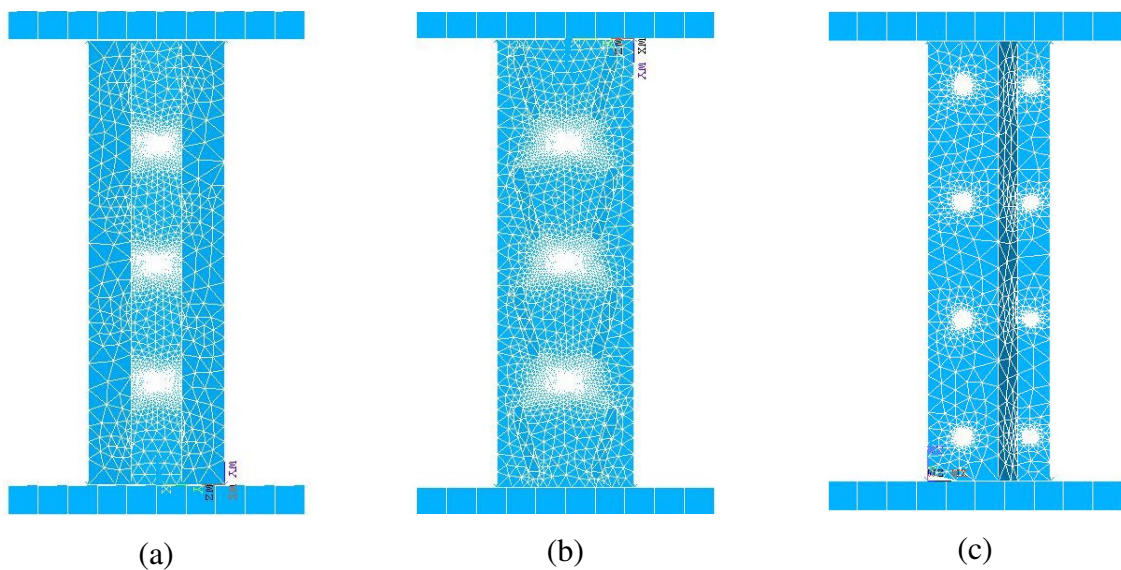


Figura 5.7 – Malha utilizada na análise pelo método dos elementos finitos: a) vista frontal; b) vista posterior; c) vista lateral.

Os elementos utilizados na análise numérica foram: elemento de casca SHELL43 para as paredes da coluna; elementos de sólido SOLID45 para a placa de base e rótula; e elemento de contato CONTACT49 para os elementos de contato entre a coluna e a placa de base e entre a coluna e a rótula. A escolha destes elementos foi baseada nos estudos de Davies (1997) e suas características são apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Características dos elementos.

<i>Elemento</i>	<i>Shell43</i>	<i>Solid45</i>	<i>Contact49</i>
Descrição do elemento	Elemento de casca plástico	Elemento de sólido 3D	Elemento de contato 3D ponto e superfície
Número de nós	4	8	5
Graus de liberdade	Translação e rotação em torno de x,y e z	Translação em x, y e z	Translação em x, y e z

Para impedir que houvesse deformações na placa de base e na rótula elas foram consideradas como sendo muito rígidas, com módulo de elasticidade igual a 20000GPa e para uma melhor representação das condições de ensaio, a placa inferior teve todos os deslocamentos restringidos, enquanto que a rótula teve apenas o deslocamento no sentido axial da coluna liberado (Souza, 2005).

A Figura 5.8 ilustra a distribuição das tensões de von Mises para a análise de um coluna *super maxi* de espessura 2mm. Pode-se observar que a concentração de tensões ocorreu nas regiões próximas aos furos.

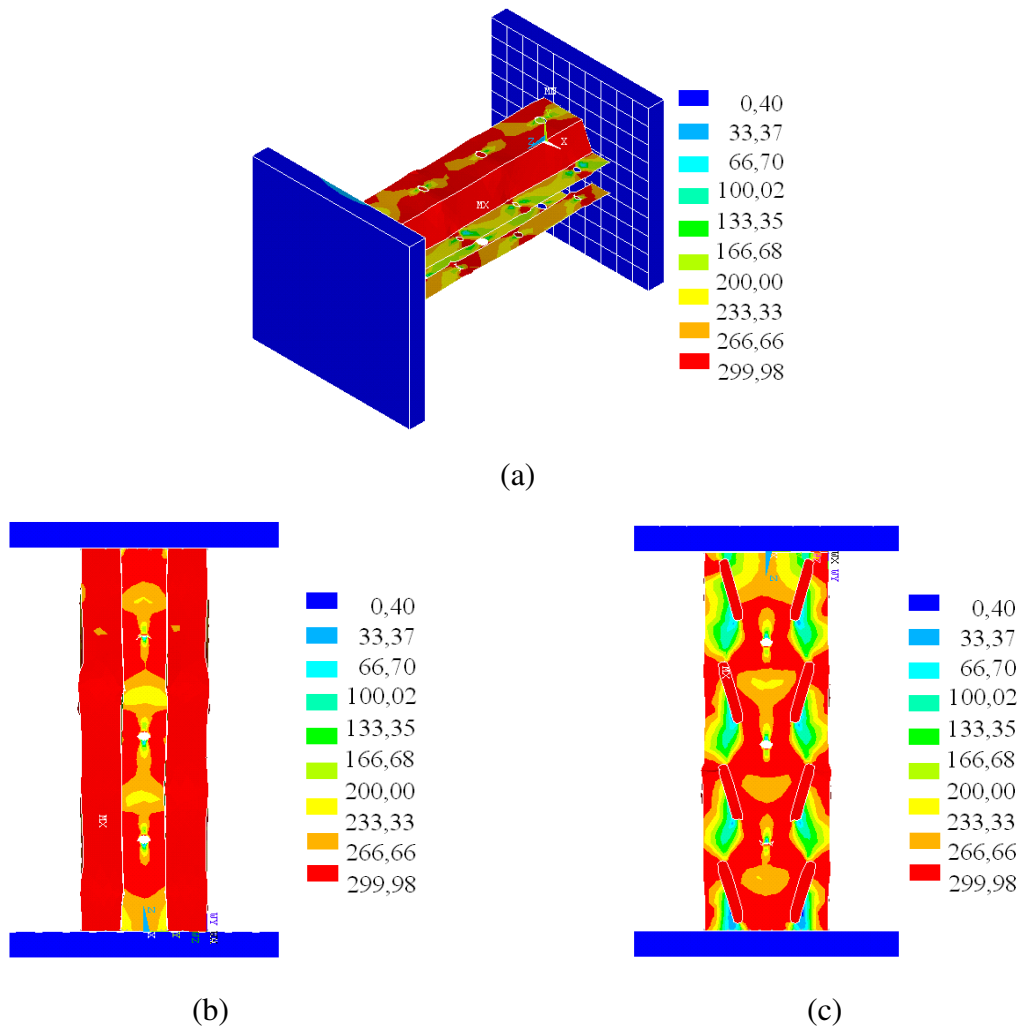


Figura 5.8 – Distribuição das tensões de Von Mises obtidas na análise numérica da coluna *super maxi* ($t=2\text{mm}$): a) vista isométrica; b) vista frontal (flanges); c) vista posterior (alma).

5.7 Instrumentação

Para um melhor acompanhamento das deformações nas colunas durante a realização dos ensaios foram instalados extensômetros elétricos de resistência na alma e nos flanges de ligação.

Para evitar a influência das regiões de aplicação de carga (extremidades do perfil), os extensômetros foram posicionados na altura média, conforme indicado na Figura 5.9, referente às colunas *midi* e *maxi* com furos.

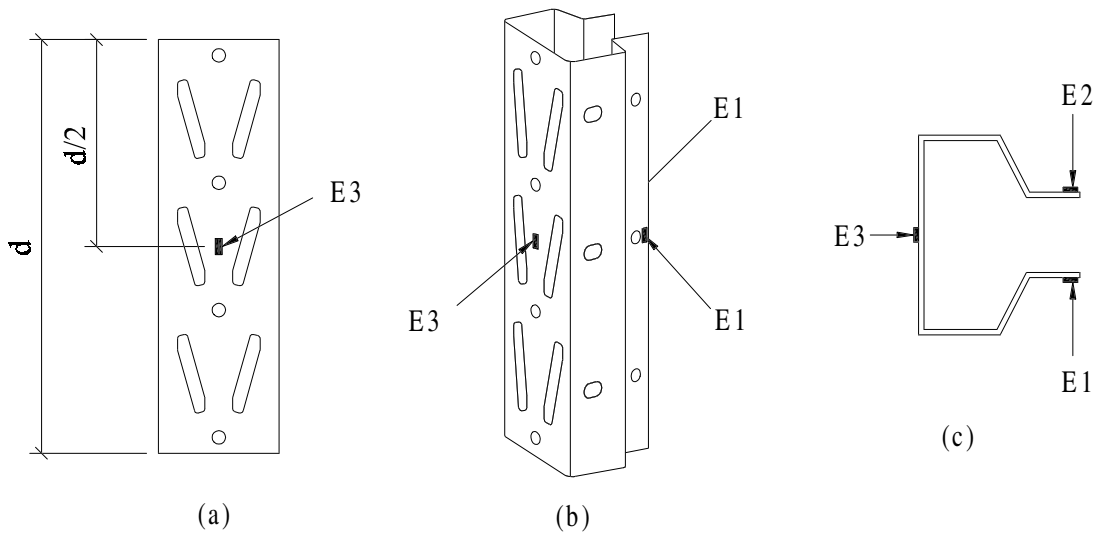


Figura 5.9 – Posicionamento dos extensômetros nas colunas *medi* e *maxi* com furos:
 a) vista frontal; b) vista tridimensional; c) seção transversal.

Nas colunas *super maxi*, onde as perfurações não permitiram a fixação na altura média, o extensômetro da alma do perfil ($E3$), foi deslocado para o centro entre os dois furos circulares, como ilustrado na Figura 5.10.

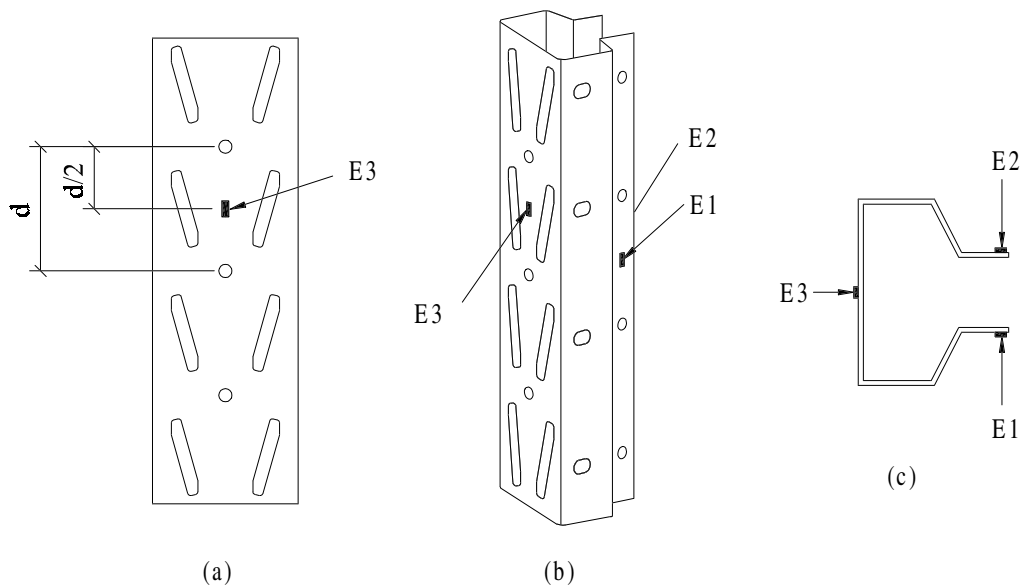


Figura 5.10 - Posicionamento dos extensômetros nas *super maxi* com furos:
 a) vista frontal; b) vista tridimensional; c) seção transversal.

De maneira similar, foram fixados três extensômetros em cada coluna sem furos, sendo um na alma e dois nos flanges de ligação, todos localizados na altura média. A Figura 5.11 ilustra a

posição dos extensômetros $E1$, $E2$ e $E3$ para as colunas com e sem furos de seções *midi*, *maxi* e *super maxi*.

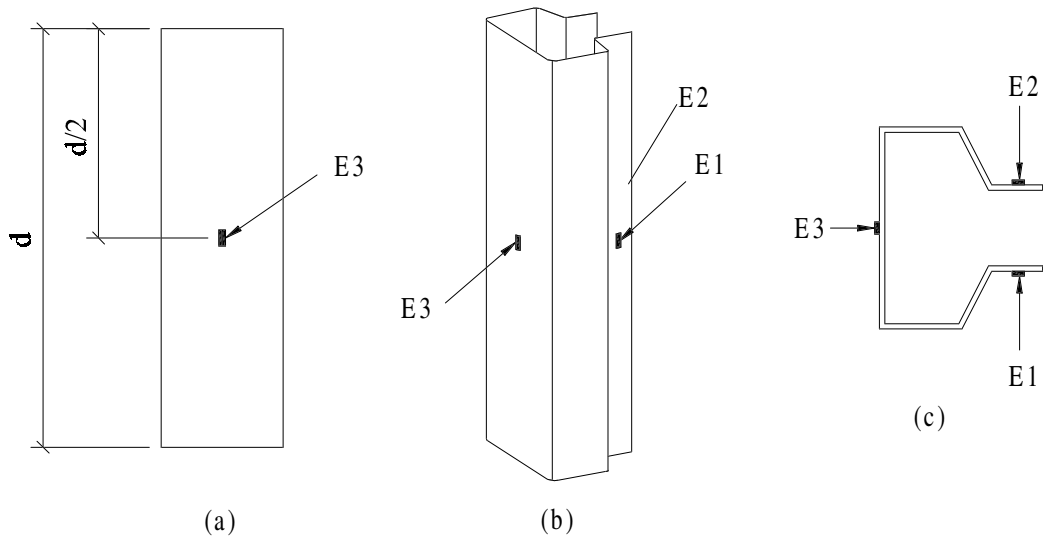


Figura 5.11 - Posicionamento dos extensômetros nas colunas *midi*, *maxi* e *super maxi* sem furos: a) vista frontal; b) vista tridimensional; c) seção transversal.

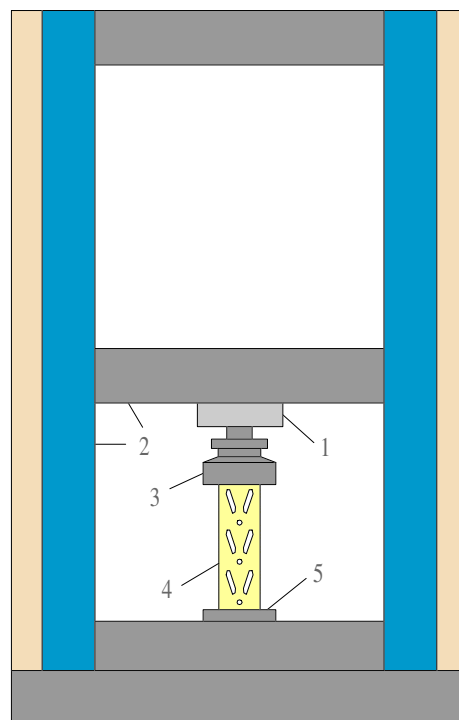
Os extensômetros utilizados são da marca *Kyowa*, podendo ser modelo *KFG-2-120-C1-11*, com comprimento de grade igual a 2mm, ou modelo *KFG-5-120-C1-11*, com comprimento de grade igual a 5mm, conforme espaço disponível para fixação.

5.8 Sistema de aplicação de carga e aquisição de dados

A aplicação de carga no ensaio da coluna curta foi feita através da máquina universal modelo *DL 30000*, fabricada pela *EMIC*, com capacidade de carga igual a 300kN, indicada na foto da Figura 5.12. Os elementos observados na foto são identificados no esquema da Figura 5.13.



Figura 5.12 – Foto do equipamento utilizado na aplicação de carga.



Legenda:

- 1 - célula de carga
- 2 - quadro de reação
- 3 - rótula
- 4 - protótipo
- 5 - placa de base

Figura 5.13 – Vista esquemática da montagem do ensaio.

A armazenagem de dados, visualização do carregamento e controle da taxa de incremento de carga foram realizados através do programa de automação de ensaios *Tesc*. Este programa envia informações para a máquina universal *EMIC* para que a mesma possa realizar os ensaios e, no sentido inverso, recebe informações do equipamento e converte em resultados de ensaios.

O mecanismo de aquisição dos dados da extensometria utilizado foi o *Spider8-600Hz*, da marca HBM (*Hottinger Baldwin Messtechnik*). Trata-se de um sistema eletrônico de medição que se destina à medição elétrica de variáveis mecânicas tais como deformação, força, pressão, percurso, aceleração e temperaturas (HBM, 2003). A Figura 5.14 ilustra o módulo deste sistema.

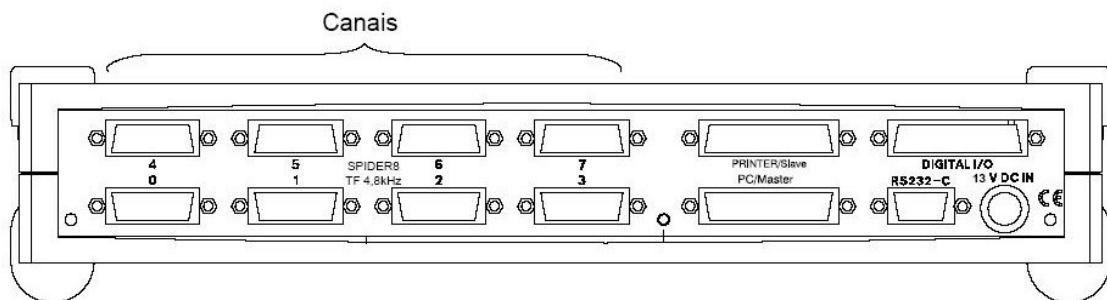


Figura 5.14 – Vista esquemática do *Spider* (HBM, 2003).

Através da associação do *Spider* com o *software CatMan Express V3.1* foi possível controlar a aquisição de dados, visualizar os valores instantaneamente e a armazenar os dados obtidos.

5.9 Metodologia

Os ensaios foram realizados a partir de incrementos de carga, variando de acordo com o tipo de seção (*midi*, *maxi* ou *super maxi*) e a espessura do perfil. Segundo as recomendações do AISI, a taxa de incremento de carga aplicada durante o ensaio da coluna curta não pode ser superior a 10% da carga última estimada, nem a tensão de 21 MPa, aplicada na seção transversal, por minuto. A Tabela 5.4 indica a velocidade de carregamento considerada nos ensaios para os diferentes tipos de corpos de prova.

Tabela 5.4 – Taxa de incremento de carga.

COLUNAS PERFURADAS			COLUNAS SEM FUROS		
Seção	Espessura Nominal (mm)	Velocidade (N/s)	Seção	Espessura Nominal (mm)	Velocidade (N/s)
Midi	2,00	75	Midi	2,00	100
Midi	2,25	85	Midi	2,25	115
Maxi	2,00	85	Maxi	2,00	120
Maxi	2,25	100	Maxi	2,25	-
Maxi	2,65	115	Maxi	2,65	155
Super Maxi	2,00	110	Super Maxi	2,00	145
Super Maxi	2,25	125	Super Maxi	2,25	160
Super Maxi	2,65	145	Super Maxi	2,65	190
Super Maxi	3,00	170	Super Maxi	3,00	215

O posicionamento das colunas seguiu as recomendações do AISI, fazendo com que o centro da máquina coincidissem com o centro de gravidade da seção transversal da área líquida mínima, $A_{net,min}$ (Figura 5.15), correspondente ao plano transversal que intercepta o maior número de furos. Para auxiliar na centralização, foram feitos gabaritos com a posição da seção transversal em relação ao centro da máquina. Além disso, as colunas instrumentadas sofreram ajustes iniciais de modo que a diferença máxima entre as deformações dos 3 EER's na fase elástica fosse de 10%.

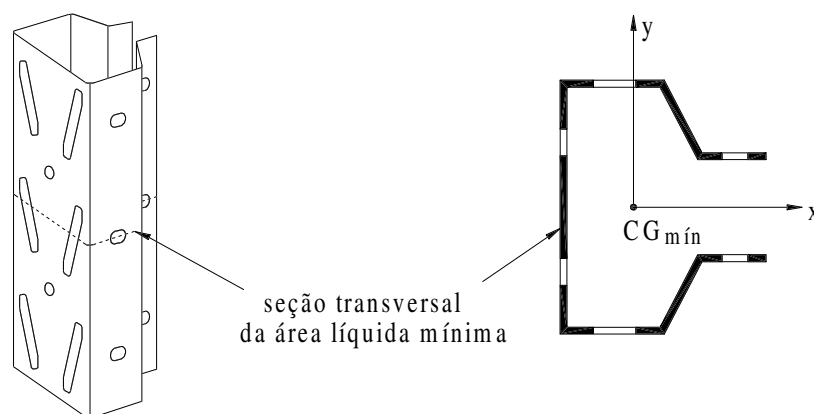


Figura 5.15 – Indicação da seção transversal correspondente a área líquida mínima ($A_{net,min}$) e do centro de gravidade mínimo (CG_{min}).

5.10 Ensaio de caracterização do aço

A determinação da tensão limite de escoamento do aço (f_y) e tensão limite de resistência à tração (f_u) foi feita através de ensaios de tração, conforme indicado pela *American Society for Testing and Material* (ASTM, 1995). Para cada lote de colunas com e sem furos foram extraídos quatro corpos de prova, cuja geometria está indicada na Figura 5.16.

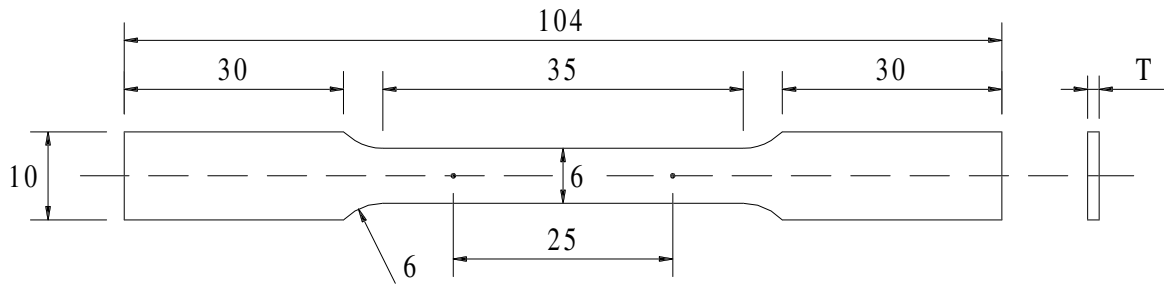


Figura 5.16 – Nomenclatura utilizada na geometria dos corpos de prova para o ensaio de caracterização do aço.

Os corpos de prova foram retirados dos enrijecedores das colunas com furos e dos flanges das colunas sem furos, conforme esquematizado na Figura 5.17.

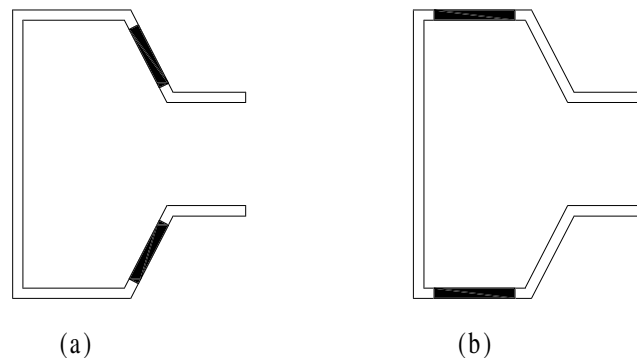


Figura 5.17 – Posição de retirada dos corpos de prova: a) colunas com furos;
b) colunas sem furos.

Os ensaios foram efetuados na mesma máquina utilizada para o ensaio da coluna curta. Os valores médios encontrados para tensão limite de escoamento (f_y), tensão limite de resistência à tração (f_u) e alongamento residual após a ruptura do aço (a) estão indicados na Tabela 5.5 de acordo com o tipo da seção e a espessura nominal (t).

Tabela 5.5 – Valores médios encontrados para f_y , f_u e a .

<i>Seção</i>		t (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	a (%)
Midi	com furos	2,00	472,56	536,32	20,31
Midi	sem furos	2,00	377,76	471,95	30,77
Midi	com furos	2,25	485,56	525,69	18,25
Midi	sem furos	2,25	426,77	542,82	25,50
Maxi	com furos	2,00	398,07	488,71	32,65
Maxi	sem furos	2,00	476,40	561,24	17,85
Maxi	com furos	2,25	434,85	539,21	21,65
Maxi	sem furos	2,25	-	-	-
Maxi	com furos	2,65	345,73	494,69	27,10
Maxi	sem furos	2,65	454,88	548,99	17,58
Super Maxi	com furos	2,00	418,98	527,53	18,55
Super Maxi	sem furos	2,00	443,70	513,21	17,68
Super Maxi	com furos	2,25	413,59	516,21	18,72
Super Maxi	sem furos	2,25	408,20	495,39	17,21
Super Maxi	com furos	2,65	395,97	552,19	19,40
Super Maxi	sem furos	2,65	446,38	556,86	17,51
Super Maxi	com furos	3,00	349,02	504,38	25,24
Super Maxi	sem furos	3,00	405,15	532,08	24,60

Observa-se que, considerando as espessuras e valores nominais especificados pelo fabricante e as tensões de escoamento e última obtidas no ensaio de caracterização, têm-se os tipos de aço com os seguintes valores característicos:

Tabela 5.6 – Tipos de aço especificados pelo fabricante.

<i>Tipo do aço</i>	<i>Grau</i>	f_y (MPa)	f_u (MPa)	$a_{mín}$ (%)
ASTM A570	GR36	250	365	21
	GR45	310	415	18

A partir dos resultados obtidos no ensaio de caracterização tem-se que a maioria se insere no aço de valor nominal igual a 310MPa, exceto para as seções *midi* com 2,00mm de espessura, *maxi* 2,65mm e *super maxi* 3,00mm, ambas com furos.

De um modo geral, são observadas variações entre as tensões de escoamento e última para seções com e sem furos, caracterizando assim a influência das perfurações no comportamento

mecânico do material. No entanto, no caso das seções tipo *maxi*, esse valores não devem ser comparados, visto que, pelos resultados dos ensaios de caracterização, as chapas de aço utilizadas na fabricação dos perfis são de tipos diferentes.

Capítulo 6 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 Introdução

Neste capítulo têm-se a apresentação e análise dos valores da carga última experimental de ruptura, do fator redutor de forma e das áreas efetivas calculadas segundo especificações do RMI (1997) e de Sarawit e Peköz (2003). Além disso, são comparadas as cargas nominais calculadas para colunas com furos, conforme indicado pelo RMI, Sarawit e pela proposição feita para NBR 14762 (item 4.5); e para colunas sem furos, utilizando especificações do AISI (1996) e NBR 14762. Em seguida, são apresentadas e analisadas as deformações dos extensômetros utilizados nos ensaios experimentais.

6.2 Dimensões geométricas das seções

Foram calculados os valores médios das dimensões reais dos protótipos, obtidas segundo metodologia apresentada no item 5.5. Estas medidas, que serão posteriormente utilizadas nas comparações dos resultados teóricos com os experimentais, são apresentadas nas tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 para as seções tipo *medi*, *maxi* e *super maxi*, respectivamente. Os valores estão expressos em milímetro e seguem a nomenclatura indicada na Figura 6.1.

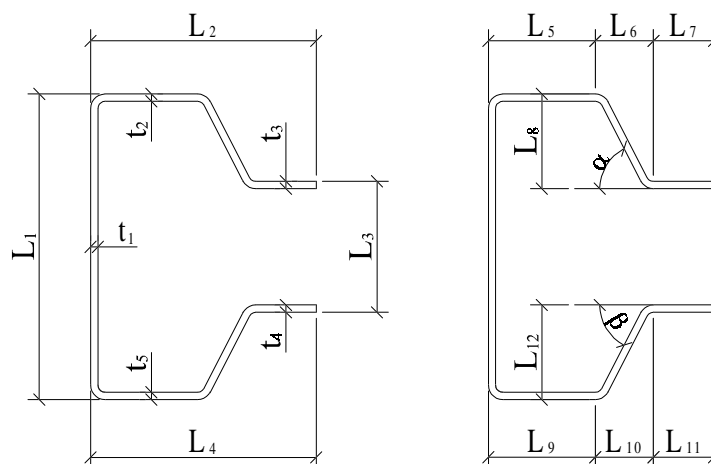


Figura 6.1 – Nomenclatura para identificação das dimensões.

Tabela 6.1 – Valores médios das medidas reais das seções tipo *midí*.

<i>Coluna</i>	<i>L</i>	<i>L₁</i>	<i>L₂</i>	<i>L₃</i>	<i>L₄</i>	<i>L₅</i>	<i>L₆</i>	<i>L₇</i>	<i>L₈</i>	<i>L₉</i>	<i>L₁₀</i>	<i>L₁₁</i>	<i>L₁₂</i>	<i>t</i>	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
MI1C3	260,17	76,62	53,59	39,92	53,76	24,00	13,00	16,25	19,00	24,50	12,00	18,00	18,75	2,00	67,28	67,28
MI1C5	259,96	76,65	53,65	40,10	53,71	23,00	13,00	18,00	18,50	22,50	14,50	17,00	19,25	2,01	70,36	70,36
MI1C7	260,05	76,64	53,68	39,91	53,62	23,50	12,00	18,50	18,75	23,50	14,00	16,50	19,00	2,01	68,82	68,82
MI1S1	260,38	76,94	53,39	40,73	53,84	22,50	13,00	18,25	18,75	24,00	13,00	17,00	19,00	2,02	65,30	65,30
MI1S3	260,00	77,29	53,94	41,73	53,63	23,50	12,00	18,50	18,75	24,00	12,00	17,50	18,50	2,02	69,11	69,11
MI1S4	260,30	76,84	53,80	40,79	53,71	24,50	11,50	18,00	18,75	23,50	11,00	19,50	18,25	2,04	65,88	65,88
MI2C2	260,34	77,29	54,13	42,44	54,49	24,00	10,50	19,50	19,00	24,00	12,00	18,00	18,50	2,22	71,96	71,96
MI2C3	260,17	76,20	53,49	40,17	54,06	23,50	13,00	18,50	18,50	23,50	13,00	18,50	18,25	2,22	66,80	66,80
MI2C6	259,86	76,86	54,00	41,06	54,11	23,50	12,00	19,00	18,50	24,00	12,00	19,00	18,25	2,27	67,17	67,17
MI2S2	259,96	77,03	53,90	40,11	53,40	23,50	12,50	18,25	18,25	24,50	12,00	17,50	18,75	2,27	66,80	66,80
MI2S4	260,63	76,94	53,88	40,61	53,63	25,00	11,50	17,50	18,75	24,50	11,00	18,50	18,25	2,27	67,00	67,00
MI2S5	259,63	77,34	53,71	41,26	54,20	24,00	12,00	18,25	18,25	23,50	13,00	17,50	19,25	2,28	67,64	67,64

Tabela 6.2 – Valores médios das medidas reais das seções tipo *maxi*.

<i>Coluna</i>	<i>L</i>	<i>L₁</i>	<i>L₂</i>	<i>L₃</i>	<i>L₄</i>	<i>L₅</i>	<i>L₆</i>	<i>L₇</i>	<i>L₈</i>	<i>L₉</i>	<i>L₁₀</i>	<i>L₁₁</i>	<i>L₁₂</i>	<i>t</i>	α (°)	β (°)
MA1C1	259,62	84,64	64,91	40,05	64,92	29,50	15,50	20,00	23,00	30,50	16,00	19,00	23,00	2,04	61,58	61,58
MA1C3	260,43	84,68	64,65	39,30	64,92	30,00	14,50	20,50	23,00	30,00	15,50	19,50	23,25	2,04	61,82	61,82
MA1C4	259,86	84,61	64,73	38,71	64,63	30,00	15,00	20,00	23,00	30,00	16,00	19,25	23,00	2,05	63,94	63,94
MA1S1	260,15	84,87	64,64	40,84	64,32	29,75	15,00	20,25	23,00	29,75	15,75	19,50	22,75	2,02	62,50	62,50
MA1S2	259,92	84,85	64,78	40,27	64,30	29,25	14,75	20,50	23,00	30,00	14,75	20,00	22,00	2,00	65,13	65,13
MA1S3	260,08	84,90	64,56	43,49	64,36	28,75	15,25	20,50	23,25	29,50	15,00	20,00	22,50	2,01	60,21	60,21
MA2C1	259,73	85,01	65,87	41,04	65,84	30,00	16,50	25,00	23,00	30,50	16,00	20,00	23,00	2,28	60,19	60,19
MA2C2	260,52	84,48	65,84	40,79	65,84	30,50	15,50	20,50	22,75	30,50	16,50	19,50	23,00	2,29	59,45	59,45
MA2C3	259,93	84,94	65,80	41,05	65,84	29,50	16,50	20,25	22,25	30,00	16,50	20,00	22,75	2,28	59,66	59,66
MA3C2	259,88	84,79	67,40	41,70	67,26	30,00	17,00	20,50	21,50	30,00	17,00	20,75	22,25	2,69	58,87	58,87
MA3C3	260,46	84,93	67,56	41,36	67,34	29,50	17,50	21,00	22,25	30,00	17,50	20,50	22,50	2,69	58,77	58,77
MA3C4	260,37	84,75	67,53	42,00	67,24	30,00	17,00	20,75	22,25	30,00	17,50	20,25	21,50	2,69	58,32	58,32
MA3S2	260,19	85,96	67,28	43,08	67,07	30,00	16,00	21,00	22,00	29,50	17,50	20,75	21,50	2,68	59,30	59,30
MA3S3	261,29	86,34	66,88	42,05	67,05	30,00	17,50	20,00	22,00	30,00	17,00	20,00	22,50	2,71	57,88	57,88
MA3S4	260,42	85,40	66,87	41,76	66,85	31,00	16,00	20,25	22,00	30,00	16,50	20,75	22,25	2,68	57,31	57,31

Tabela 6.3 – Valores médios das medidas reais das seções tipo *super maxi*.

<i>Coluna</i>	<i>L</i>	<i>L₁</i>	<i>L₂</i>	<i>L₃</i>	<i>L₄</i>	<i>L₅</i>	<i>L₆</i>	<i>L₇</i>	<i>L₈</i>	<i>L₉</i>	<i>L₁₀</i>	<i>L₁₁</i>	<i>L₁₂</i>	<i>t</i>	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
SM1C2	299,43	95,24	83,77	45,24	82,81	45,00	17,25	21,00	27,75	44,50	18,50	20,75	26,25	2,06	60,72	60,72
SM1C3	299,48	94,05	82,95	41,53	83,23	45,00	17,75	21,00	27,25	45,00	17,75	20,75	27,50	2,05	61,17	61,17
SM1C4	299,12	93,94	83,01	40,80	83,02	45,00	17,25	21,25	27,50	45,50	17,50	20,75	27,75	2,07	61,43	61,43
SM1S2	300,74	93,63	83,80	42,58	83,57	43,50	19,50	21,00	27,00	45,00	16,75	21,25	27,75	2,06	59,37	59,37
SM1S3	300,34	93,31	83,53	41,33	83,68	44,75	17,50	21,75	26,75	44,75	18,00	21,25	27,00	2,07	60,68	60,68
SM1S5	300,32	93,38	83,60	41,97	83,80	44,50	17,50	21,50	27,00	44,50	17,75	20,75	26,25	2,06	59,80	59,80
SM2C2	301,00	95,07	82,74	42,73	82,93	44,50	17,75	21,25	27,50	44,50	18,00	21,00	27,50	2,34	61,52	61,52
SM2C4	299,20	94,80	83,22	43,48	83,09	44,25	18,25	21,50	27,00	44,50	17,75	21,25	27,00	2,34	61,85	61,85
SM2C5	300,50	95,46	82,91	42,71	82,98	43,50	18,25	21,25	27,75	43,50	18,75	20,75	27,50	2,33	61,80	61,80
SM2S2	300,33	94,62	83,10	40,49	82,70	44,00	17,25	21,00	27,25	44,00	17,25	21,25	27,25	2,32	62,30	62,30
SM2S3	299,92	94,54	83,05	40,07	82,66	44,50	16,75	21,00	27,25	43,50	17,25	21,75	27,50	2,32	61,85	61,85
SM2S4	300,19	94,58	82,44	40,50	82,93	43,00	18,00	21,50	27,25	44,00	17,25	21,00	27,50	2,32	61,25	61,25
SM3C3	299,71	95,23	83,01	42,13	83,06	45,00	17,00	21,50	27,00	45,00	16,75	21,50	27,00	2,61	61,23	61,23
SM3C6	300,02	95,11	83,03	41,86	83,03	44,00	17,50	21,50	27,25	44,50	17,50	21,25	27,25	2,63	61,82	61,82
SM3C8	299,70	95,38	83,08	41,94	82,95	44,00	17,50	21,50	27,50	44,50	17,50	21,00	27,25	2,62	61,88	61,88
SM3S3	300,47	95,41	83,01	43,54	82,91	44,50	17,00	21,50	27,50	45,00	17,00	21,25	27,25	2,68	62,27	62,27
SM3S4	299,92	95,34	82,97	43,02	82,92	44,50	16,50	22,00	27,25	44,50	17,75	21,00	26,75	2,74	61,48	61,48
SM3S5	300,14	95,03	82,83	41,99	82,82	44,50	16,50	22,00	27,25	44,50	17,50	21,00	27,00	2,66	61,82	61,82
SM4C1	299,69	95,13	84,08	42,44	83,57	44,50	17,25	21,25	27,50	44,50	17,00	21,25	27,25	3,01	60,90	60,90
SM4C2	300,54	95,24	83,41	42,36	83,65	45,00	17,25	21,75	27,00	45,00	17,50	21,00	27,25	3,01	61,24	61,24
SM4C4	299,69	95,32	83,69	42,48	83,50	44,00	17,75	22,00	27,00	44,00	18,50	21,00	27,25	3,01	61,20	61,20
SM4S1	299,65	95,10	83,36	42,53	83,24	45,00	17,50	21,25	27,25	45,00	17,50	21,00	27,25	3,06	61,19	61,19
SM4S2	299,92	95,12	83,16	42,44	83,38	44,50	17,25	21,75	27,00	45,00	16,50	22,00	27,00	3,05	61,10	61,10
SM4S3	299,62	95,64	83,12	44,01	83,45	45,00	16,75	21,75	27,00	45,00	17,25	21,25	26,50	3,08	61,65	61,65

6.3 Avaliação da carga última (P_u)

Os ensaios foram realizados de modo a se obter um mínimo de três valores de carga última (P_u) para cada série com dispersão máxima de 10%, conforme especificado pelo AISI (1996). Esses valores são apresentados nas Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6, onde podem ser observados também os valores da dispersão de P_u ; a relação entre P_{uc} (carga última média dos três ensaios das colunas com furos) e P_{us} (carga última média dos três ensaios das colunas sem furos) e os valores das tensões de escoamento obtidos no ensaio de caracterização do aço (f_{ya}), conforme descrito no item 5.10. Para as colunas sem furos com seção *super maxi* e espessura de 3,00mm a carga última não foi obtida devido limitações da capacidade de carga do equipamento.

Observa-se que os valores de dispersão indicados nas três tabelas são inferiores ao limite de 10%. As relações entre as cargas últimas das colunas com e sem furos para as seções tipo *midí* (espessuras de 2,00 e 2,25mm), *maxi* (espessura de 2,00mm) e *super maxi* (espessuras de 2,00; 2,25 e 2,65mm) são menores que 1,0, caracterizando a influência das perfurações na capacidade de carga da coluna. Nas demais seções as relações entre as colunas com e sem furos não foram analisadas porque as cargas de ruptura não foram atingidas ou porque não foi possível realizar os ensaios das colunas sem furos.

Tabela 6.4 – Valores obtidos nos ensaios de colunas com seção tipo *midí*.

<i>Coluna</i>	P_u (kN)	Dispersão de P_u (%)	P_{uc}/P_{us}	f_{ya} (MPa)
MI1C3	96,56	-	-	472,56
MI1C5	99,36	-	-	472,56
MI1C7	100,80	4,39	-	472,56
MI1S1	124,28	-	-	377,76
MI1S3	123,69	-	-	377,76
MI1S4	123,05	0,99	0,80	377,76
MI2C2	138,68	-	-	485,56
MI2C3	134,82	-	-	485,56
MI2C6	139,64	3,45	-	485,56
MI2S2	183,98	-	-	426,77
MI2S4	186,68	-	-	426,77
MI2S5	183,29	1,82	0,75	426,77

Tabela 6.5 – Valores obtidos nos ensaios de colunas com seção tipo *maxi*.

<i>Coluna</i>	P_u (kN)	<i>Dispersão</i> (%)	P_{uc}/P_{us}	f_{ya} (MPa)
MA1C1	101,92	-	-	398,07
MA1C3	102,10	-	-	398,07
MA1C4	103,15	1,21	-	398,07
MA1S1	135,92	-	-	476,41
MA1S2	139,36	-	-	476,41
MA1S3	136,43	2,47	0,75	476,41
MA2C1	142,80	-	-	434,85
MA2C2	144,36	-	-	434,85
MA2C3	143,87	1,08	-	434,85
MA3C2	152,93	-	-	345,73
MA3C3	150,70	-	-	345,73
MA3C4	152,19	1,46	-	345,73
MA3S2	235,89	-	-	454,88
MA3S3	237,38	-	-	454,88
MA3S4	236,65	0,63	0,64	454,88

Tabela 6.6 – Valores obtidos nos ensaios de colunas com seção tipo *super maxi*.

<i>Coluna</i>	P_u (kN)	<i>Dispersão (%)</i>	P_{uc}/P_{us}	f_{ya} (MPa)
SM1C2	137,90	-	-	418,98
SM1C3	142,17	-	-	418,98
SM1C4	143,22	3,71	-	418,98
SM1S2	178,73	-	-	443,70
SM1S3	178,99	-	-	443,70
SM1S5	183,46	2,58	0,78	443,70
SM2C2	178,85	-	-	399,06
SM2C4	182,74	-	-	399,06
SM2C5	187,08	4,40	-	399,06
SM2S2	198,76	-	-	408,20
SM2S3	211,30	-	-	408,20
SM2S4	219,67	9,52	0,87	408,20
SM3C3	205,03	-	-	411,71
SM3C6	211,93	-	-	411,71
SM3C8	210,28	3,26	-	411,71
SM3S3	277,13	-	-	446,38
SM3S4	274,62	-	-	446,38
SM3S5	269,94	2,59	0,76	446,38
SM4C1	216,22	-	-	349,02
SM4C2	223,75	-	-	349,02
SM4C4	217,75	3,37	-	349,02
SM4S1	289,53 ⁽¹⁾	-	-	405,15
SM4S2	289,64 ⁽¹⁾	-	-	405,15
SM4S3	289,49 ⁽¹⁾	-	-	405,15

⁽¹⁾A capacidade de aplicação de carga do equipamento foi atingida.

As fotos das Figuras 6.2 a 6.10 ilustram os protótipos após a realização dos ensaios. Observe que as colunas apresentam afundamento da alma próximo às extremidades e aproximação dos flanges na altura média.



(a)



(b)

Figura 6.2 – Fotos das colunas *medi* 2,00mm após realização dos ensaios:

a) vista frontal (alma); b) vista posterior (flanges).



(a)



(b)

Figura 6.3 – Fotos das colunas *medi* 2,25 mm após realização dos ensaios:

a) vista frontal (alma); b) vista posterior (flanges).



(a)



(b)

Figura 6.4 – Fotos das colunas *maxi* 2,00mm após realização dos ensaios:

a) vista frontal (alma); b) vista posterior (flanges).



(a)



(b)

Figura 6.5 – Fotos das colunas *maxi* 2,25mm após realização dos ensaios:
a) vista frontal (alma); b) vista posterior (flanges).



(a)



(b)

Figura 6.6 – Fotos das colunas *maxi* 2,65mm após realização dos ensaios:
a) vista frontal (alma); b) vista posterior (flanges).



(a)



(b)

Figura 6.7 – Fotos das colunas *super maxi* 2,00mm após realização dos ensaios:
a) vista frontal (alma); b) vista posterior (flanges).



(a)



(b)

Figura 6.8 – Fotos das colunas *super maxi* 2,25mm após realização dos ensaios:

a) vista frontal (alma); b) vista posterior (flanges).



(a)



(b)

Figura 6.9 – Fotos das colunas *super maxi* 2,65mm após realização dos ensaios:

a) vista frontal (alma); b) vista posterior (flanges).



(a)



(b)

Figura 6.10 – Fotos das colunas *super maxi* 3,00mm após realização dos ensaios:

a) vista frontal (alma); b) vista posterior (flanges).

6.4 Avaliação do fator redutor de forma (Q)

Na tabela a seguir têm-se os valores do fator redutor de forma para as colunas com furos, obtidos de acordo com a equação (4.3); e da área líquida mínima ($A_{net,min}$), calculada considerando os valores médios das medidas reais de cada protótipo.

Tabela 6.7 – Valores de Q e $A_{net,min}$.

<i>Coluna</i>	P_u (kN)	f_{ya} (MPa)	$A_{net,min}$ (mm ²)	$Q = \frac{P_u}{f_{ya} \cdot A_{net,min}}$
MI1C3	96,56	472,56	298,82	0,68
MI1C5	99,36	472,56	300,03	0,70
MI1C7	100,80	472,56	298,11	0,72
MI2C2	138,68	485,56	332,52	0,86
MI2C3	134,82	485,56	329,29	0,84
MI2C6	139,64	485,56	336,55	0,85
MA1C1	101,92	398,07	354,14	0,72
MA1C3	102,10	398,07	354,69	0,72
MA1C4	103,15	398,07	355,74	0,73
MA2C1	142,80	434,85	400,84	0,82
MA2C2	144,36	434,85	400,04	0,83
MA2C3	143,87	434,85	396,74	0,83
MA3C2	152,93	345,73	469,18	0,94
MA3C3	150,70	345,73	472,49	0,92
MA3C4	152,19	345,73	467,37	0,94
SM1C2	137,90	418,98	463,21	0,71
SM1C3	142,17	418,98	462,45	0,73
SM1C4	143,22	418,98	467,96	0,73
SM2C2	178,85	399,06	525,49	0,82
SM2C4	182,74	399,06	526,05	0,84
SM2C5	187,08	399,06	521,08	0,87
SM3C3	205,03	411,71	584,52	0,85
SM3C6	211,93	411,71	590,66	0,87
SM3C8	210,28	411,71	590,86	0,86
SM4C1	216,22	349,02	673,61	0,92
SM4C2	223,75	349,02	673,48	0,95
SM4C4	217,75	349,02	675,84	0,92

Foram calculados valores médios de Q para cada grupo de protótipos com mesma tipologia da seção transversal e mesma espessura nominal. A Figura 6.11 ilustra o comportamento deste

parâmetro em função da espessura média (t). Observa-se que o valor de Q cresce conforme a espessura aumenta.

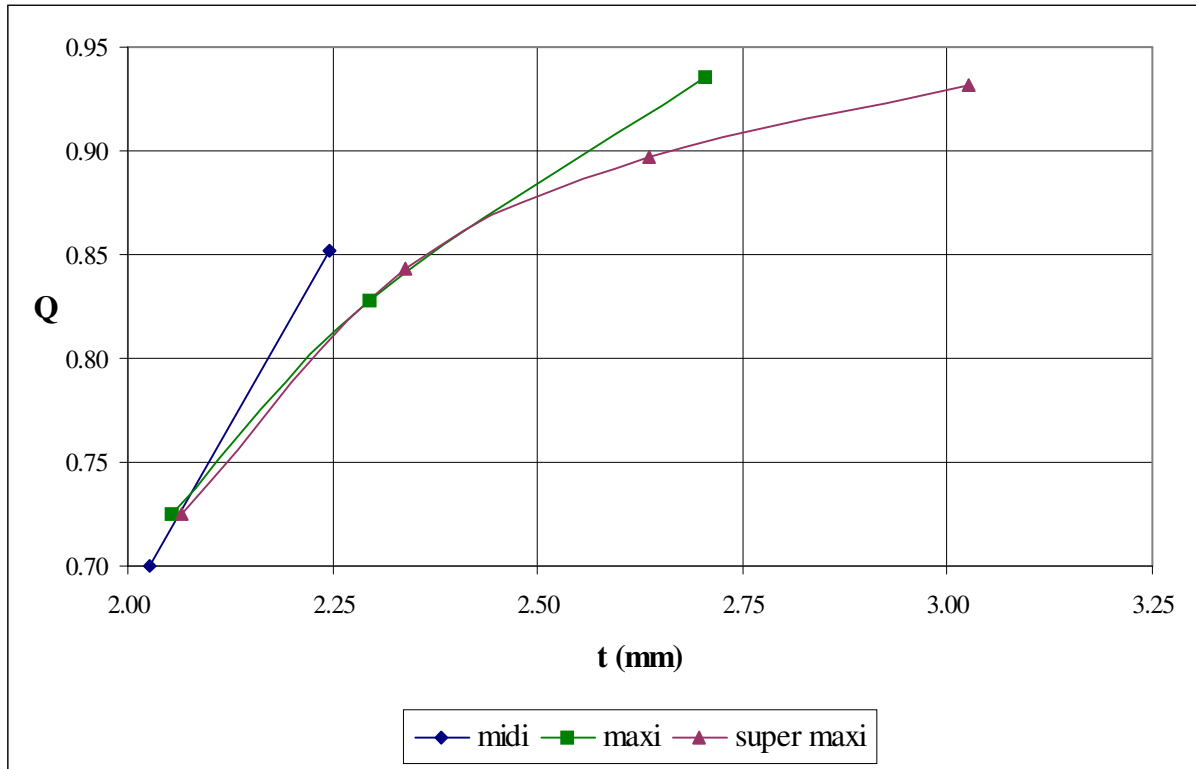


Figura 6.11 – Gráfico $Q \times t$.

6.5 Avaliação da área da seção transversal

Neste item é realizada uma comparação entre as áreas das seções com e sem furos. Para as primeiras são comparados os cálculos da prescrição do RMI ($A_{e,RMI}$) e da proposição de Sarawit ($A_{e,S}$) com o valor da área cujo o plano transversal intercepta o maior número de furos ($A_{net,min}$). Em seguida são comparados os cálculos da área efetiva para colunas sem furos, calculadas segundo o AISI ($A_{e,AISI}$) e NBR 14762 ($A_{e,NBR}$). Nas tabelas 6.8, 6.9 e 6.10 tem-se os valores das áreas das colunas ensaiadas, calculadas considerando as medidas médias reais, conforme item 6.2.

Tabela 6.8 – Valores da área efetiva e esbeltez da alma para seções tipo *medi*.

Coluna	Sem furos				Com furos		
	A (mm ²)	A _{e, NBR} (mm ²)	A _{e, AISI} (mm ²)	$\lambda_{p, alma}$	A _{net,min} (mm ²)	A _{e,RMI} (mm ²)	A _{e,S} (mm ²)
MI1C3	-	-	-	-	298,82	230,59	265,08
MI1C5	-	-	-	-	300,03	235,73	270,59
MI1C7	-	-	-	-	298,11	237,81	272,53
MI1S1	404,07	397,06	397,06	0,74	-	-	-
MI1S3	414,50	407,90	407,90	0,73	-	-	-
MI1S4	412,64	405,16	405,16	0,73	-	-	-
MI2C2	-	-	-	-	332,52	302,07	330,32
MI2C3	-	-	-	-	329,29	295,53	325,85
MI2C6	-	-	-	-	336,55	304,72	334,01
MI2S2	452,90	453,61	453,61	0,66	-	-	-
MI2S4	456,40	455,88	455,88	0,66	-	-	-
MI2S5	458,25	457,43	457,43	0,66	-	-	-

Tabela 6.9 – Valores da área efetiva e esbeltez da alma para seções tipo *maxi*.

Coluna	Sem furos				Com furos		
	A (mm ²)	A _{e, NBR} (mm ²)	A _{e, AISI} (mm ²)	$\lambda_{p, alma}$	A _{net,min} (mm ²)	A _{e,RMI} (mm ²)	A _{e,S} (mm ²)
MA1C1	-	-	-	-	354,14	275,10	309,17
MA1C3	-	-	-	-	354,69	275,58	309,71
MA1C4	-	-	-	-	355,74	278,03	312,40
MA1S1	474,53	454,86	454,86	0,83	-	-	-
MA1S2	468,11	449,65	449,65	0,83	-	-	-
MA1S3	470,54	452,71	452,71	0,83	-	-	-
MA2C1	-	-	-	-	400,84	348,02	388,24
MA2C2	-	-	-	-	400,04	350,68	389,74
MA2C3	-	-	-	-	396,74	349,04	387,32
MA3C2	-	-	-	-	469,18	449,67	469,08
MA3C3	-	-	-	-	472,49	445,69	471,83
MA3C4	-	-	-	-	467,37	447,61	467,26
MA3S2	633,74	633,67	633,67	0,62	-	-	-
MA3S3	641,99	641,02	641,02	0,62	-	-	-
MA3S4	634,15	633,59	633,59	0,62	-	-	-

Tabela 6.10 – Valores da área efetiva e esbeltez da alma para seções tipo *super maxi*.

Coluna	Sem furos				Com furos		
	A (mm^2)	$A_{e,NBR}$ (mm^2)	$A_{e,AISI}$ (mm^2)	$\lambda_{p,alma}$	$A_{net,min}$ (mm^2)	$A_{e,RMI}$ (mm^2)	$A_{e,S}$ (mm^2)
SM1C2	-	-	-	-	463,21	358,57	406,26
SM1C3	-	-	-	-	462,45	367,15	415,41
SM1C4	-	-	-	-	467,96	370,22	418,99
SM1S2	589,06	558,58	558,58	0,89	-	-	-
SM1S3	589,04	560,58	560,58	0,89	-	-	-
SM1S5	585,67	554,99	554,99	0,89	-	-	-
SM2C2	-	-	-	-	525,49	519,32	571,72
SM2C4	-	-	-	-	526,05	533,83	582,67
SM2C5	-	-	-	-	521,08	530,73	581,21
SM2S2	659,13	637,72	637,72	0,80	-	-	-
SM2S3	657,16	637,23	637,23	0,80	-	-	-
SM2S4	658,88	638,69	638,69	0,80	-	-	-
SM3C3	-	-	-	-	584,52	519,32	571,72
SM3C6	-	-	-	-	590,66	533,83	582,67
SM3C8	-	-	-	-	590,86	530,73	581,21
SM3S3	763,96	760,73	760,73	0,70	-	-	-
SM3S4	780,67	778,38	778,38	0,68	-	-	-
SM3S5	757,69	752,48	752,48	0,70	-	-	-
SM4C1	-	-	-	-	673,61	634,28	672,59
SM4C2	-	-	-	-	673,48	650,19	673,44
SM4C4	-	-	-	-	675,84	638,12	675,03
SM4S1	867,05	868,22	868,22	0,61	-	-	-
SM4S2	867,85	868,39	868,39	0,61	-	-	-
SM4S3	876,39	876,96	876,96	0,61	-	-	-

Foi verificado que a flambagem local, calculada segundo prescrições de norma, baseadas no método da largura efetiva (Hancock et al., 2001), ocorre apenas na alma de alguns perfis. Por esse motivo, os demais elementos não tiveram os valores de esbeltez apresentados na Tabela 6.10. Em relação à alma, através da esbeltez pode-se observar que não ocorre flambagem para as séries *MI2S*, *MA3S* e *SM4S* ($\lambda_{p,alma} < 0,673$), que correspondem os maiores valores de espessura de cada série.

Para as seções com furos são verificadas variações dos resultados em relação à área mínima. Na Figura 6.12 tem-se a representação gráfica da área líquida mínima ($A_{net,min}$) e das áreas

efetivas segundo RMI ($A_{e,RMI}$) e Sarawit ($A_{e,S}$). São indicados também os valores da esbeltez da alma ($\lambda_{p,alma}$), obtidos considerando a seção sem furos. Observa-se que:

- A área efetiva calculada segundo Sarawit se aproxima de $A_{net,min}$ à medida que a esbeltez da alma diminui;
- O cálculo segundo RMI se distancia mais de $A_{net,min}$ que o obtido pela proposição de Sarawit;
- Quando não há ocorrência de flambagem local, os valores de $A_{e,S}$ são praticamente iguais a $A_{net,min}$;
- A dispersão entre os três valores de área ($A_{e,RMI}$, $A_{e,S}$ e $A_{net,min}$) é maior quando a esbeltez aumenta.

Assim, a esbeltez da alma, que indica a ocorrência da flambagem local, influencia diretamente na diferença entre as áreas da Figura 6.12.

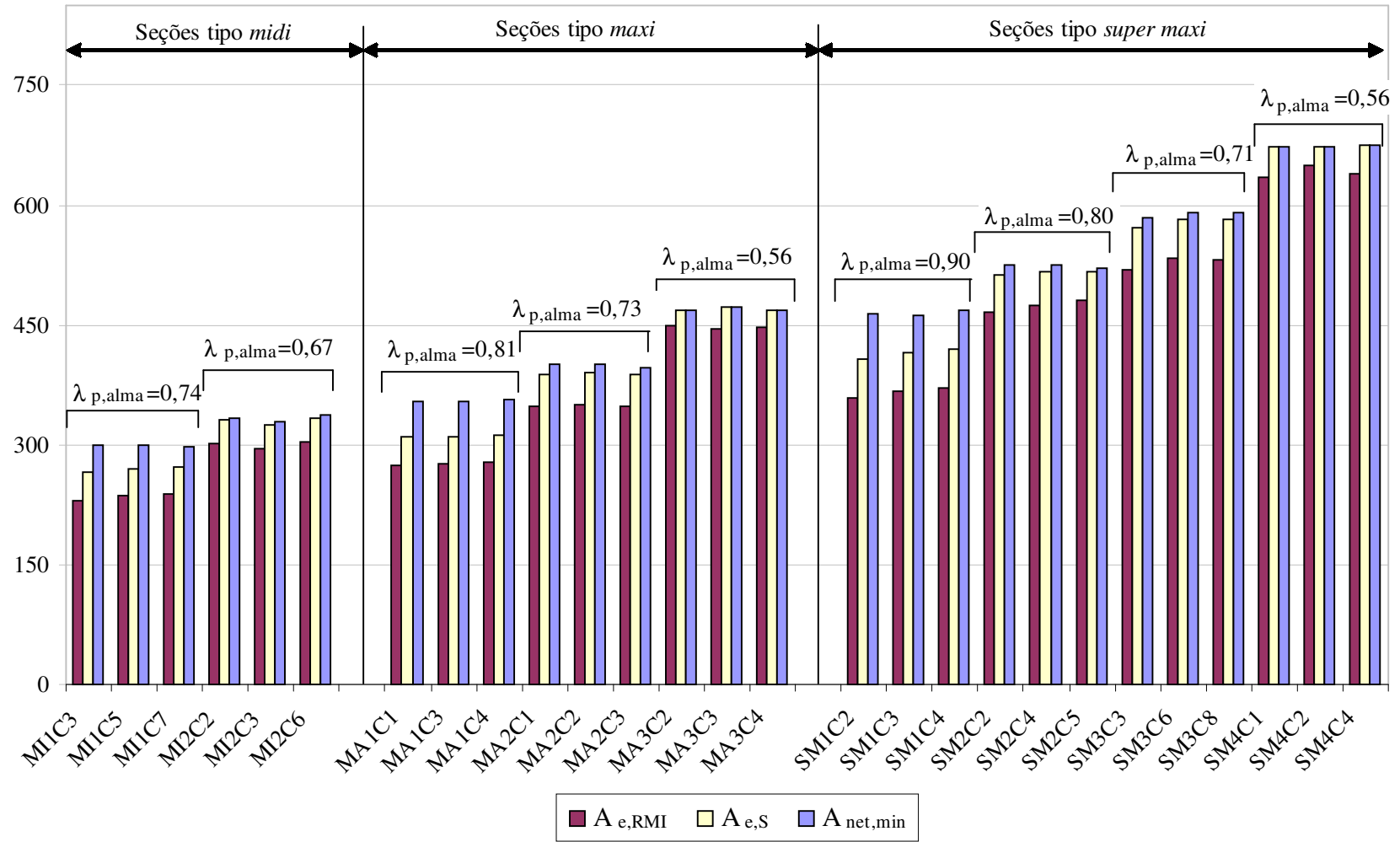


Figura 6.12 – Gráfico das áreas calculadas para colunas com furos.

6.6 Avaliação da carga nominal axial (P_n)

Neste item são apresentados e avaliados os diferentes métodos utilizados para o cálculo da capacidade de carga nominal (P_n) dos protótipos com e sem furos.

6.6.1 Colunas sem furos

Na tabela abaixo têm-se os valores da carga nominal axial segundo o AISI ($P_{n,AISI}$) e a norma brasileira ($P_{n,NBR}$) para colunas sem perfurações. Observa-se que as cargas nominais calculadas segundo o AISI (1997) estão próximas das cargas últimas obtidas experimentalmente, enquanto os valores calculados através da NBR 14762, que consideram os efeitos da flambagem distorcional, estão mais distantes das cargas últimas. Deve-se destacar ainda que em todos os casos analisados através da NBR, o modo distorcional foi o dominante no dimensionamento.

Na mesma tabela são apresentados os valores encontrados para a esbeltez distorcional (λ_{dist}), calculados de acordo com as especificações da NBR 14762.

Tabela 6.11 – Cargas nominais das colunas sem furos analisadas.

<i>Coluna</i>	P_u (kN)	$P_{n,AISI}$ (kN)	$P_{n,NBR}$ (kN)	λ_{dist}
MI1S1	124,28	116,53	86,53	0,66
MI1S3	123,69	119,76	89,21	0,64
MI1S4	123,05	118,93	88,28	0,66
MI2S2	183,98	133,12	99,75	0,59
MI2S4	186,68	133,80	100,20	0,60
MI2S5	183,29	134,25	100,44	0,60
MA1S1	135,92	134,31	98,90	0,72
MA1S2	139,36	132,70	97,40	0,72
MA1S3	136,43	133,68	97,95	0,72
MA3S2	235,89	186,98	139,08	0,60
MA3S3	237,38	189,20	141,37	0,59
MA3S4	236,65	186,99	139,46	0,60
SM1S2	178,73	165,62	119,11	0,78
SM1S3	178,99	165,57	118,45	0,79
SM1S5	183,46	163,88	117,85	0,79
SM2S2	198,76	188,31	136,50	0,73
SM2S3	211,30	188,19	135,86	0,73
SM2S4	219,67	188,60	136,64	0,73
SM3S3	277,13	224,71	162,32	0,67
SM3S4	274,62	229,91	166,51	0,66
SM3S5	269,94	222,28	161,09	0,67
SM4S1	289,53 ⁽¹⁾	256,38	188,90	0,62
SM4S2	289,64 ⁽¹⁾	256,42	189,14	0,62
SM4S3	289,49 ⁽¹⁾	259,00	191,06	0,62

⁽¹⁾A capacidade de aplicação de carga do equipamento foi

Observa-se ainda que para as colunas de menor espessura de cada série, os valores de P_n calculados segundo AISI são contra a segurança, visto sua proximidade com a carga última experimental. O gráfico da Figura 6.13 ilustra o descrito.

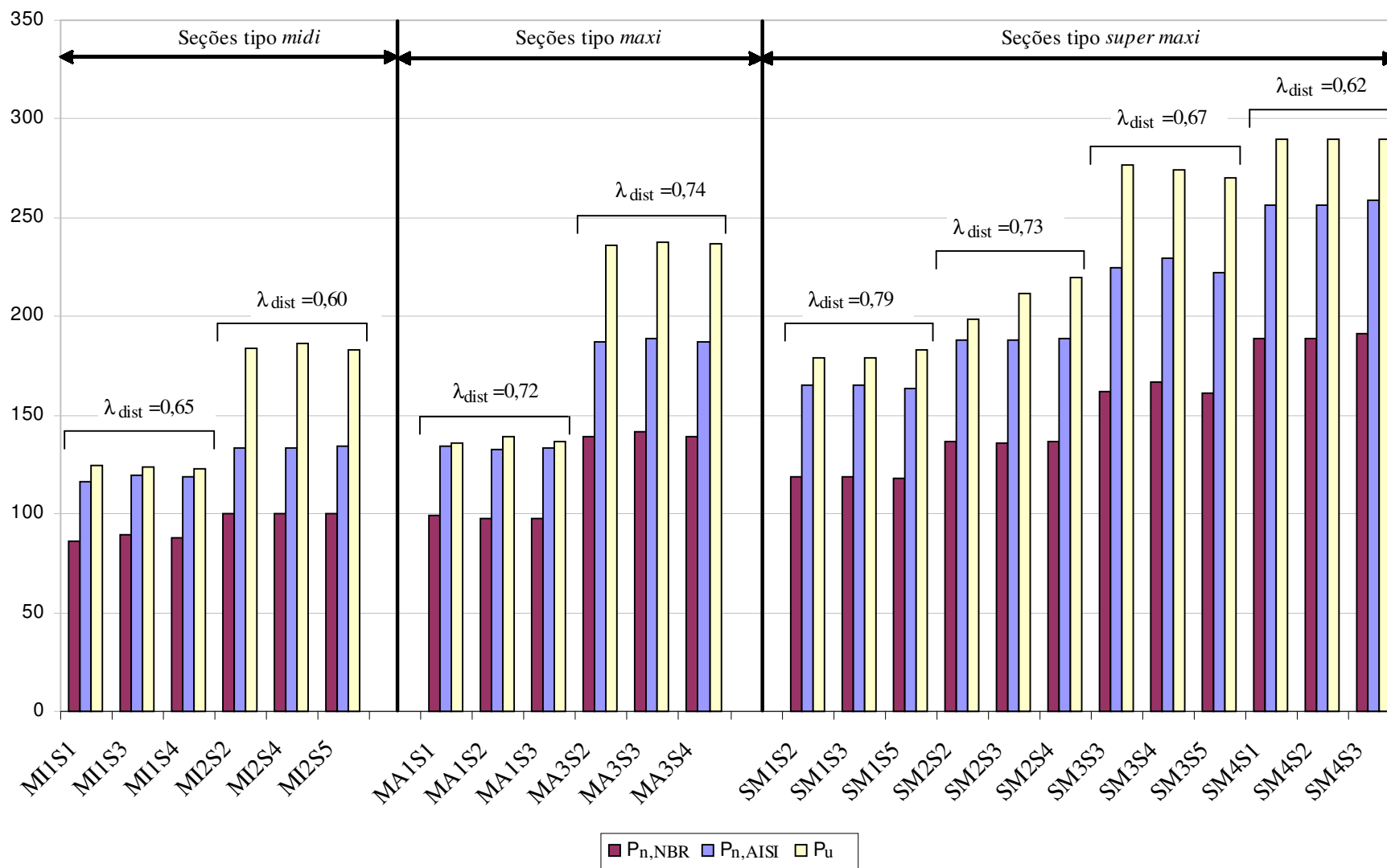


Figura 6.13 – Gráfico das cargas nominal e última para protótipos sem furos.

6.6.2 Colunas com furos

Os resultados das análises dos perfis sem furos indicam que para seção tipo *rack* o modo distorcional de flambagem é o dominante. Assim, no cálculo das cargas nominais axiais para colunas com furos também é preciso considerar os efeitos da distorção da seção transversal.

Na Tabela 6.12 são apresentadas as cargas nominais obtidas através das prescrições do AISI em conjunto com as especificações do RMI ($P_{n,RMI}$) e de Sarawit ($P_{n,S}$). São indicados também os valores encontrados considerando as proposições feitas no item 4.5 para adaptação da norma brasileira aos perfis com furos. Destaca-se que, observando os valores de $P_{n,NBR}$, mesmo considerando a redução da capacidade de carga através do parâmetro Q (coluna 1), o modo distorcional continua dominante (coluna 2), assim como foi observado nas colunas sem furos.

Tabela 6.12 – Cargas nominais das colunas com furos analisadas.

Coluna	P_u (kN)	$P_{n,RMI}$ (kN)	$P_{n,S}$ (kN)	$P_{n,NBR}$ (kN)	
				$A_{e,RMI} \cdot \rho \cdot f_y$ (1)	$A \cdot f_y (1 - 0,25 \lambda_{dist}^2)$ (2)
MI1C3	96,56	67,68	77,81	68,90	64,31
MI1C5	99,36	69,20	79,44	70,43	64,57
MI1C7	100,80	69,78	79,97	70,99	64,16
MI2C2	138,68	88,69	96,98	90,26	73,24
MI2C3	134,82	86,70	95,60	88,22	72,53
MI2C6	139,64	89,39	97,99	90,87	74,13
MA1C1	101,92	81,22	91,28	82,53	73,81
MA1C3	102,10	81,35	91,43	82,67	73,93
MA1C4	103,15	82,08	92,23	83,41	74,14
MA2C1	142,80	102,89	114,78	104,41	86,83
MA2C2	144,36	103,55	115,08	105,20	86,83
MA2C3	143,87	103,03	114,33	104,71	85,93
MA3C2	152,93	110,85	115,64	112,42	88,12
MA3C3	150,70	109,90	116,35	111,42	88,74
MA3C4	152,19	110,37	115,21	111,90	87,78
SM1C2	137,90	105,99	120,09	107,57	93,66
SM1C3	142,17	108,49	122,76	110,15	93,51
SM1C4	143,22	109,40	123,82	111,07	94,62
SM2C2	178,85	153,39	168,87	136,48	108,98
SM2C4	182,74	157,68	172,11	138,77	109,09
SM2C5	187,08	156,78	171,69	140,92	108,06
SM3C3	205,03	153,39	168,87	159,92	124,68
SM3C6	211,93	157,68	172,11	164,44	125,98
SM3C8	210,28	156,78	171,69	163,47	126,03
SM4C1	216,22	156,51	165,96	158,57	125,37
SM4C2	223,75	160,43	166,17	162,55	125,35
SM4C4	217,75	157,47	166,58	159,53	125,79

A figura a seguir ilustra as cargas nominais e últimas encontradas para colunas com furos. Uma variação entre os valores obtidos pelos métodos indicados por RMI e Sarawit pode ser observada. Isto acontece devido à diferença entre as áreas efetivas, conforme apresentado no item 6.5.

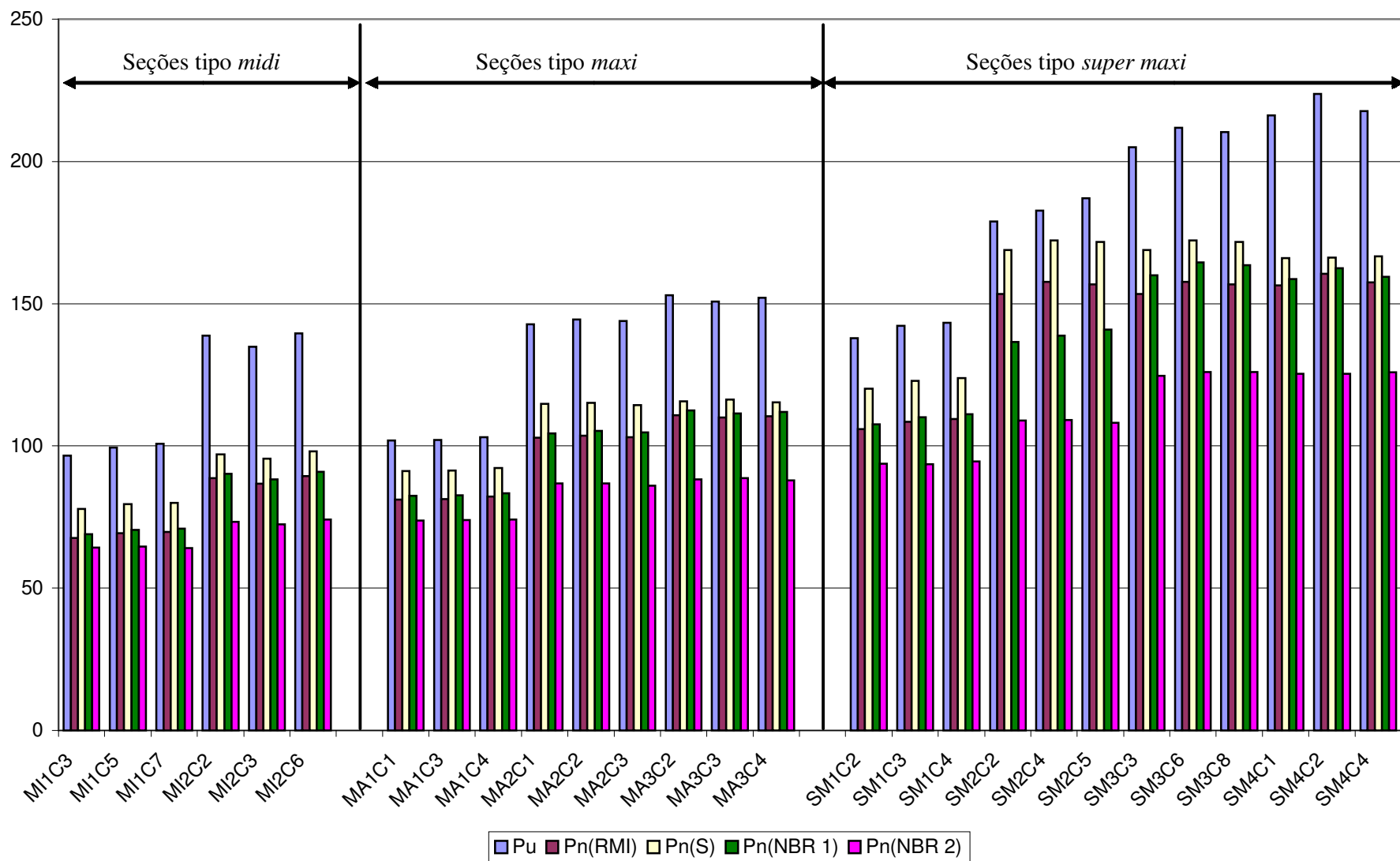


Figura 6.14 – Gráfico das cargas nominais e últimas para protótipos com furos.

6.7 Avaliação das deformações

Como mencionado no item 5.7, foram instalados alguns extensômetros elétricos de resistência para um melhor acompanhamento das deformações em alguns pontos dos perfis. De modo geral, para as colunas com furos, os extensômetros posicionados nas regiões próximas às perfurações foram os que apresentaram maiores deformações.

Já nas colunas sem furos as deformações geralmente permaneciam com pequenas dispersões até próximo à ruptura. A seguir tem-se uma avaliação das deformações sofridas por cada tipologia de seção ensaiada.

6.7.1 Seção tipo *midi*

Considerando que o comportamento do aço na fase elástica é linear, utilizou-se a Lei de Hooke, expressa pela equação (4.1), e os valores de f_{ya} para o cálculo das deformações (ϵ_y) e cargas (P_y) correspondentes ao escoamento do aço, conforme indicado na Tabela 6.13. Destaca-se que os valores de f_{ya} correspondem ao aço retirado dos flanges adicionais e os obtidos pela extensometria estão posicionados nos flanges de ligação e na alma.

$$\sigma = E.\epsilon \quad (6.1)$$

Tabela 6.13 – Cargas nominais e de escoamento para seções tipo *midí* instrumentadas.

<i>Coluna</i>	P_u (kN)	f_{ya} (MPa)	ξ_y ($\mu\text{m}/\text{m}$)	P_y (kN)	$P_{n,RMI}$ (kN)	$P_{n,S}$ (kN)	$P_{n,NBR}$ (kN)	$P_{n,AISI}$ (kN)
MI1C3	96,56	472,56	2305,17	57,59	67,68	77,81	64,31	-
MI1C5	99,36	472,56	2305,17	61,37	69,20	79,44	64,57	-
MI1S1	124,28	377,76	1842,75	102,62	-	-	86,53	116,53
MI1S3	123,69	377,76	1842,75	101,62	-	-	89,21	119,76
MI1S4	123,05	377,76	1842,75	100,32	-	-	88,28	118,93
MI2C2	138,68	485,56	2368,59	78,62	88,69	96,98	73,24	-
MI2C3	134,82	485,56	2368,59	72,67	86,70	95,60	72,53	-
MI2C6	139,64	485,56	2368,59	84,02	89,39	97,99	74,13	-
MI2S2	183,98	426,77	2081,80	145,60	-	-	99,75	133,12
MI2S5	183,29	426,77	2081,80	149,76	-	-	100,44	134,25

De acordo com a tabela apresentada, as colunas com furos e espessuras 2,00mm possuem o valor de P_y menor que as cargas nominais calculadas ($P_{n,RMI}$, $P_{n,S}$ e $P_{n,NBR}$). Essa diferença é ilustrada nos gráficos da Figura 6.15, para as colunas tipo *midí* com e sem furos, respectivamente. Observa-se que as cargas nominais calculadas segundo Sarawit, cujos valores obtidos são os mais elevados, superam as cargas de escoamento em mais de 30%. Em relação às colunas perfuradas de espessura 2,25mm, as cargas de escoamento são inferiores às cargas nominais $P_{n,RMI}$ e $P_{n,S}$, enquanto que as cargas $P_{n,NBR}$ não superam P_y .

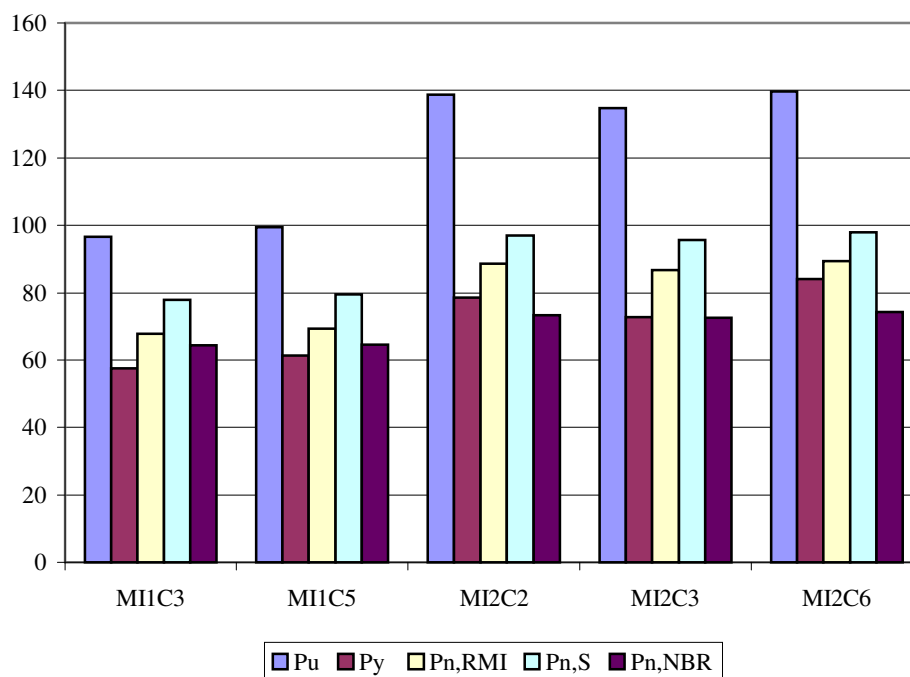


Figura 6.15 – Gráfico das cargas nominais e de escoamento das colunas *midi* com furos.

Considerando os perfis sem furos, os valores das cargas nominais calculados segundo AISI são maiores que P_y para as colunas *MI1S* e próximos dos resultados encontrados para as colunas *MI2S*. O dimensionamento feito através da NBR é mais conservativo e não supera em nenhum dos dois casos os valores de P_y , como pode ser observado na Figura 6.16.

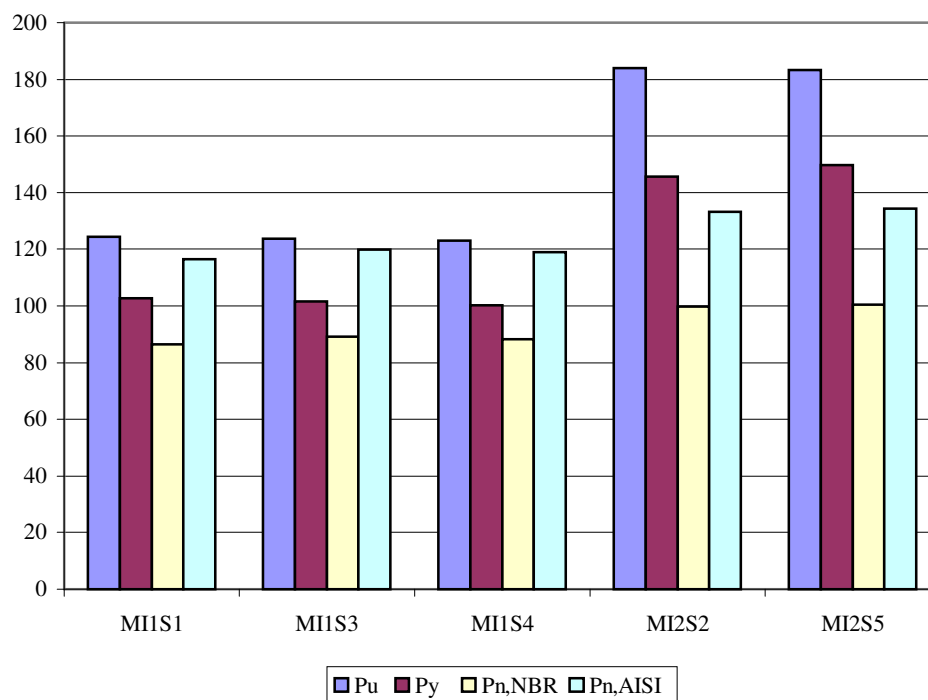


Figura 6.16 – Gráfico das cargas nominais e de escoamento das colunas *midi* sem furos.

Os gráficos das Figuras 6.14 e 6.15 são exemplos da influência das perfurações nas deformações sofridas pelos extensômetros.

Na coluna MI1C3, Figura 6.17, foram instalados cinco extensômetros, sendo um na alma e quatro nos flanges de ligação, conforme ilustrado. Os extensômetros *E1* e *E4*, assim como *E2* e *E5*, estão alinhados horizontalmente e seus centros distam 15mm na posição vertical.

Pelo gráfico da Figura 6.17 observa-se que os extensômetros *E1* e *E2*, posicionados bem próximos aos furos dos flanges de ligação, apresentam deformações muito superiores às apresentadas por *E3*, *E4* e *E5*. Ressalta-se que, apesar de distarem apenas 15mm, os extensômetros *E1* e *E2*, sofrem deformações que superam *E3* e *E4* em mais de 100%.

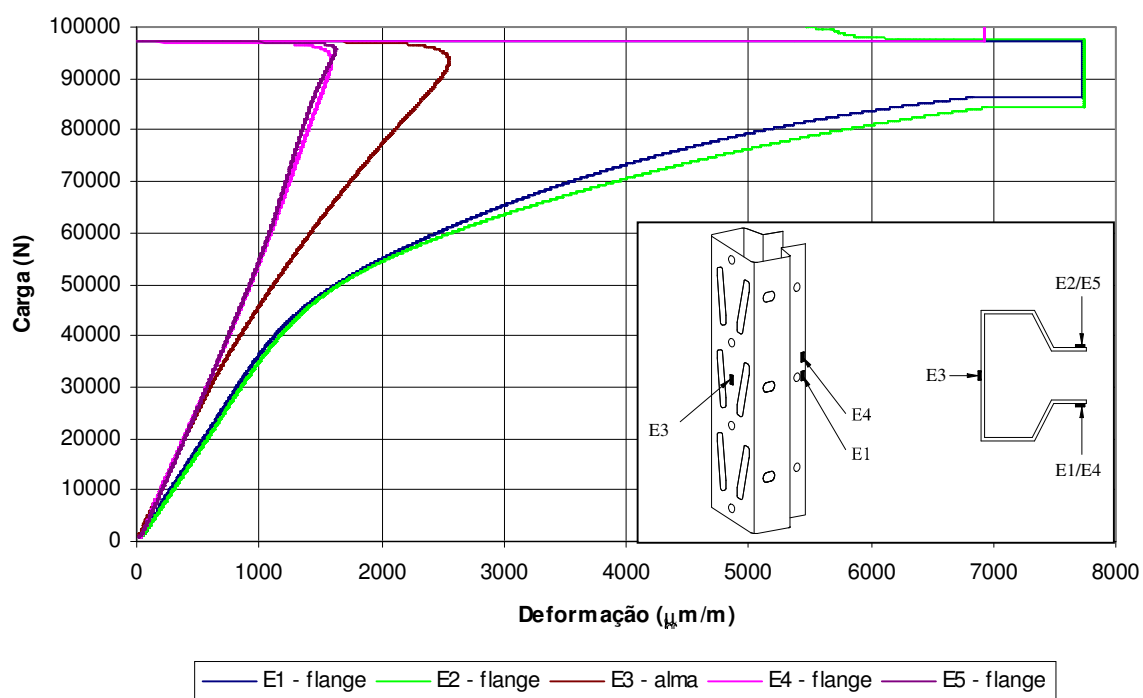


Figura 6.17 – Gráfico *Carga x Deformação* da coluna MI1C3.

Na coluna MI1C6 foram fixados 3 extensômetros, conforme indicado. Observa-se que, assim como ocorre na MI1C3, os pontos próximos aos furos (*E1* e *E2*) sofrem escoamento antes da alma do perfil (*E3*).

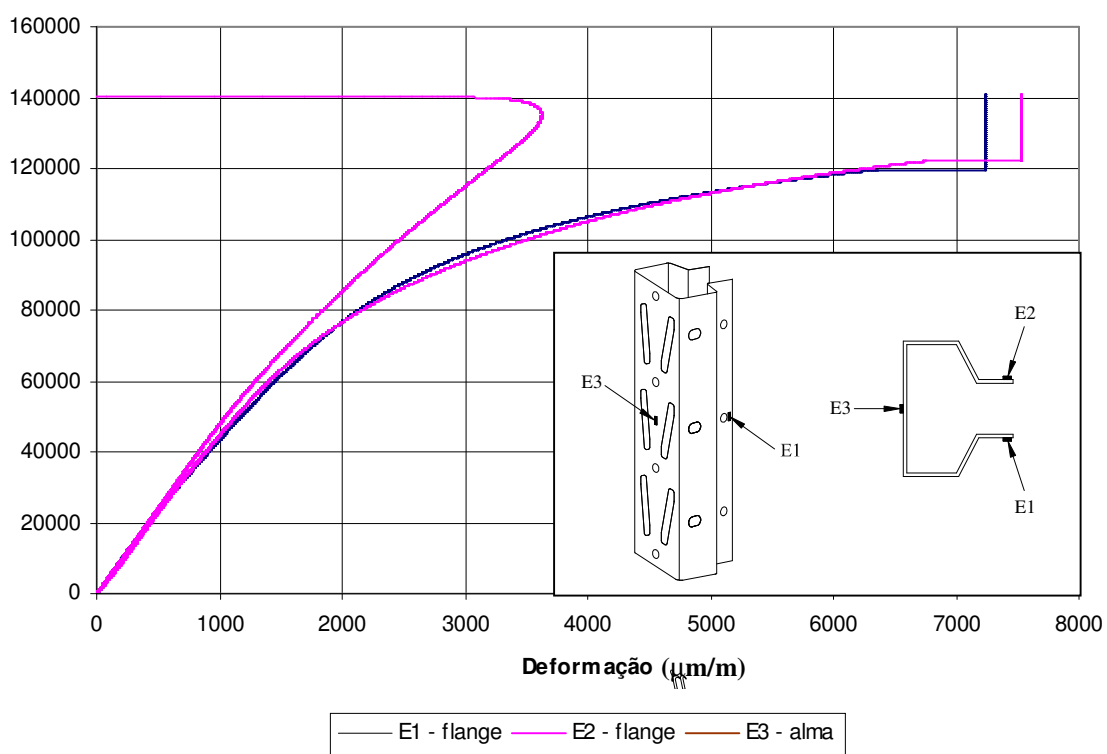


Figura 6.18 – Gráfico *Carga x Deformação* da coluna MI2C6.

Os gráficos das Figuras 6.16 e 6.17 ilustram as deformações sofridas pelos protótipos MI1S1 e MI2S5, respectivamente. Observa-se que os valores, ao contrário do que ocorre nos perfis com furos, permanecem próximos até a ruptura. Os gráficos relativos às demais colunas, com e sem furos, estão indicados no ANEXO II.

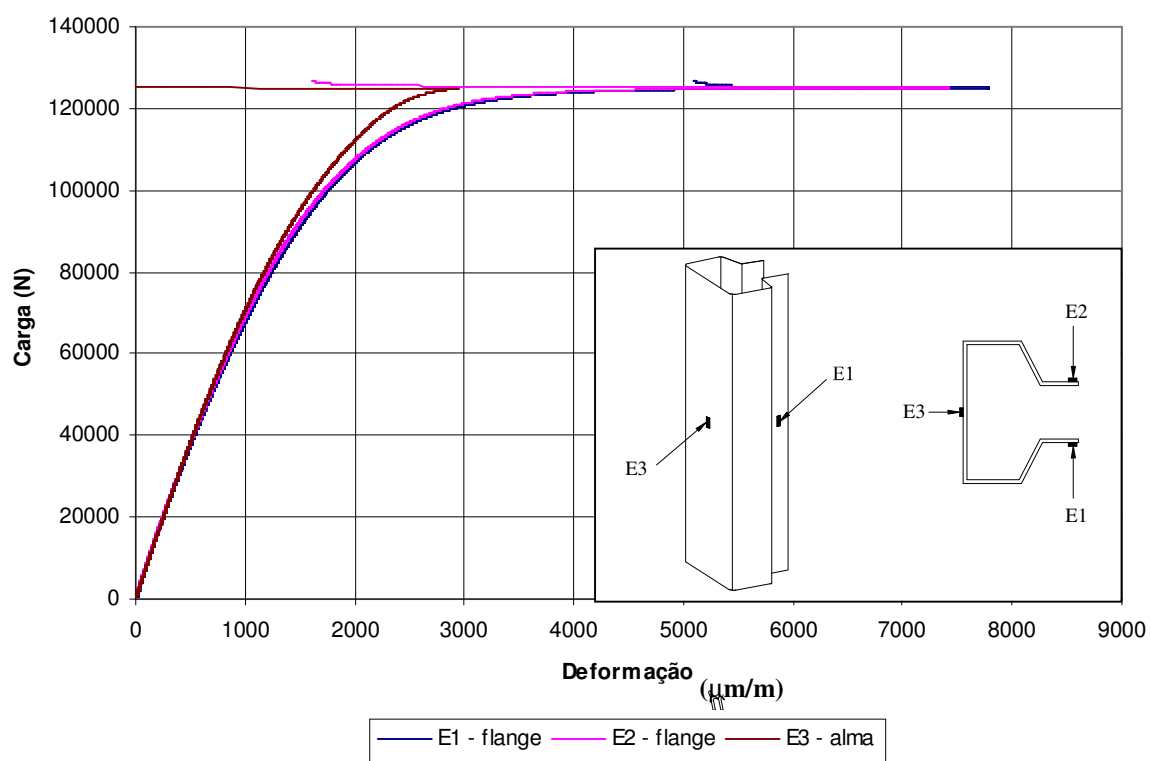


Figura 6.19 – Gráfico *Carga x Deformação* da coluna MI1S1.

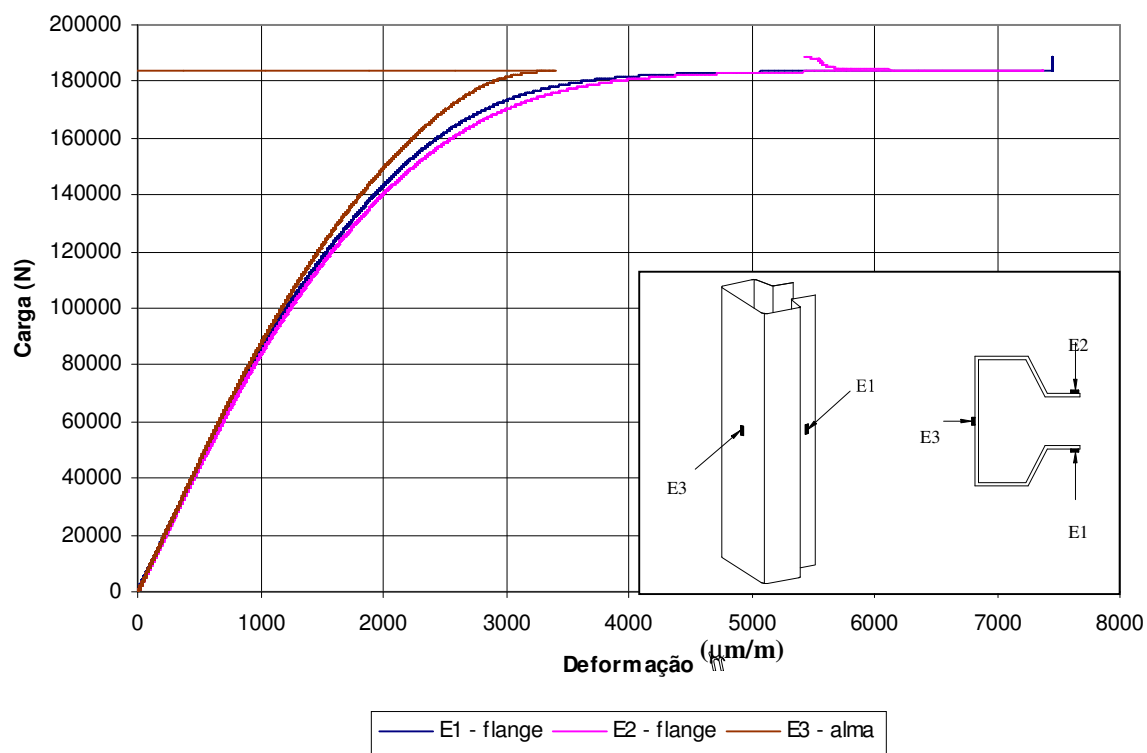


Figura 6.20 – Gráfico *Carga x Deformação* da coluna MI2S5.

6.7.2 Seção tipo maxi

Para as colunas com seção *maxi*, analogamente a *midi*, foram calculados valores da carga correspondente ao escoamento do aço (P_y), conforme indicado na tabela abaixo.

Tabela 6.14 – Cargas nominais e de escoamento para seções *maxi* instrumentadas.

<i>Coluna</i>	P_u (kN)	f_{ya} (MPa)	ξ_{esc} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	P_y (kN)	$P_{n,RMI}$ (kN)	$P_{n,S}$ (kN)	$P_{n,NBR}$ (kN)	$P_{n,AISI}$ (kN)
MA1C3	102,10	398,07	1941,78	63,26	81,35	91,43	73,93	-
MA1C4	103,15	398,07	1941,78	65,11	82,08	92,23	74,14	-
MA1S1	135,92	476,41	2323,93	126,24	-	-	98,90	134,31
MA1S2	139,36	476,41	2323,93	133,40	-	-	97,40	132,70
MA1S3	136,43	476,41	2323,93	129,40	-	-	97,95	133,68
MA2C1	142,80	434,85	2121,22	80,51	102,89	114,78	86,83	-
MA2C2	144,36	434,85	2121,22	84,74	103,55	115,08	86,83	-
MA2C3	143,87	434,85	2121,22	70,57	103,03	114,33	85,93	-
MA3C2	152,93	345,73	1646,33	78,60	110,85	115,64	88,12	-
MA3C3	150,70	345,73	1646,33	78,14	109,90	116,35	88,74	-
MA3C4	152,19	345,73	1646,33	83,37	110,37	115,21	87,78	-
MA3S2	235,89	454,88	2218,94	223,93	-	-	139,08	186,98
MA3S3	237,38	454,88	2218,94	223,29	-	-	141,37	189,20
MA3S4	236,65	454,88	2218,94	221,25	-	-	139,46	186,99

Em relação às colunas com furos, as cargas nominais $P_{n,RMI}$, $P_{n,S}$ e $P_{n,NBR}$ foram superiores às cargas de escoamento para todas espessuras analisadas, sendo os valores calculados de acordo com Sarawit ($P_{n,S}$) os mais elevados. O gráfico da Figura 6.21 ilustra as cargas nominais e a carga equivalente ao início do escoamento para as colunas tipo *maxi* com furos.

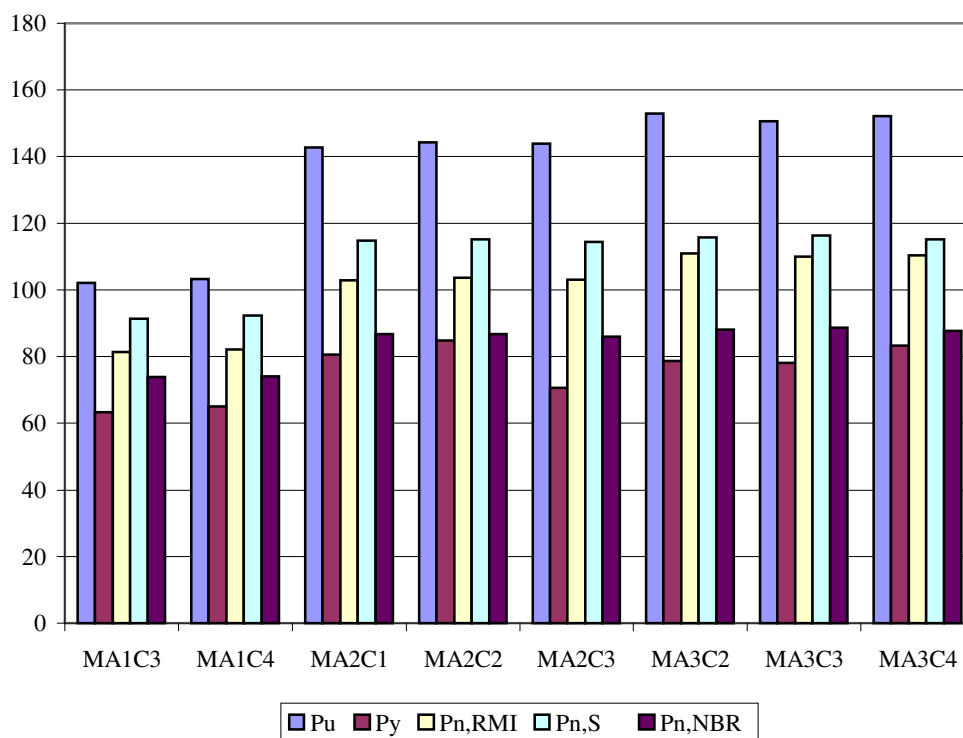


Figura 6.21 – Gráfico das cargas nominais e de escoamento das colunas *maxi* com furos.

Quanto às deformações, conforme pode ser observado nos gráficos das Figuras 6.18, 6.19 e 6.20, os maiores valores correspondem aos extensômetros próximos aos furos dos flanges (*E1* e *E2*).

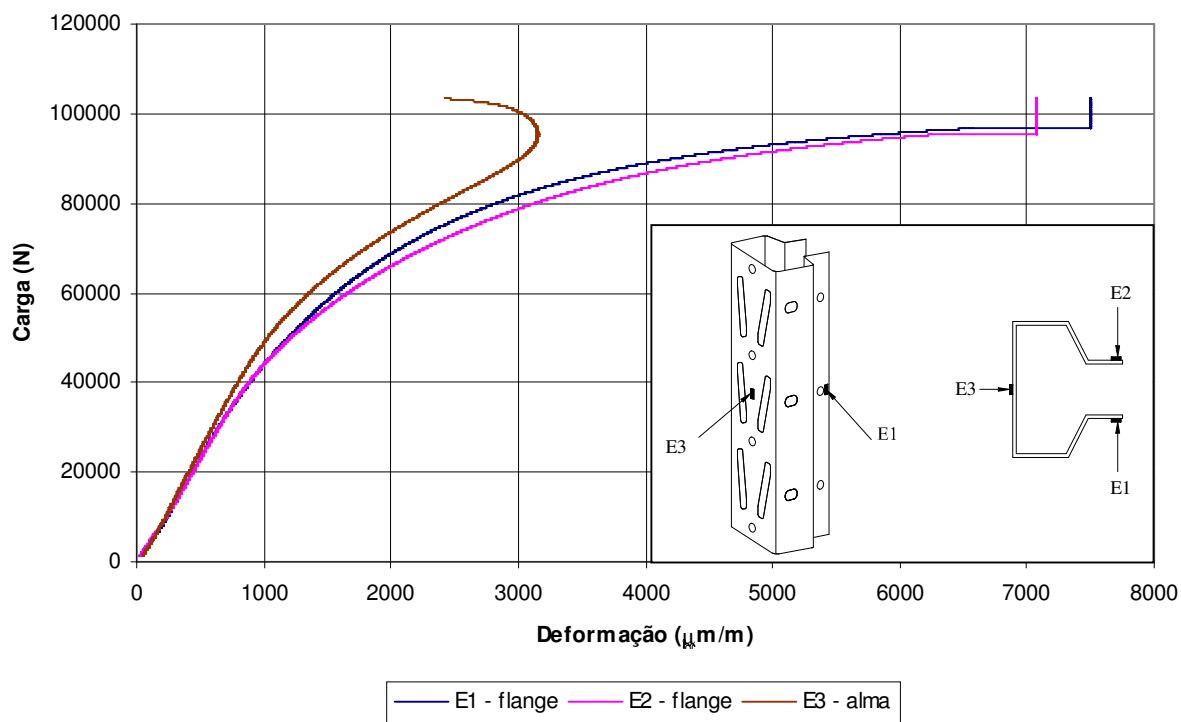


Figura 6.22 – Gráfico *Carga x Deformação* da coluna MA1C4.

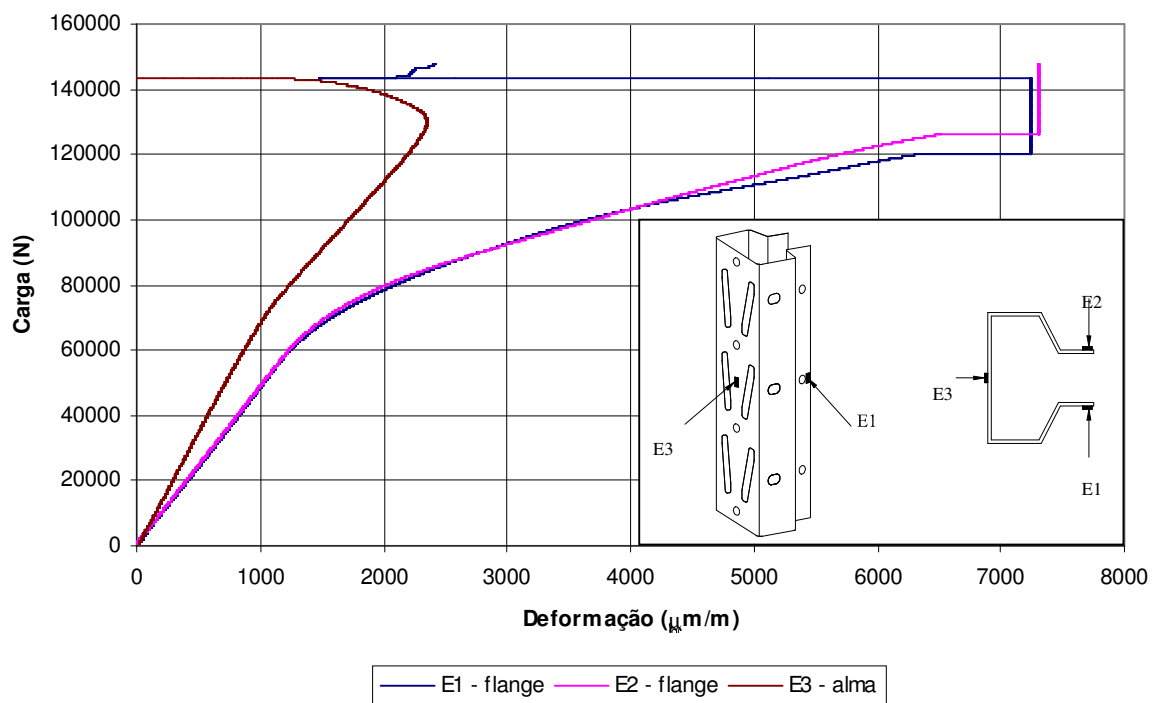


Figura 6.23 – Gráfico *Carga x Deformação* da coluna MA2C1.

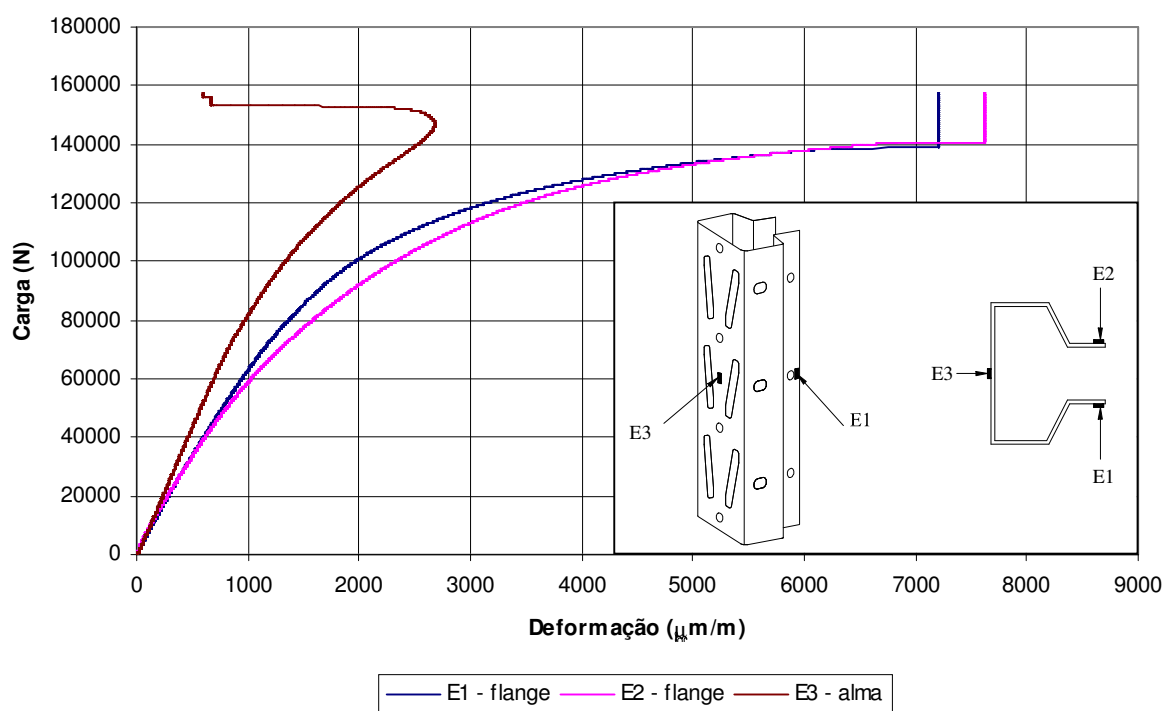


Figura 6.24 – Gráfico *Carga x Deformação* da coluna MA3C4.

Nas colunas sem furos com espessura 2,00mm, as cargas $P_{n,AISI}$ estão próximas ou acima das cargas de escoamento, enquanto os valores de $P_{n,NBR}$, estão abaixo de P_y , como pode ser observado na Figura 6.25. Para as colunas com 2,65mm de espessura, cujos valores de índice de esbeltez distorcional (λ_{dist}) são menores que as colunas de 2,00mm, as cargas nominais ($P_{n,AISI}$ e $P_{n,NBR}$) são menores que P_y .

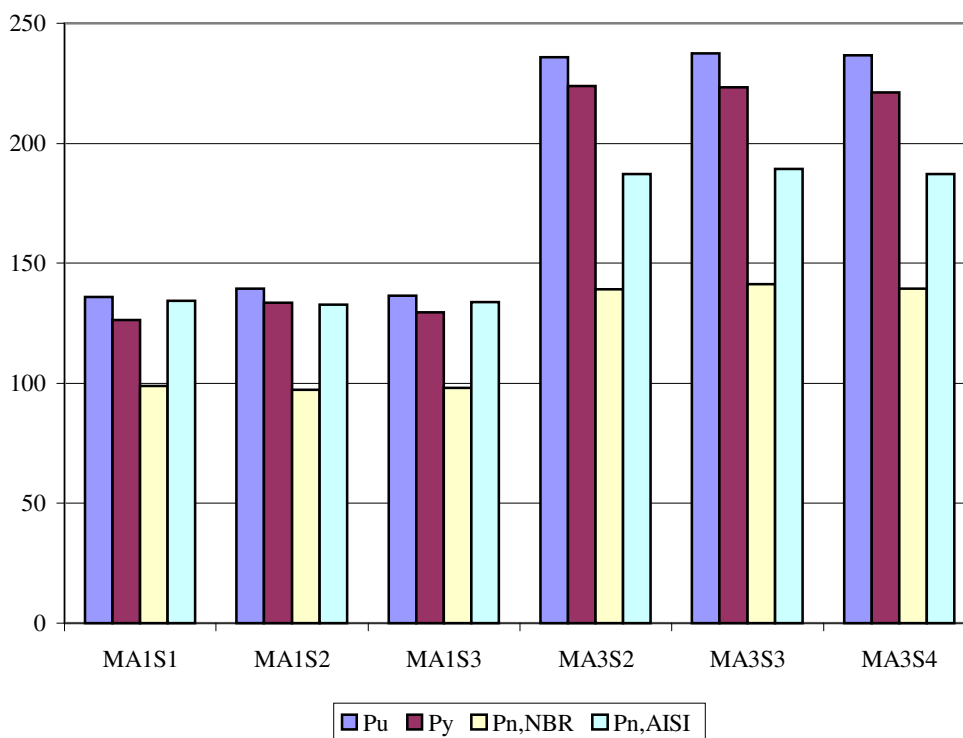


Figura 6.25 – Gráfico das cargas nominais e de escoamento das colunas *maxi* sem furos.

As figuras a seguir ilustram exemplos das deformações sofridas pelos protótipos instrumentados. Observa-se que, assim como ocorre na seção *midi* sem furos, os valores das deformações não sofrem grandes dispersões durante o ensaio. Os gráficos que apresentam as deformações das demais colunas *maxi* instrumentadas, com e sem furos, estão indicados no ANEXO II.

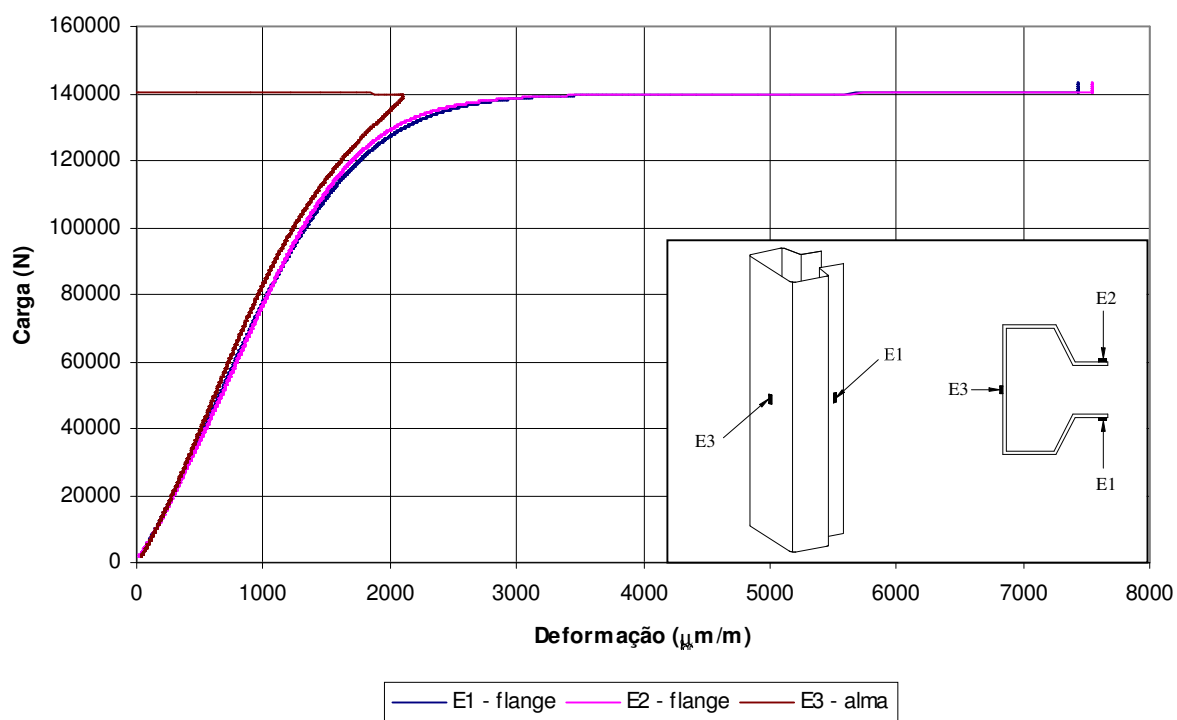


Figura 6.26 – Gráfico *Carga x Deformação* da coluna MA1S2.

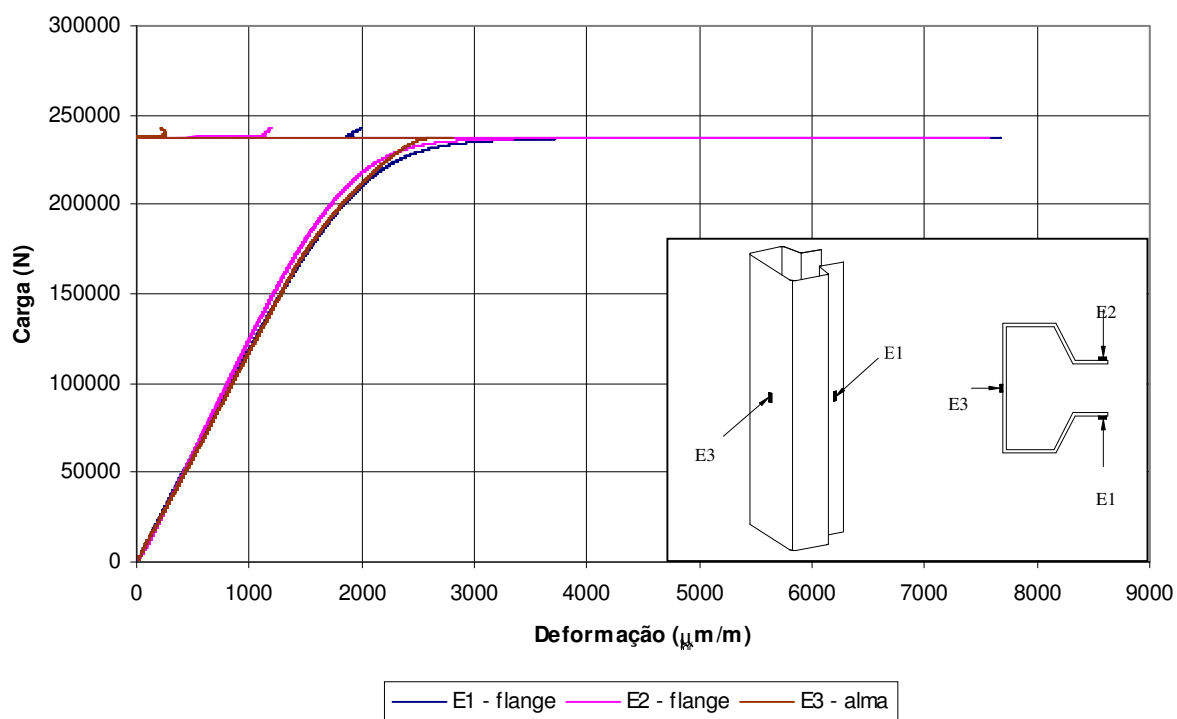


Figura 6.27 – Gráfico *Carga x Deformação* da coluna MA3S4.

6.7.3 Seção tipo super maxi

Nas colunas com furos de seções tipo *midi* e *maxi* foram instalados extensômetros nos flanges de ligação posicionados próximos às perfurações (*E1* e *E2*). Através dos gráficos *Carga x Deformação* foram observados que estes extensômetros apresentaram maiores deformações que o instalado distante dos furos (*E3*).

Nos protótipos com seção *super maxi* os extensômetros, tanto dos flanges quanto da alma, foram fixados em pontos distantes das perfurações. Assim, uma avaliação das deformações das colunas com furos poderia conduzir a valores conservativos, que não traduzem a realidade do perfil. Por isso, neste item serão apresentados apenas os valores da carga de escoamento (P_y) para as colunas sem furos, para as quais as deformações sofridas, conforme visto nos itens 6.7.1 e 6.7.2, é mais uniforme.

De maneira análoga as colunas *midi* e *maxi*, foram obtidas as cargas P_y para as colunas sem furos com seção *super maxi*. A Tabela 6.15 apresenta estes valores e as cargas calculadas de acordo com a NBR 14762 e o AISI, $P_{n,NBR}$ e $P_{n,AISI}$, respectivamente.

Tabela 6.15 - Cargas nominais e de escoamento para seções *super maxi* instrumentadas.

<i>Coluna</i>	P_u (kN)	f_{ya} (MPa)	ξ_{esc} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	P_y (kN)	$P_{n,NBR}$ (kN)	$P_{n,AISI}$ (kN)
SM1S2	178,73	443,70	2112,87	166,58	119,11	165,62
SM1S3	178,99	443,70	2112,87	163,40	118,45	165,57
SM2S2	198,76	408,20	1943,80	177,48	136,50	188,31
SM2S3	211,30	408,20	1943,80	182,84	135,86	188,19
SM3S3	277,13	446,38	2125,62	210,68	162,32	224,71
SM3S4	274,62	446,38	2125,62	208,02	166,51	229,91
SM3S5	269,94	446,38	2125,62	218,89	161,09	222,28
SM4S1	289,53	405,15	1929,29	257,05	188,90	256,38
SM4S2	289,64	405,15	1929,29	247,53	189,14	256,42
SM4S3	289,49	405,15	1929,29	246,57	191,06	259,00

Os valores encontrados para cargas nominais segundo AISI estão acima ou próximos às cargas de escoamento para as espessuras analisadas, enquanto as cargas calculadas considerando a norma brasileira são inferiores a P_y . O gráfico da Figura 6.28 permite uma melhor visualização do comportamento das cargas.

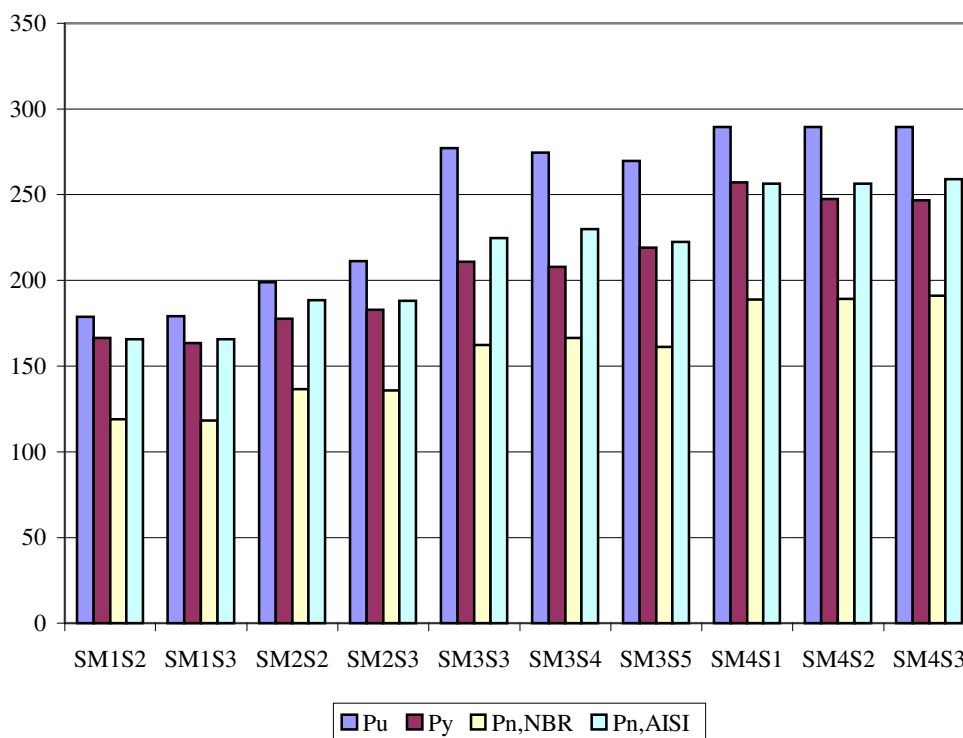


Figura 6.28 – Gráfico das cargas nominais e de escoamento das colunas tipo *super maxi* sem furos.

As Figuras 6.23, 6.24, 6.25 e 6.26 ilustram as deformações das colunas SM1S3, SM2S2, SM3S3 e SM4S1, respectivamente. Observa-se que o comportamento é similar aos analisados nos itens 6.7.1 e 6.7.2, não ocorrendo grandes dispersões de valores.

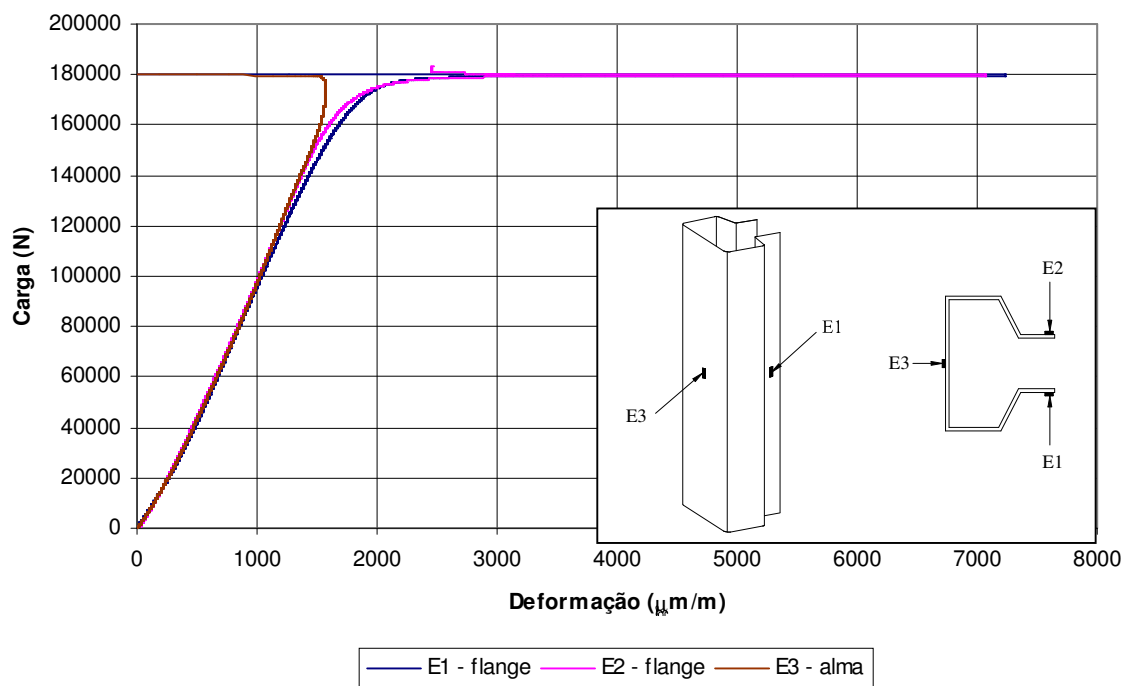


Figura 6.29 - Gráfico *Carga x Deformação* da coluna SM1S3.

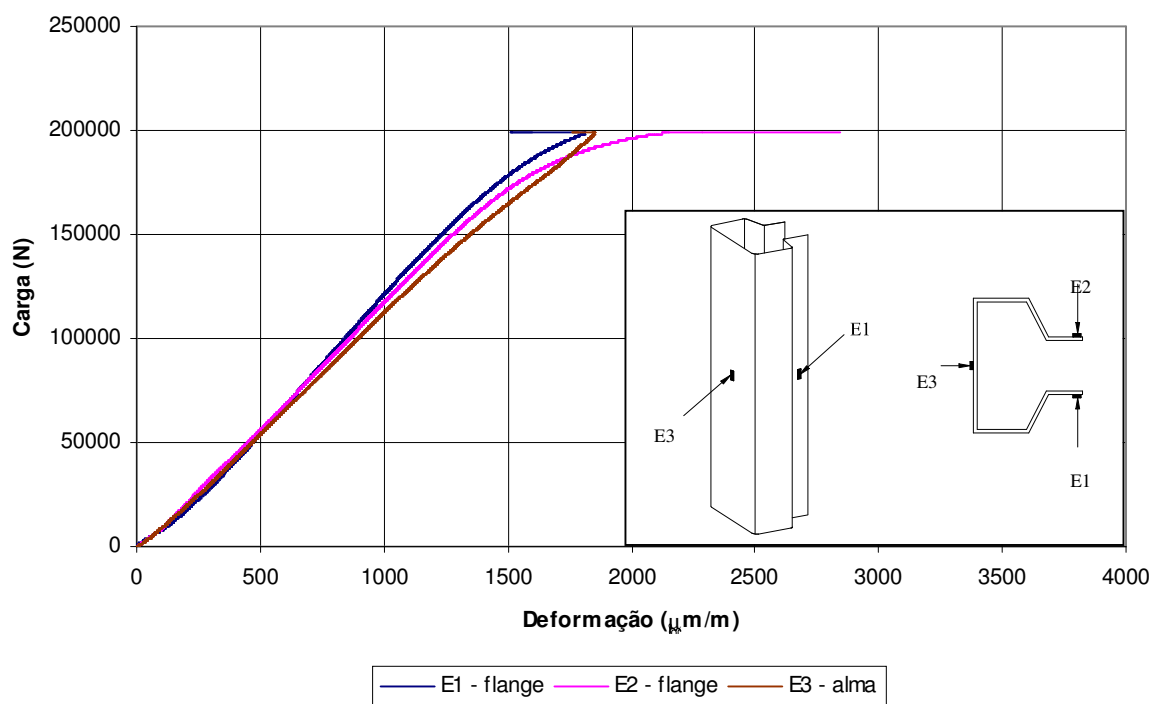


Figura 6.30 - Gráfico *Carga x Deformação* da coluna SM2S2.

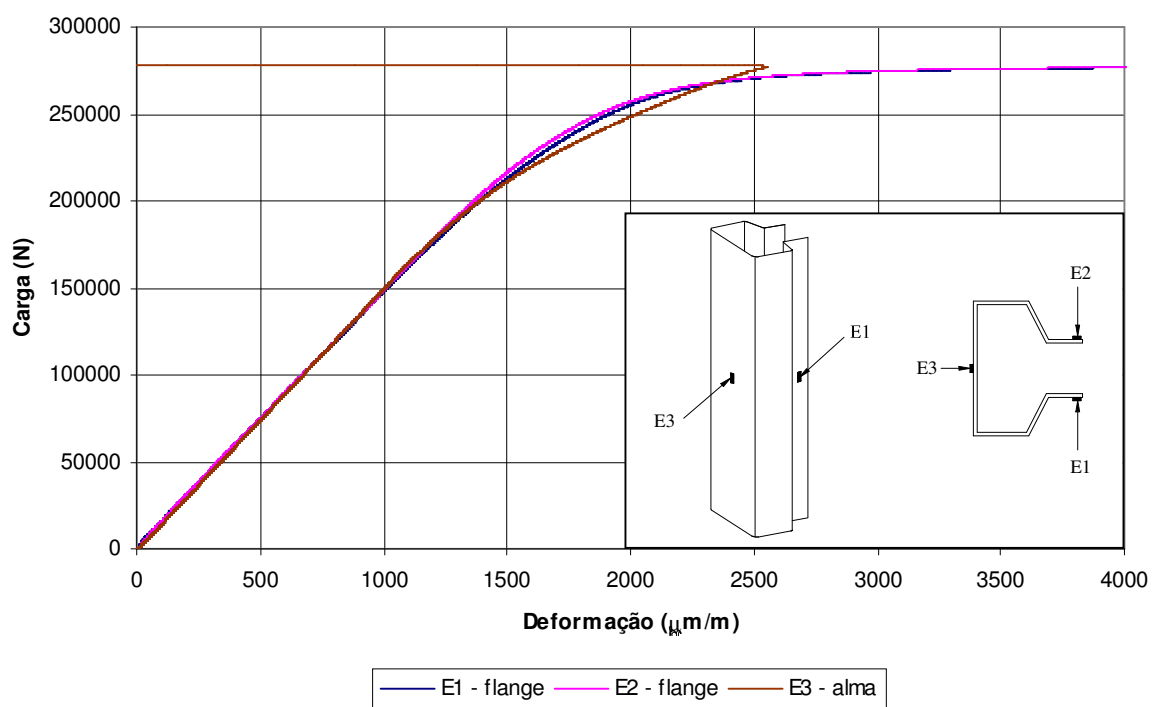


Figura 6.31 - Gráfico *Carga x Deformação* da coluna SM3S3.

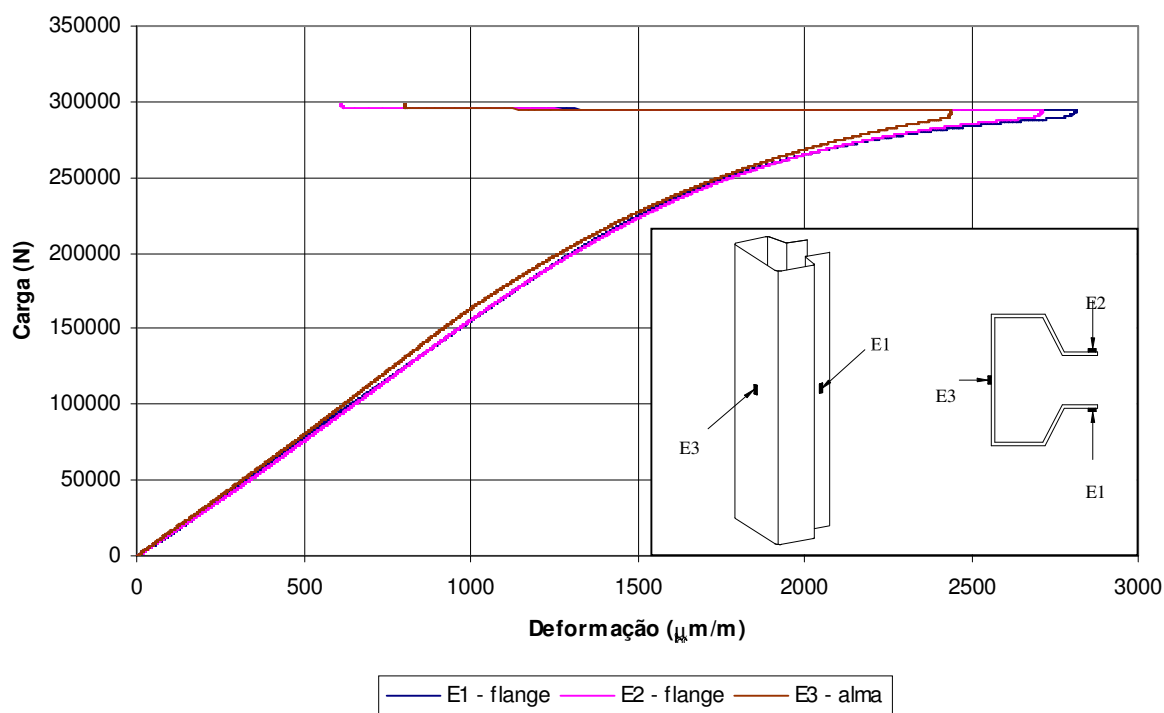


Figura 6.32 - Gráfico *Carga x Deformação* da coluna SM4S1.

Para as colunas com furos, analisando os gráficos das Figuras 6.27, 6.28, 6.29 e 6.30, tem-se que, ao contrário do observado nas colunas *midi* e *maxi*, os extensômetros localizados na alma

sofrem maiores deformações. Isto ocorre devido à distância de $E1$ e $E2$ dos furos localizados nos flanges.

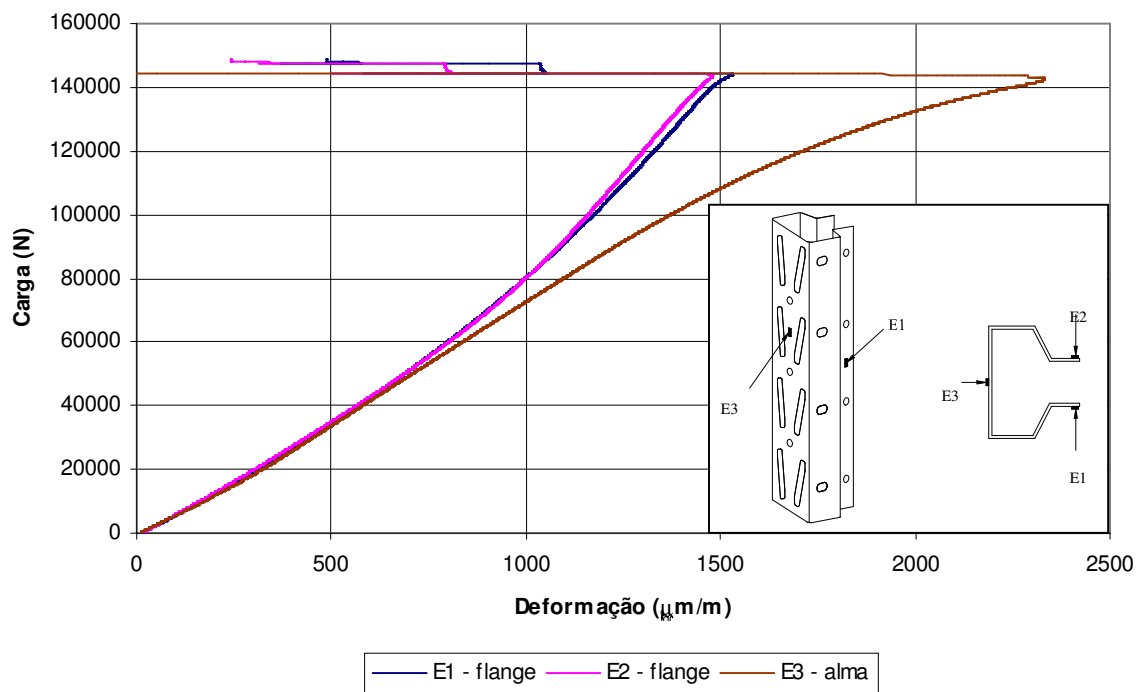


Figura 6.33 - Gráfico *Carga x Deformação* da coluna SM1C4.

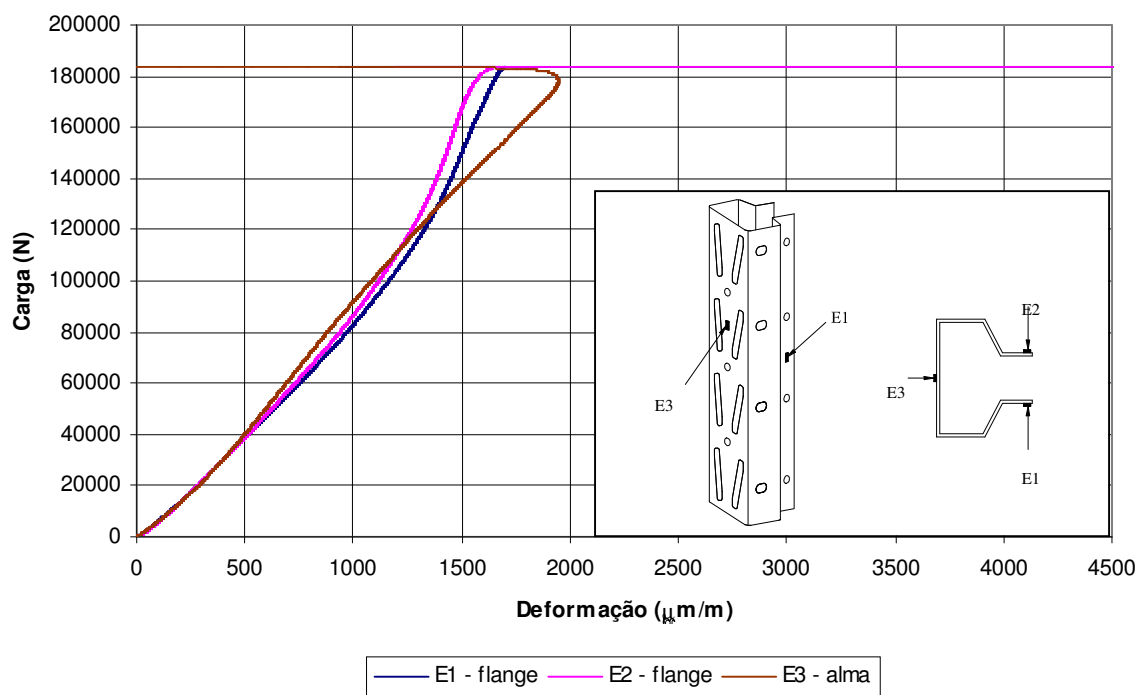


Figura 6.34 - Gráfico *Carga x Deformação* da coluna SM2C4.

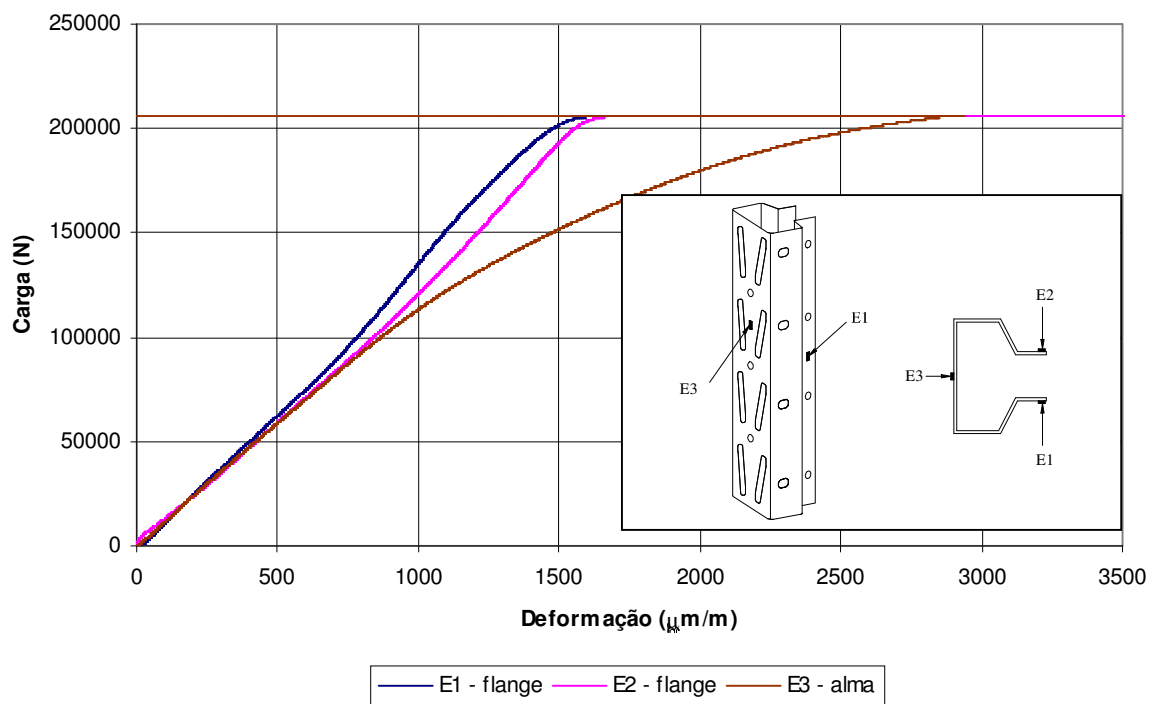


Figura 6.35 - Gráfico *Carga x Deformação* da coluna SM3C3.

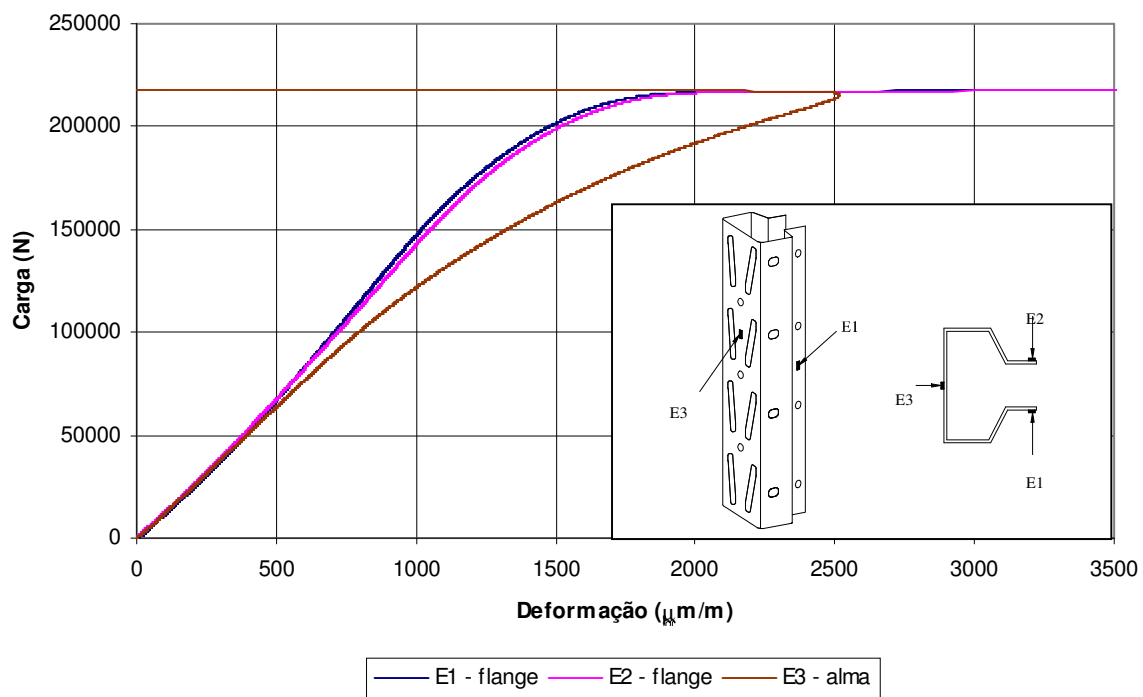


Figura 6.36 - Gráfico *Carga x Deformação* da coluna SM4C1.

Capítulo 7 – CONCLUSÕES

As colunas que compõe os sistemas *racks* de armazenagem industrial são normalmente formadas por perfis formados a frio e apresentam seqüência de perfurações para encaixe das ligações. A variedade de tamanhos e configurações destes furos dificulta a análise teórica do problema, sendo indicado pela associação americana de fabricantes de sistemas *racks*, RMI (1997), a realização de ensaios experimentais para avaliação da influência das perfurações na capacidade de carga das colunas. No Brasil, não existem prescrições específicas para o dimensionamento de elementos perfurados. No entanto, a norma brasileira (NBR 14762, 2001), ao contrário da americana (AISI, 1996), considera o modo distorcional de flambagem no cálculo da carga nominal de colunas sem perfurações com seção transversal tipo *rack*.

Neste trabalho foram analisadas experimentalmente as colunas de seção *rack* de diferentes tipologias, com e sem perfurações, de modo a avaliar a influência dos furos na capacidade de carga, bem como a distribuição de tensões nas colunas perfuradas. Foram instalados extensômetros elétricos de resistência em alguns pontos dos perfis a fim de obter um melhor acompanhamento das deformações, e tornar possível a análise das regiões de maiores concentrações de tensões.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais das colunas com furos foram comparados com as prescrições do RMI e a formulação proposta por Sarawit e Peköz (2003). Em relação às colunas sem furos, os resultados experimentais foram analisados e comparados com as prescrições indicadas pela norma americana e pela norma brasileira de dimensionamento de perfis formados a frio.

Para aplicar as recomendações da NBR 14762 e, simultaneamente, considerar os efeitos das perfurações na capacidade de cargas das colunas analisadas, foi feita uma proposta de adaptação das prescrições do RMI ao método indicado pela norma brasileira para o cálculo da carga nominal axial de colunas sujeitas a compressão.

Considerando as análises acima citadas, foram levantadas as conclusões descritas a seguir:

- Os resultados das cargas últimas experimentais das colunas com e sem furos indicaram que a capacidade de carga sofre significativa redução devido às perfurações;

- Para as colunas com furos, a área efetiva calculada segundo Sarawit e Peköz (2003) é maior que a obtida através do RMI. Este valor é praticamente igual à área líquida mínima quando não há ocorrência de flambagem local, indicando uma forte influência deste modo de flambagem na diferença entre as áreas;
- O modo distorcional de flambagem é dominante nas colunas sem furos analisadas. Isto foi verificado através do dimensionamento pela norma brasileira, onde a carga crítica foi a correspondente à flambagem por distorção da seção transversal;
- Nas colunas sem furos com maiores valores de esbeltez distorcional, as cargas nominais calculadas de acordo com o AISI ficam bem próximas das cargas últimas experimentais, portanto contra a segurança;
- Mesmo considerando a redução da capacidade de carga através do parâmetro Q , inserido no cálculo da capacidade de carga por flambagem por flexão, torção e flexo-torção da NBR 14762, o modo distorcional se apresenta como o crítico no dimensionamento das seções com furos analisadas;
- As cargas obtidas utilizando a área efetiva indicada pelo RMI são menores que as calculadas segundo formulações propostas por Sarawit;
- Através de extensômetros elétricos de resistência foi observado que as regiões próximas aos furos apresentaram maiores níveis de deformações;
- As cargas nominais calculadas segundo RMI e Sarawit para as colunas *midi* e *maxi* perfuradas, são superiores à carga correspondente ao início do escoamento do perfil;
- A adaptação proposta para a consideração de colunas perfuradas através da NBR 14762 atendeu a quase todas as espessuras das seções *midi* e *maxi*, superando apenas a carga de escoamento das colunas com 2,00 mm de espessura;
- Nas colunas *midi* e *maxi* sem furos com espessura de 2,00mm as cargas nominais obtidas pelo AISI superam as cargas de escoamento, enquanto as calculadas pela NBR, que considera os efeitos da flambagem distorcional, são inferiores;
- Para as demais colunas sem furos com seções tipo *midi* e *maxi*, tanto os valores baseados na norma americana, quanto os obtidos através da norma brasileira, estão abaixo da carga de escoamento;
- Os valores das cargas nominais para colunas sem furos, com seção *super maxi*, calculados de acordo com as especificações do AISI são superiores ou muito próximas às

cargas de escoamento. Já as cargas obtidas pela NBR 14762 estão a favor da segurança para todas as espessuras analisadas.

De um modo geral, conclui-se através deste trabalho que a solução proposta para aplicação da NBR 14762 no cálculo da carga nominal de colunas perfuradas apresenta valores satisfatórios e com maior segurança que os métodos indicados pelo RMI e Sarawit. E, para o caso de colunas sem furos, a utilização da norma brasileira também origina valores mais seguros que o emprego da norma americana.

A seguir são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliação segundo o Método da Resistência Direta conjuntamente com o RMI;
- Maior mapeamento das deformações sofridas pelos perfis durante o ensaio da coluna curta para melhor análise do modo distorcional de flambagem;
- Ensaios experimentais em colunas com enrijecedores adicionais, como a seção *hiper maxi*, por exemplo, analisando a capacidade de carga e as deformações em diversos pontos do perfil;
- Simulações numéricas dos ensaios realizados e comparação dos resultados;
- Realização de ensaios em colunas longas, de modo a verificar a flambagem global do perfil.

Capítulo 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

A.Boletti (2005). **A.Boletti & Cia Ltda.** - <http://www.aboletti.com.br> – 11/01/2005.

Águia (2005). **Águia Sistemas de Armazenagem Ltda.** – <http://www.aguiasistemas.com.br> - 12/01/2005.

Águia (2005a). **Águia Sistemas de Armazenagem Ltda.**, catálogo, Ponta Grossa – PR.

Águia (2005b). **Projeto de detalhe de colunas dos sistemas porta-pallets**, Águia Sistemas de Armazenagem Ltda., Ponta Grossa – PR.

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

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

Altamira (2004). **Altamira Indústria Metalúrgica** – <http://www.altamira.com.br> – 17/05/2004.

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

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

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

Batista, E.; Camotim, D.; Prola, L.C. e Vazquez, E. (1998). **On the Stability and Strength of Steel Columns Affected by Distortional Buckling**. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 46 (1-3), p. 129-131.

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

Bertolini (2004). **Bertolini Sistemas de Armazenagem** – <http://webprg.bertolini.com.br/site/armazenagem/index.htm> – 18/05/2004.

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.

Campos, S.R. (2003). **Estudo teórico-experimental de sistemas de armazenagem industrial tipo *Drive-in***. Dissertação de mestrado. UFOP, Ouro Preto, MG.

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

Dhanalakshmi, M.; Shanmugam, N.E. (2001) **Design for openings in equal-angle cold-formed steel stub columns**. Thin-Walled Structures, v. 39, p. 167–187.

Eurocode 3 (2005). **Design of Steel Structures**. General requirements, Mai.

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

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

Godley, M.H.R. (1991). **Storage Racking In Design of cold Formed Steel Members**, Chapter 11, Ed Rhodes. Elsevier Applied Science, Amsterdam, p. 361-399.

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

HBM (2003). **Manual de operação Spider8 e Spider8-30**.

Isma (2004). **Isma S/A Indústria Silveira de Móveis de Aço**. – <http://www.isma.com.br> - 12/11/2004.

Isma (2005). **Isma S/A Indústria Silveira de Móveis de Aço**, catálogo, Mogi Mirim, SP.

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

Lau, S.C.W.; Hancock, G.J. (1987). **Distortional buckling formulas for channel columns.** Journal of Structural Engineering - ASCE, 113(5), p. 1063-1078

Lau, H.H.; Godley, M.H.R.; Beale, R.G. (2003). **The Influence of Base Connectivity on the Ultimate Load of Columns.** Computers and Structures, v. 81, p. 1827-1849.

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. 57-87.

Markazi, F.D.; Beale, R.G.; Godley, M.H.R. (2001). **Numerical Modeling of Semi-rigid Boltless Connectors.** Computers and Structures, v. 79, p. 2391-2402.

Movsan (2005). **Movsan Equipamentos Industriais Ltda.** – <http://www.amovsan.com.br> – 07/01/2005.

Nagahama, K. J. (2003). **Análise de Estabilidade Local em Perfis de Seção Aberta em Aço e em Resina Reforçada com Fibra de Vidro.** Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

NBR 14762 (2001). **Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio - Procedimento.**

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

Pérez, S. V. S. (2003). **Análise Experimental da Instabilidade Distorcional em Perfis de Paredes Finas e Seção Aberta, sob Força de Compressão Excêntrica.** Tese de doutorado, URFJ, Rio de Janeiro, RJ.

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

Sarawit, A.T.; Peköz, T. (2003). **Cold-formed Steel Frame and Beam-column Design.** Research Report N° 03-03, Cornell University, Ithaca, NY.

Scheffer, R. (1998). **Depoimento pessoal.** in: Diversidade de Sistemas Mantém Competitividade na Armazenagem, Movimentação e Armazenagem, ano XIX, nº 106.

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

Schardt, R. (1994). **Generalized Beam Theory - An Adequate Method for Coupled Stability Problems.** Thin Wall Struct;19(2-4):161-80.

Sofima (2004). **Sofima S/A.** Divisão Metalúrgica – <http://www.indusa.com.br> - 18/05/2004.

Souza, F. T. (2005). **Análise Teórico-Experimental de Sistemas Aporticados com Elementos Perfurados em Perfis Formados a Frio – Racks.** Dissertação de mestrado. UFOP, Ouro Preto, MG.

Steel King (2004). **Steel King Industries.** – <http://www.steelking.com> - 18/05/2004.

Três S (2004). **Companhia de Móveis Três S** – <http://www.moveistres-s.com.br> – 10/05/2004.

Vasquez, E. G. (2002). **Análise Teórica e Experimental da Instabilidade Torcional de Perfis Formados a Frio sob Compressão Centrada**. Tese de doutorado. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Venanci, V. (2005). **Resistência de Vigas-Colunas Formadas por Perfis de Aço de Chapa Dobrada, com base no Método da Resistência Direta**. Dissertação de mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

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

Anexo I

Controle dimensional dos protótipos analisados

Anexo II

Gráficos Carga x Deformação