

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
MODALIDADE ESTRUTURAS**

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DOS CONTRAVENTAMENTOS
TRELIÇADOS EM EDIFÍCIOS COM ESTRUTURA DE AÇO**

por

MARCELO PESSOA DE AQUINO FRANCA

Orientador: Prof. Doutor Romilde Almeida de Oliveira

“ESTUDO DA EFICIÊNCIA DOS CONTRAVENTAMENTOS TRELIÇADOS EM EDIFÍCIOS COM ESTRUTURA DE AÇO”

Marcelo Pessoa de Aquino Franca

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE “MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL”.

Aprovado por:

Romilde Almeida de Oliveira, D.Sc.
(Presidente)

Antônio Oscar Cavalcanti da Fonte, D.Sc.

Humberto Lima Soriano, D.Sc.

Recife, PE - Brasil
Agosto de 2003

“Nem tudo o que escrevo resulta numa realização, resulta mais numa tentativa. O que também é um prazer. Pois nem tudo eu quero pegar. Às vezes eu quero apenas tocar. Depois, o que toco às vezes floresce e os outros podem pegar com as duas mãos”
(Clarice Lispector)

A meu filho, Marcelo, pela alegria das pausas e sonoridades.

A minha esposa, Viviane, pela oferta amorosa das condições essenciais para a realização deste trabalho.

A meu irmão, Marcílio, pelo estímulo sempre renovado.

A minha irmã, Nevita Maria, pela ternura com que acompanhou esta trajetória e pela valiosa colaboração nos trabalhos finais de revisão.

A meu pai, Marcílio, pela descoberta da Engenharia.

E, em especial, à minha mãe, Nevita, de cuja biblioteca e exemplo veio a abertura do horizonte acadêmico em nossas vidas.

Agradecimentos especiais ao Prof. D.Sc. Romilde Almeida de Oliveira, pela presteza, paciência e seriedade intelectual com que conduziu este trabalho de orientação.

Agradecimentos ao Corpo Docente do Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos amigos de mestrado, em especial ao Eng. M.Sc. Fábio Lopes pelo convívio cordial e prestimoso.

Agradecimentos à secretária do Mestrado em Engenharia Civil, Sra. Laudénice Bezerra, pela acolhida sempre cordial aos alunos.

Agradecimentos especiais a Deus, pelo amparo, sem o qual não seria possível superar a desproporção entre as exigências do cotidiano e as minhas forças.

RESUMO

FRANCA, M. P. de A. (2003). **Estudo da Eficiência dos Contraventamentos Treliçados em Edifícios com Estrutura de Aço**. Recife, 2003, 333 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Contraventamento treliçado é um dos sistemas de resistência a cargas laterais mais utilizado em edifícios de andares múltiplos estruturados em aço. Diversas são as possibilidades de uso deste tipo de contraventamento, podendo ser empregado satisfatoriamente tanto em edifícios de pequena quanto de elevada altura, como nos altos arranha-céus com estruturas tubulares treliçadas.

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo das diversas possibilidades de utilização deste sistema de resistência a cargas laterais. Diversos aspectos foram analisados. Entre outros, podemos citar a esbeltez do contraventamento, o tipo de treliçamento, a contribuição da rigidez axial dos elementos da treliça nos deslocamentos da estrutura, a posição do contraventamento em relação ao centro de rotação da edificação, a variação do contraventamento ao longo da altura da edificação, a associação entre contraventamentos, o posicionamento dos contraventamentos ao longo da altura e o tamanho dos módulos do treliçamento.

Foi realizada uma análise numérica utilizando o método dos elementos finitos, sendo os elementos estruturais pré-dimensionados de acordo com as prescrições da NBR-8800. Para as vigas e as lajes foi adotado o sistema misto, não escorado, onde as propriedades geométricas da seção mista foram obtidas por homogeneização teórica da seção.

Palavras chaves: Estruturas de Aço, Edifícios Altos, Sistemas de Contraventamento, Contraventamentos Treliçados.

ABSTRACT

FRANCA, M. P. de A. (2003). **Study of Braced Frames Efficiency in Buildings with Steel Structure**. Recife, 2003, 333 p. Dissertation (Master of Sciences) – Federal University of Pernambuco (UFPE).

Braced Frame is one of the most used lateral load resistance systems in steel-structured multistory buildings. There are several manners of using this bracing type, which could be satisfactorily employed in either high or low buildings, as well as in the high sky-scrapers with braced-tube structures.

The objective of the present work is to carry out a comparative study of the several possible uses of this lateral loads resistance system. Various aspects have been analyzed. Among others, we can mention the slenderness of the bracing, the types of bracing, the influence of the axial rigidity of the bracing elements on the displacements of the structure, the position of the bracing in relation to the center of gravity of the construction, the variation of the bracing along the top of the building, the association among bracings, the bracings positioning along the height and the size of the bracing modules.

A numerical analysis was made using the Finite Elements Method, with the pre-designed structural elements being in agreement with the prescriptions of NBR-8800. For beams and slabs the non-sustained mixed system was adopted, where the geometric properties of the mixed section were obtained by theoretical homogenization of the section.

Keywords: Steel Structures, Tall Building, Braced Systems, Braced Frames.

ÍNDICE

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	viii
CAPÍTULO I	1
1.1. Os Edifícios de Andares Múltiplos	1
1.2. As estruturas de aço no Brasil	2
1.3. Motivação do Trabalho	5
1.4. Objetivo	7
1.5. Conteúdo	7
CAPÍTULO II	8
2.1. Sistemas estruturais para edifícios em aço	8
2.2. Principais sistemas estruturais para edifícios de andares múltiplos	10
2.2. Contraventamentos treliçados	18
CAPÍTULO III	28
3.1. Descrição da estrutura	28
3.2. Ações consideradas	39
3.3. Combinações de ações	57
3.4. Modelagem dos elementos estruturais	59
3.5. Efeitos de segunda ordem	77
3.6. Considerações sobre a análise estrutural	80
3.7. Recomendações quanto ao comportamento da estrutura	81

CAPÍTULO IV	82
4.1. Análise dos resultados quanto aos diferentes tipos de contraventamento	82
4.2. Análise dos resultados quanto a contribuição da rigidez axial dos pilares, vigas e diagonais, nos deslocamentos laterais da estrutura	100
4.3. Análise dos resultados quanto ao posicionamento dos contraventamentos em diferentes vãos ao longo da altura da edificação	110
4.4. Análise dos resultados quanto à associação em linha dos contraventamentos	135
4.5. Análise dos resultados quanto ao posicionamento dos contraventamentos em relação ao centro de rotação da edificação	161
4.6. Análise dos resultados quanto à esbeltez do contraventamento	174
4.7. Análise comparativa quanto ao tamanho dos módulos dos contraventamentos	188
4.8. Análise dos resultados quanto à diminuição do contraventamento ao longo da altura da edificação	208
4.9. Análise dos resultados quanto à interação entre contraventamentos em único vão e em grande escala	232
CAPÍTULO V	257
5.1. Conclusão	257
5.2. Sugestões para futuros trabalhos	260
APÊNDICE I	261
APÊNDICE II	268
APÊNDICE III	275
BIBLIOGRAFIA	332

LISTA DE FIGURAS

- Figura I.1 - Edifício Guinle em São Paulo	4
- Figura II.1 - Fábrica de Chocolate sobre o Rio Marne	10
- Figura II.2 - Detalhe das ligações Momento Resistentes das estruturas de pórticos rígidos	12
- Figura II.3 - Interação entre pórticos rígidos e núcleos estruturais	13
- Figura II.4 - Exemplo de transição em estruturas tubulares	14
- Figura II.5 - Ed. John Hancock Building	15
- Figura II.6 - Estrutura com paredes de cisalhamento	16
- Figura II.7 - Estrutura com núcleo e treliças transversais	16
- Figura II.8 - Exemplo de sistema estrutural híbrido composto por tubo apertado, núcleo de rigidez e treliças transversais	17
- Figura II.9 - Contraventamento de triângulos “totais”	20
- Figura II.10 - Contraventamento de triângulos parciais	20
- Figura II.11 - Contraventamento em grande escala	22
- Figura II.12 - Edifícios Mercantile Tower e Alcan Building	
- Figura II.13 - Esquema do caminhamento das cargas horizontais nos elementos dos contraventamentos	23
- Figura II.14 - Esquema do caminhamento das cargas gravitacionais nos elementos dos contraventamentos	24
- Figura II.15 - Configuração de flexão dos contraventamentos treliçados	25
- Figura II.16 - Contraventamento em único vão e em vários vãos	26
- Figura III.1 - Planta Baixa do edifício modelo	29
- Figura III.2 - Elevação do edifício modelo de 30 pavimentos	29
- Figura III.3 - Elevação do edifício modelo de 50 pavimentos	30
- Figura III.4 - Tipos de treliçamento utilizados no contraventamento	31
- Figura III.5 - Localização em planta dos sistemas de contraventamento	32
- Figura III.6 - Contraventamentos posicionados em diferentes vãos	33
- Figura III.7 - Contraventamentos associados em linha	34
- Figura III.8 - Contraventamento nas fachadas	35
- Figura III.9 - Contraventamento “X” posicionado nas fachadas e contraventamento “Y” interno	35
- Figura III.10 - Contraventamentos em “X” e em “Y” internos	36
- Figura III.11 - Contraventamentos com diferentes valores de esbeltez	37

- Figura III.12 - Detalhe do contraventamento	37
- Figura III.13 - Variação do contraventamento ao longo da altura da edificação	38
- Figura III.14 - Interação entre contraventamentos em único vão e contraventamentos em grandes módulos	38
- Figura III.15 - Consumo de aço x nº de andares	41
- Figura III.16 - Velocidade do vento x Altura da edificação, para terrenos com diferentes graus de rugosidade.	43
- Figura III.17 - Contribuição dos elementos estruturais e não estruturais no deslocamento lateral para edificações tradicionais	44
- Figura III.18 - Contribuição dos elementos estruturais e não estruturais no deslocamento lateral para edificações modernas	44
- Figura III.19 - Vista geral de uma laje Steel Deck MF-75	61
- Figura III.20 - Representação do diafragma rígido	62
- Figura III.21 - Seção homogeneizada para cálculo em regime elástico	68
- Figura III.22 - Tipos de perfis para contraventamento	70
- Figura III.23 - Diagrama momento /rotação para diferentes tipos de ligações	72
- Figura III.24 - Exemplo de ligação flexível, semi-rígida e rígida [22]	72
- Figura III.25 - Diagrama tensão-deformação do aço ASTM-A36	73
- Figura III.26 - Diagrama corrosão-exposição do aço em atmosfera industrial	74
- Figura III.27 - Diagrama corrosão-exposição do aço em atmosfera marinha	75
- Figura III.28 - Consideração do efeito P-delta	78
- Figura III.29 - Efeito P-delta em edifícios	79
- Figura IV.1 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura com contraventamento em "X"	83
- Figura IV.2 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura com contraventamento em "X"	84
- Figura IV.3 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura com contraventamento em "V"	85
- Figura IV.4 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura com contraventamento em "V"	86
- Figura IV.5 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura com contraventamento em "V" invertido	87
- Figura IV.6 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura com contraventamento em "V" invertido	88
- Figura IV.7 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura com contraventamento em diagonais no mesmo sentido	89

- Figura IV.8 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura com contraventamento em diagonais no mesmo sentido	90
- Figura IV.9 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura contraventada com diagonais em sentido contrário	91
- Figura IV.10 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura contraventada com diagonais em sentido contrário	92
- Figura IV.11 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para os diferentes tipos de contraventamento	93
- Figura IV.12 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para os diferentes tipos de contraventamento	94
- Figura IV. 13 - Comportamento dos contraventamentos com diagonais no mesmo sentido	96
- Figura IV.14 - Consumo de aço por metro quadrado para os diferentes tipos de contraventamento	99
- Figura IV.15 - Comportamento dos contraventamentos em "V" e "V" invertido	100
- Figura IV.16 - Deslocamento lateral na direção "Y" x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial dos pilares	101
- Figura IV.17 - Deslocamento lateral na direção "X" x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial dos pilares	102
- Figura IV.18 - Deslocamento lateral na direção "Y" x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial das diagonais	103
- Figura IV.19 - Deslocamento lateral na direção "X" x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial das diagonais	104
- Figura IV.20 - Deslocamento lateral na direção "Y" x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial das vigas	105
- Figura IV.21 - Deslocamento lateral na direção "X" x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial das vigas	106
- Figura IV.22 - Deslocamento lateral na direção "Y" devido aos pilares, vigas e diagonais x Altura da edificação	107
- Figura IV.23 - Deslocamento lateral na direção "X" devido aos pilares, vigas e diagonais x Altura da edificação	108
- Figura IV.24 - Deslocamento lateral na direção "X" x Rigidez axial dos pilares	109
- Figura IV.25 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão juntos	111
- Figura IV.26 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão juntos	112

- Figura IV.27 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão	113
- Figura IV.28 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão	114
- Figura IV.29 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos posicionados em três vãos adjacentes	115
- Figura IV.30 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos posicionados em três vãos adjacentes	116
- Figura IV.31 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos posicionados em três vãos adjacentes	117
- Figura IV.32 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos posicionados em três vãos adjacentes	118
- Figura IV.33 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos em vãos adjacentes	119
- Figura IV.34 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos em vãos adjacentes	120
- Figura IV.35 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos em vãos adjacentes	121
- Figura IV.36 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos em vãos adjacentes	122
- Figura IV.37 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 30 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos	123
- Figura IV.38 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 30 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos	124
- Figura IV.39 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos	125
- Figura IV.40 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos	126
- Figura IV.41 - Esquema de propagação do corte horizontal através dos pilares	127
- Figura IV.42 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 30 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos	128
- Figura IV.43 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos	134
- Figura IV.44 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos contraventada com duas treliças juntas	136
- Figura IV.45 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura	137

de 30 pavimentos contraventada com duas treliças juntas	
- Figura IV.46 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos contraventada com duas treliças juntas	138
- Figura IV.47 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos contraventada com duas treliças juntas	139
- Figura IV.48 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos contraventada com treliças separadas	140
- Figura IV.49 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos contraventada com treliças separadas	141
- Figura IV.50 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos contraventada com treliças separadas	142
- Figura IV.51 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos contraventada com treliças separadas	143
- Figura IV.52 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos interligados	144
- Figura IV.53 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos interligados	145
- Figura IV.54 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos juntos	146
- Figura IV.55 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos juntos	147
- Figura IV.56 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 30 pavimentos para as três diferentes formas de associações dos contraventamentos	148
- Figura IV.57 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 30 pavimentos para as três diferentes formas de associações dos contraventamentos	149
- Figura IV.58 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos para as três diferentes formas de associações dos contraventamentos	150
- Figura IV.59 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos para as três diferentes formas de associações dos contraventamentos	152
- Figura IV.60 - Esquema de contraventamentos treliçados	153
- Figura IV.61 - Esquema da deformada de contraventamentos sem e com treliça horizontal	154
- Figura IV.62 - Momentos fletores M_x não lineares geométricos, atuantes no pilar 23, na estrutura de 50 pavimentos, utilizando contraventamentos interligados	155
- Figura IV.63 - Consumo comparativo de aço por metro quadrado da estrutura de 30 pavimentos utilizando diferentes associações de contraventamento	160

- Figura IV.64 - Consumo comparativo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos utilizando diferentes associações de contraventamento	161
- Figura IV.65 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura com todos os contraventamentos nas fachadas	162
- Figura IV.66 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura com todos os contraventamentos nas fachadas	163
- Figura IV.67 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e com contraventamentos na fachada na direção "X" e internos na direção "Y"	164
- Figura IV.68 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e com contraventamentos na fachada na direção "X" e internos na direção "Y"	165 166
- Figura IV.69 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com todos os contraventamentos internos	166
- Figura IV.70 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com todos os contraventamentos internos	167
- Figura IV.71 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para os diferentes posicionamentos de contraventamento em relação ao C.G. da estrutura	168
- Figura IV.72 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para os diferentes posicionamentos de contraventamento em relação ao C.G. da estrutura	169
- Figura IV.73 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos para as diferentes posições de contraventamentos em relação ao C.G da estrutura	173
- Figura IV.74 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos com um vão de largura	175
- Figura IV.75 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos com um vão de largura	176
- Figura IV.76 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com dois vãos de largura	177
- Figura IV.77 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com dois vãos de largura	178
- Figura IV.78 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com três vãos de largura	179
- Figura IV.79 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com três vãos de largura	180
- Figura IV.80 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes valores de esbeltez	181

- Figura IV.81 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes valores de esbeltez	182
- Figura IV.82 - Contraventamento em "X": momento de inércia do contraventamento	184
- Figura IV.83 - Consumo de aço por metro quadrado para a estrutura de 50 pavimentos utilizando contraventamentos com diferentes valores de esbeltez	187
- Figura IV.84 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos com pequenos módulos	189
- Figura IV.85 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos com pequenos módulos	190
- Figura IV.86 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com módulos pequenos	191
- Figura IV.87 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos com módulos pequenos	192
- Figura IV.88 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos com grandes módulos	193
- Figura IV.89 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos com grandes módulos	194
- Figura IV.90 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com grandes módulos	195
- Figura IV.91 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com grandes módulos	196
- Figura IV.92 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 30 pavimentos para os diferentes tamanhos dos módulos	197
- Figura IV.93 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 30 pavimentos para os diferentes tamanhos dos módulos	198
- Figura IV.94 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes tamanhos dos módulos	199
- Figura IV.95 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes tamanhos dos módulos	200
- Figura IV.96 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos de pequenos e grandes módulos	207
- Figura IV.97 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos de pequenos e grandes módulos	207
- Figura IV.98 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos utilizando dois contraventamentos juntos	209
- Figura IV.99 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura	210

de 30 pavimentos utilizando dois contraventamentos juntos	
- Figura IV.100 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos utilizando dois contraventamentos juntos	211
- Figura IV.101 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos utilizando contraventamentos juntos	212
- Figura IV.102 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com dois contraventamentos juntos	213
- Figura IV.103 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com três contraventamentos juntos	214
- Figura IV.104 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com três contraventamentos juntos	215
- Figura IV.105 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com três contraventamentos juntos	216
- Figura IV.106 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamento escalonado	217
- Figura IV.107 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamento escalonado	218
- Figura IV.108 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamento escalonado	219
- Figura IV.109 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamento escalonado	220
- Figura IV.110 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 30 pavimentos utilizando contraventamentos escalonados e contínuos	221
- Figura IV.111 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 30 pavimentos utilizando contraventamentos escalonados e contínuos	222
- Figura IV.112 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos utilizando contraventamentos escalonados e contínuos	223
- Figura IV.113 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos utilizando contraventamentos escalonados e contínuos	224
- Figura IV.114 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 30 pavimentos para os diferentes tipos de contraventamento	231
- Figura IV.115 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos para os diferentes tipos de contraventamento	231
- Figura IV.116 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos ao longo de único vão	233
- Figura IV.117 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura	234

de 30 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão	
- Figura IV.118 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão	235
- Figura IV.119 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão	236
- Figura IV.120 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos em grande escala	237
- Figura IV.121 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos em grande escala	238
- Figura IV.122 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos em grande escala	239
- Figura IV.123 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos em grande escala	240
- Figura IV.124 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos em único vão e em grande escala	241
- Figura IV.125 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos em único vão e em grande escala	243
- Figura IV.126 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos em único vão e em grande escala	243
- Figura IV.127 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos em único vão e em grande escala	244
- Figura IV.128 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 30 pavimentos para as três formas de contraventamento	245
- Figura IV.129 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 30 pavimentos para as três formas de contraventamentos	246
- Figura IV.130 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos para as três formas de associações	247
- Figura IV.131 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos para as três formas de associações	248
- Figura IV.132 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 30 pavimentos para as diferentes formas de posicionamento dos contraventamentos	255
- Figura IV.133 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos para as diferentes formas de posicionamento dos contraventamentos	255

CAPÍTULO - I

1.1. OS EDIFÍCIOS DE ANDARES MÚLTIPLOS

A construção civil é um dos parâmetros indicadores do sucesso econômico de uma nação. Os edifícios elevados estão intimamente relacionados com o crescimento populacional urbano, sendo a saída natural para a escassez de edificações. A pequena disponibilidade de terrenos nas proximidades dos grandes centros urbanos serve como combustível à engenharia estrutural na conquista pelo topo do mundo.

A história mostra que o homem, a fim de demonstrar a sua capacidade tecnológica ou econômica, sempre estimulou a construção de estruturas de grande altura. Entre estas estruturas podemos destacar a pirâmide de Quéops no Egito, que com sua geometria estaticamente favorável, chegou a atingir 146,6 metros de altura. Sua estrutura era praticamente maciça, com reduzidas áreas úteis, já que toda a construção era utilizada para transmitir seu peso próprio ao chão.

No entanto, só após o desenvolvimento de materiais mais resistentes e resolvido o problema do transporte vertical, começaram a surgir os primeiros arranha-céus. Entre os mais imponentes podemos citar o Empire State, construído em Nova Iorque no ano de 1929, com 102 pavimentos e 381m de altura, tornando-se um marco para a época. Podemos citar ainda as Torres Sears em Chicago, com seus imponentes 442m, e as Torres Petronas em Kuala Lumpur, atualmente o edifício mais alto do planeta, com 452m.

O Brasil não ficou fora desta competição. Com os edifícios A Noite e Martinelli, com 102,0 e 105,65m de altura respectivamente, concluídos no final da década de 20, o Brasil chegou a ostentar o recorde mundial de altura para edifícios em concreto armado, perdendo apenas para os arranha-céus americanos em aço [1].

A tendência atual aponta para a construção de edifícios cada vez mais altos. Notícias de que arranha-céus estão sendo projetados aparecem com frequência, mostrando que a corrida ao topo do céu parece não ter fim.

Os desafios na construção de edifícios elevados são conhecidos pela engenharia estrutural atual, mas problemas relativos ao ser humano decorrente do seu isolamento, da falta de relacionamento e da perda de contato com a vida nas ruas ainda estão por resolver [2].

1.2. AS ESTRUTURAS DE AÇO NO BRASIL

Apesar das inúmeras vantagens da construção em aço, nosso país tem privilegiado o concreto armado como principal componente das estruturas de suas edificações. Este fato nos remete a um exame histórico, com vistas à compreensão das razões de tal direcionamento.

Aquilo que compreendemos como contemporaneidade, tem início, segundo os historiadores, no ano de 1789, com a tomada da Bastilha, fortaleza e prisão símbolo do absolutismo de Luiz XVI, e a conseqüente irrupção da Revolução Francesa, marco divisório no campo das idéias e das ciências sociais.

Segundo CHAUI [3], *“revoluções históricas acontecem quando longos e quase invisíveis processos de transformação das relações econômicas tornam-se visíveis em instantes de fulguração política nos quais é reconhecido o advento de uma nova sociedade como obra de seus próprios sujeitos”*. A Revolução Francesa representa o “instante de fulguração política”, mas é no seio da Revolução Industrial que se inserem as transformações econômicas que modificaram profundamente a sociedade européia nos séculos XVIII e XIX e cujos efeitos se fizeram sentir de modo nítido na Inglaterra.

Apesar do ferro acompanhar a humanidade desde os tempos primitivos, foi somente a partir das grandes transformações no campo material e de bens de produção ocorridas naquele período que se tornou possível a produção em massa de aço e, como conseqüência, a construção de máquinas e equipamentos em grande escala. A invenção da máquina a vapor pelo inglês James Watt, em 1776, revoluciona a produção com o acionamento de máquinas e equipamentos.

Tanto a moderna siderurgia como a máquina a vapor, possuem como principal combustível a hulha, ou seja, o carvão mineral, fonte poderosa de energia que passa a dominar a civilização. Até então a produção do ferro se dava com a queima do minério através do carvão vegetal. Em 1558 com a proibição pela Rainha Elizabeth I do uso do carvão vegetal na produção de aço, surgiu em 1648 a idéia de se queimar carvão mineral, produto extremamente abundante àquela época na Inglaterra. A princípio a hulha não se prestou para a produção de ferro. Quase um século depois se consegue destilar a hulha resultando daí o coque, um material de alto poder calorífico. No entanto, apenas em 1750 que Abraham Derby II consegue industrializar o processo, dando início à produção do ferro e aço em escala industrial.

A partir desta época os países desprovidos de depósitos de hulha, permaneceriam à margem da civilização industrial.

Os Estados Unidos, ainda dominados pela Inglaterra, possuíam grandes jazidas de hulha da melhor qualidade e, em 1853, com instalação do primeiro alto forno a coque naquele país a industrialização se expande rapidamente. Começa a surgir a partir daí, na segunda metade do século XIX, a grande potência industrial que dominaria o mundo no século XX.

O Brasil por não possuir hulha de boa qualidade, aliado a uma política exploratória portuguesa, não conseguiu entrar no rol das nações industrializadas, permanecendo como nação essencialmente agrícola.

A ciência da construção, baseada, é claro, na matemática e nas leis da mecânica, evoluiu rapidamente desde o fim da Idade Média. Hooke, Bernoulli, Coulomb, Navier são apenas alguns dos grandes nomes que impulsionaram a moderna engenharia das construções.

Com a moderna siderurgia o ferro passa a se incorporar à arte da construção. A pedra, a madeira e o tijolo passam a contar com este novo material, rígido e versátil, revolucionando as técnicas construtivas.

Entre 1777 e 1779, foi construída a primeira estrutura metálica da história, uma ponte sobre o rio Severn, na cidade de Coalbrookdale, na Inglaterra. Sua estrutura possuía mais de 300 toneladas de ferro.

Como já se havia dito, o Brasil teve seu processo de industrialização retardado por, entre outros motivos, não possuir hulha de boa qualidade. A coroa portuguesa desenvolveu esforços nesse sentido, mas não obteve sucesso. Em 1590, Afonso Sardinha instala dois engenhos de ferro na Capitania de São Vicente, mas não logrou êxito. Em 1682 e 1689 duas novas tentativas de produzir ferro custeadas pelo Rei D. Pedro II de Portugal fracassaram. Só em 1891, com o avanço da química se descobre que o motivo pelos sucessivos fracassos é a má qualidade do carvão, que dificultava a sua fusão.

Só em 1943 com a instalação da usina siderúrgica de Volta Redonda, que trabalhava com 70% de carvão mineral importado e 30% nacional, é que finalmente o país ingressa na civilização do aço.

Esse atraso na siderurgia concorre para a valorização do concreto armado, que surgiu em 1850 como solução para a habitação vertical no Brasil.

Em 1913, se instala no Brasil a firma Wayss & Freytag, especializada em concreto armado e uma das maiores construtoras do mundo. O concreto armado, então, começa a ganhar espaço nacional. Em 1912, Hypólipo Gustavo Pujoul Júnior, se propõe a erigir o primeiro arranha céu do Brasil, um prédio de oito andares em São Paulo, com estrutura de concreto armado. A obra se desenvolve de 1913 a 1916, nascendo então o Edifício Guinle (figura - I.1).



Figura I.1 - Edifício Guinle em São Paulo

A partir da década de 1920, começaram a surgir os primeiros prédios no Brasil, em geral com seis pavimentos e com suas fachadas ricamente trabalhadas em relevo. O problema do transporte vertical já havia sido resolvido com a invenção do elevador em Nova York no ano de 1857, por E. G. Otis.

Paralelamente, as melhorias nas condições de vida aceleraram um crescimento populacional nas cidades. Em São Paulo o índice demográfico passa de 80.000 habitantes em 1896 para 200.000 em 1907, provocando o deslocamento das pessoas da região central. Nessa época havia cerca de 39100 habitações em São Paulo, mas apenas 159 possuíam mais de dois andares [4]. Já naquele tempo se iniciavam as primeiras preocupações com o custo dos terrenos, e nascia, então, a necessidade de edificações de múltiplos andares.

O atraso na produção de aço, aliado a uma abundante mão-de-obra barata e desprovida de maiores qualificações, acaba contribuindo para que o Brasil desenvolvesse uma forte tradição na construção de edificações de andares múltiplos estruturadas em concreto armado, ao contrário, por exemplo, dos Estados Unidos que, devido à abundante produção de aço, direcionou sua atividade construtiva para edificações estruturadas com esse material. Apesar destes inconvenientes, com o processo de industrialização da construção civil e com o aumento dos custos referentes à mão-de-obra o aço surge como importante alternativa em nosso país.

1.3. MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A tendência atual dos grandes centros urbanos é que os edifícios sejam cada vez mais altos e esbeltos, em decorrência de vários fatores como: terrenos caros e escassos, infra-estrutura urbana localizada, proximidade dos grandes centros comerciais, etc.

Sabemos que a definição de edifício alto não pode ser universalmente aplicada. Como explica TARANATH [5], uma edificação pode ser chamada de alta para uma determinada região, como Recife, mas pode ser de média ou até mesmo baixa altura se comparada com as edificações existentes em Chicago ou Nova Iorque.

Com a evolução da engenharia estrutural, o aumento do custo com a mão-de-obra e o encarecimento do valor dos terrenos próximos aos centros urbanos, é natural que as estruturas também sofram um processo de mudança. Na dinâmica de transformação das estruturas, algumas alterações podem ser observadas, como a redução na quantidade de pilares, aumento no número de pavimentos e alteração no sistema de vedação vertical, que deixa de ser a alvenaria, a qual proporcionava grande contribuição à rigidez da estrutura, passando-se a utilizar divisórias leves e pouco rígidas. Estas mudanças cada vez mais solicitam das estruturas melhores sistemas de contraventamento.

Na cidade do Recife, a altura média das edificações consideradas como altas passaram de 15 a 20 pavimentos nas décadas de 1970 e 1980 para 30 a 50 pavimentos atualmente. O sistema estrutural apertado, comumente utilizado nas estruturas de concreto armado da nossa região, torna-se pouco eficiente à medida que aumenta a quantidade de pavimentos e sua esbeltez.

Tendo em vista a grande utilização das estruturas de aço nos países de primeiro mundo e sua boa aplicabilidade para edifícios de grande altura, resolveu-se neste

trabalho estudar as edificações de andares múltiplos de aço na faixa dos 30 aos 50 pavimentos, em especial a eficiência do seu sistema de contraventamento.

Edifícios em aço são pouco difundidos no Brasil, sendo o Concreto de Alto Desempenho a saída quase que automática quando se pretende atingir maiores alturas. Como se sabe, muitas vantagens também podem ser obtidas com as edificações em aço, especialmente no que se refere às estruturas para edifícios altos. Dentre as vantagens obtidas com a utilização do aço como principal componente das estruturas podemos citar o menor prazo de execução, maior aproveitamento em área útil, liberdade no projeto de arquitetura, alívio nas cargas das fundações, precisão construtiva, antecipação do ganho, compatibilidade com outros materiais, racionalização de materiais e mão-de-obra, organização do canteiro de obras e garantia de qualidade.

O aço é um dos materiais estruturais com características mais bem definidas; sendo praticamente isotrópico, as teorias de cálculo aplicam-se a ele com bom grau de exatidão.

Os edifícios altos estruturados em aço, devido ao seu menor peso e às suas ligações geralmente rotuladas, estão bem mais susceptíveis aos carregamentos laterais necessitando, por esta razão, de um eficaz sistema de contraventamento. A fim de se atender à demanda de edifícios altos em aço, diversos estudos foram e vêm sendo desenvolvidos visando à obtenção de sistemas eficientes de resistência a cargas laterais. A ação do vento sobre as estruturas sempre foi fonte de preocupação para os profissionais da engenharia estrutural, pois à medida que a edificação adquire altura o efeito do vento torna-se determinante na escolha do sistema estrutural.

Segundo o estudo de MARGARIDO [6], para edificações de 30 a 45 pavimentos o sistema estrutural de resistência a cargas laterais mais indicado é o contraventamento com treliças. SALES [7], lembra que, em qualquer caso, um contraventamento em aço é, na maioria dos projetos, a solução mais econômica para dar estabilidade a uma edificação.

Na concepção de um sistema de resistência a cargas laterais deve haver não apenas a preocupação com a segurança e a estabilidade da estrutura, mas também com o conforto dos ocupantes quanto às vibrações e a integridade dos elementos não estruturais. Este tipo de preocupação se faz necessário devido ao risco de danos materiais como, por exemplo, trincas em alvenarias, mau funcionamento de elevadores, vazamentos em tubulações, entre outros.

1.4. OBJETIVO

Tendo em vista a evolução na quantidade de pavimentos sofrida pelas edificações na região de Recife, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar alguns aspectos relacionados aos edifícios de andares múltiplos em aço para a faixa de altura, entre 30 e 50 pavimentos. Dentre estes aspectos podemos citar o campo de aplicação para as estruturas deste porte, os sistemas estruturais mais comumente utilizados, os sistemas de vedação mais adequados, etc.

O objetivo específico deste trabalho é realizar um estudo comparativo da eficiência dos sistemas de contraventamento formados por septos treliçados, sob diversos aspectos, apresentando soluções orientadoras para aqueles que venham a fazer uso deste tipo de sistema de resistência a cargas laterais.

1.5. CONTEÚDO

No capítulo I foi realizado um breve histórico acerca da evolução do aço no Brasil, foram descritas as motivações que levaram a realizar este trabalho e apresentados os seus objetivos.

No capítulo II foi realizada uma revisão bibliográfica acerca dos sistemas de contraventamento para as edificações em aço, além de uma revisão bibliográfica mais específica abordando os contraventamentos treliçados.

No capítulo III são apresentados os modelos de discretização propostos para os edifícios, suas características, as ações consideradas, a modelagem dos elementos estruturais, além de considerações acerca da análise e do comportamento da estrutura.

No capítulo IV são apresentados os resultados obtidos das diversas análises realizadas.

No capítulo V, são apresentadas as conclusões oriundas das análises efetuadas além de algumas sugestões para futuros trabalhos.

Nos apêndices 1 e 2 são apresentados dois programas computacionais elaborados para o cálculo das vigas mistas aço/concreto e de pilares submetidos à flexo-compressão respectivamente.

No apêndice 3 estão apresentadas todas as tabelas resultantes das análises das estruturas apresentadas neste trabalho.

CAPÍTULO - II

2.1. SISTEMAS ESTRUTURAIS PARA EDIFÍCIOS EM AÇO

De maneira simplificada podemos dizer que a estrutura de um edifício alto em aço é composta por pilares, vigas, lajes e pelos sistemas de contraventamento. À associação destes elementos para a formação de uma edificação damos o nome de sistema estrutural. A função do sistema estrutural de um edifício é de resistir às forças laterais, gravitacionais e demais ações para as quais a obra se destina, de forma segura e tão econômica quanto possível.

Do ponto de vista da engenharia de estruturas, a escolha do sistema estrutural de um edifício alto deveria envolver apenas aspectos relacionados à seleção e ao arranjo dos elementos estruturais destinados a resistir aos esforços verticais e horizontais. No entanto, os sistemas estruturais para edifícios altos são fortemente influenciados por uma gama de fatores, nem todos de cunho estrutural. Dentre estes fatores podemos citar o método construtivo, o tratamento arquitetônico, os sistemas de instalações prediais, a natureza e a intensidade do carregamento horizontal, a altura e a esbeltez do edifício, entre outros. Sabe-se que quanto mais alto e esbelto um edifício, maior a importância dos fatores estruturais, com a necessidade de uma escolha mais apropriada da forma estrutural.

Edifícios de andares múltiplos projetados para uma mesma finalidade, pode ter sua eficiência estrutural comparada a grosso modo em função do peso da estrutura por unidade de área de pavimento. Em edifícios usuais de até 10 pavimentos, que não sejam particularmente esbeltos, o peso do pavimento é fortemente influenciado pelos vãos do pavimento, enquanto o peso das colunas é aproximadamente proporcional à altura do edifício. Para edifícios com mais de 10 pavimentos, a quantidade adicional de material requerido para a resistência dos esforços laterais, aumenta de forma não-linear com a sua altura, de modo que para edifícios com cerca de 50 pavimentos a seleção de um sistema estrutural adequado pode ser decisiva para a economia e viabilidade da edificação [9].

Outro importante parâmetro que afeta a escolha do sistema estrutural é o tipo de ocupação que o edifício terá, a saber:

- edifícios residenciais
- edifícios comerciais
- edifícios de uso misto
- edifícios garagem

Edifícios comerciais modernos possuem grandes áreas livres de pilares no pavimento, para que possam ser subdivididas com divisórias leves formando escritórios. Desse modo os componentes verticais principais da estrutura são organizados, dentro do possível, é claro, ao longo do perímetro da edificação, e interiormente, ao redor dos elevadores e áreas de serviço. Os sistemas de serviço são distribuídos horizontalmente em cada nível e ficam escondidos em forros nos tetos. O espaço extra requerido para tanto causa um aumento na altura média do pé-direito dos andares.

Em hotéis ou edifícios de apartamentos as acomodações são geralmente dispostas repetitivamente ao longo dos pavimentos. Os sistemas de serviço podem ser distribuídos verticalmente, em colunas adjacentes às paredes. Desta forma torna-se desnecessário uma altura maior para o pavimento, e a laje de piso de um pavimento funciona como laje de cobertura para o pavimento inferior.

Edifícios garagem onde a necessidade de um pé-direito de pequena altura é fator fundamental para facilitar a circulação vertical dos veículos conduzem a edifícios de menor altura quando comparado aos edifícios residenciais e comerciais de mesmo número de pavimentos.

Podemos então perceber que a altura de um edifício comercial de 50 pavimentos é significativamente superior à altura de um edifício residencial de 50 pavimentos, que por sua vez é superior à altura de um edifício garagem de mesmo número de pavimentos.

Com respeito ao carregamento lateral, um edifício é uma espécie de balanço vertical. Este balanço vertical pode incluir um ou mais balanços agindo individualmente, como as paredes estruturais, todas fletindo harmoniosamente pela rigidez do plano horizontal das lajes de piso. Alternativamente os sistemas estruturais podem trabalhar através da união de vigas e pilares formando pórticos. Estes vários sistemas básicos podem ter sua rigidez lateral aumentada caso estes sistemas básicos tenham características diferentes de deslocamento livre.

È indiscutível o papel do aço estrutural na história dos edifícios altos. Apropriado para várias alturas de edificação, este material devido a sua alta resistência é

um dos mais utilizados para a construção dos arranha-céus. Permite a possibilidade de maiores vãos de vigamento e, devido a sua pré-fabricação, proporciona execução mais rápida.

Descreveremos a seguir alguns sistemas estruturais usuais em edifícios de andares múltiplos.

2.2. PRINCIPAIS SISTEMAS ESTRUTURAIS PARA EDIFÍCIOS DE ANDARES MÚLTIPLOS

Em meio aos diversos tipos de sistemas estruturais, alguns são mais apropriados para edifícios conformados em aço, outros para concreto armado, muitos podem ser utilizados satisfatoriamente para qualquer material, e alguns exigem a combinação de aço e concreto na mesma estrutura.

Dentre os sistemas estruturais mais utilizados em edifícios de andares múltiplos, podemos citar os seguintes:

2.2.1. ESTRUTURAS CONTRAVENTADAS

Diversas são as maneiras de se contraventurar uma estrutura de edifício para resistir às cargas laterais. No entanto, o termo “estrutura contraventada” é aplicado para se referir àquelas estruturas que utilizam sistemas treliçados como a técnica primeira de contraventamento, para garantir a estabilidade lateral da edificação.

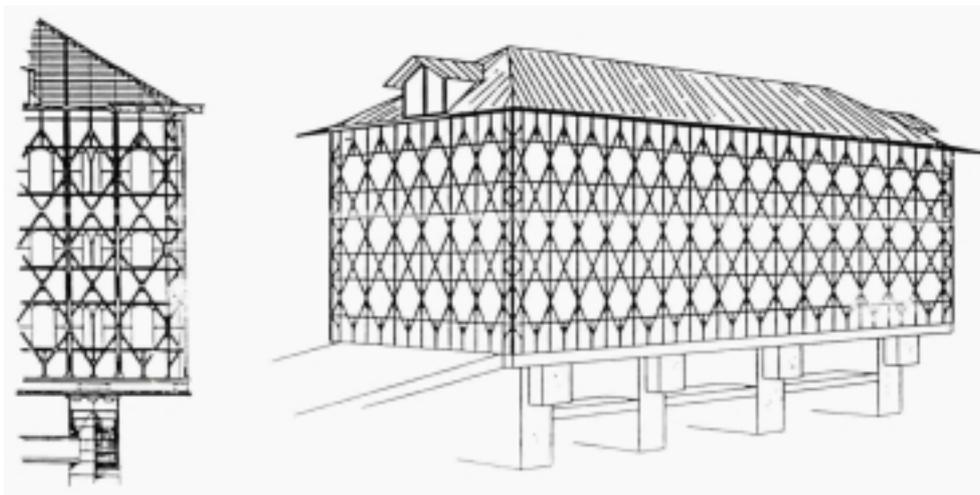


Figura II.1 - Fábrica de Chocolate sobre o Rio Marne [7]

Recomendações para se obter uma estrutura realmente eficiente com a utilização de diagonais, já constavam em publicações do ano de 1890 [7]. Neste sentido podemos citar o edifício de uma fábrica de chocolate, uma das obras mais antigas a utilizar o contraventamento treliçado, sendo construído sobre quatro pilares de uma antiga ponte sobre o rio Marne, nos arredores de Paris, no ano de 1872 (figura II.1). As estruturas contraventadas serão tratadas com mais detalhe no capítulo 2.3.

2.2.2. ESTRUTURA DE PÓRTICOS RÍGIDOS

Este sistema estrutural é bastante conhecido e seu estudo é parte integrante do currículo de qualquer curso de graduação de engenharia. Pórticos rígidos consistem em vigas e pilares convenientemente dispostos, unidos através de conexões resistentes a momentos. Desta forma, a rigidez lateral do chamado pórtico rígido depende diretamente da resistência ao momento fletor das vigas, das colunas e de suas ligações.

No Brasil este sistema estrutural é utilizado na maioria dos edifícios em concreto armado, e sua vantagem principal se encontra no seu arranjo retangular aberto, o que permite grande liberdade arquitetônica. Os pórticos rígidos são mais interessantes para edifícios em concreto armado devido à rigidez inerente às suas conexões. No entanto, pórticos rígidos podem ser uma boa opção para edifícios em aço que não sejam muito altos ou particularmente esbeltos. Para construções com cerca de quatro pavimentos este sistema estrutural é bastante empregado. Nestes casos, a maioria das construções não possui elevadores, o que dificultaria a criação de núcleos rígidos, quer com contraventamentos quer com paredes de concreto.

Uma das desvantagens na utilização do sistema apórticado para estruturas metálicas, encontra-se no alto custo das conexões resistentes a momentos (figura II.2). Outra desvantagem é que as dimensões das colunas e das vigas de um determinado pavimento são influenciadas diretamente pela magnitude do carregamento de corte externo naquele nível da estrutura, aumentando na proporção de sua aproximação com a base. Por conseguinte, os pavimentos tipo destas estruturas nem sempre podem ser repetidos ao longo da altura da edificação, trazendo um prejuízo particular para as edificações em aço, que visa à racionalização do processo construtivo através de uma maior quantidade de peças repetidas.

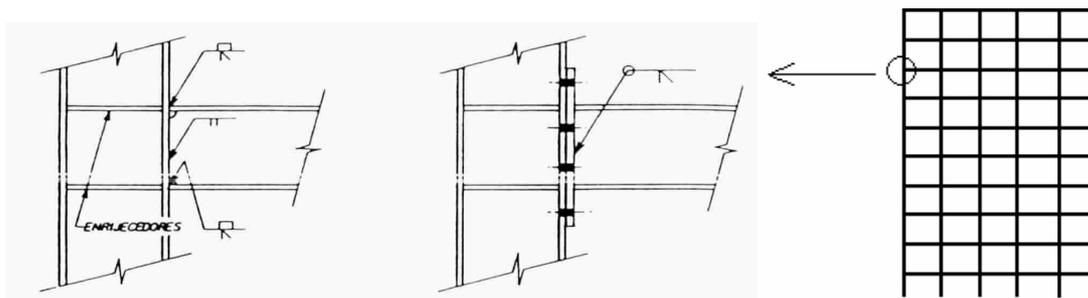


Figura II.2 - Detalhe das ligações momento resistentes das estruturas de pórticos rígidos

2.2.3. ESTRUTURA COM NÚCLEOS OU PAREDES ESTRUTURAIS:

Este sistema estrutural consiste na utilização de grandes núcleos de concreto com rigidez bastante considerável, trabalhando isoladamente ou em conjunto com os pórticos rígidos da estrutura. As paredes ou os núcleos são geralmente formados pelos poços de elevadores e escadas. Este conceito tem sido utilizado com muita frequência nos últimos anos para edifícios na faixa de 20 a 35 pavimentos. Situações bastante econômicas podem ser criadas quando o projeto arquitetônico se desenvolve nutrido, desde o início, a preocupação com a disposição dos núcleos e das paredes estruturais.

Os núcleos de concreto, devido à grande rigidez lateral, possibilitam a construção de edifícios de grande altura até mesmo quando a contribuição do pórtico é pequena, como no caso de edifícios que utilizam lajes cogumelo.

Os núcleos de concreto comportam-se essencialmente como vigas em balanço engastadas na fundação, deformando-se numa configuração predominantemente de flexão com pequena contribuição do modo de corte. Este comportamento limita o seu campo de aplicação, haja vista que o deslocamento lateral máximo no topo, nestes casos, é função cúbica da altura [8]. Quando as paredes estruturais são combinadas com pórticos rígidos o resultado é bastante interessante. Os pórticos de concreto tendem a se deformar numa configuração de corte, e sua utilização conjunta com os núcleos de concreto resulta numa proveitosa interação fazendo com que ambos possuam uma deformação comum (figura II.3). Esta interação tem como resultado uma estrutura mais rígida com menores deslocamentos, especialmente no topo da estrutura. A rigidez lateral do conjunto é superior à soma da rigidez isolada dos pórticos e das paredes estruturais, o que torna este tipo de solução apropriada para edificações de 40 a 60 pavimentos, bem além do que aqueles que utilizam apenas pórticos rígidos ou núcleos.

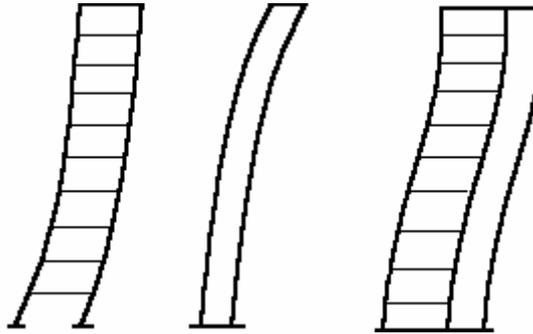


Figura II.3 - Interação entre pórticos rígidos e núcleos estruturais

Muito embora as paredes estruturais estejam associadas ao material concreto armado, paredes em aço com espessuras de 10 a 32 milímetros ou núcleos em aço constituídos de treliças (quadros contraventados) comportam-se de forma semelhante aos núcleos de concreto armado, com benefícios semelhantes de interação horizontal quando da associação com os pórticos rígidos [9].

Quando da utilização dos núcleos de concreto com pórticos de aço, deve ser dada especial atenção à velocidade de execução do núcleo, para que não venha a ocorrer atraso na montagem da estrutura em virtude da espera pela cura do concreto.

Vale a pena lembrar que a eficiência das paredes estruturais é em grande parte afetada pela sua localização em planta na estrutura. Núcleos dispostos simetricamente na periferia da edificação têm sua resistência à torção bastante aumentada.

2.2.4. ESTRUTURAS TUBULARES

Neste sistema estrutural as colunas externas e as vigas com pequenos espaçamentos formam um conjunto que funciona como tubo em balanço, engastado no solo. É o sistema mais empregado atualmente para prédios de grande altura, acima de 50 pavimentos.

Os pórticos sejam eles rígidos ou contraventados, são trazidos para as faces externas do edifício, ao longo de toda a altura e todo o perímetro, obtendo-se na forma final um grande tubo altamente resistente à flexão e torção.

As cargas gravitacionais são geralmente compartilhadas entre as colunas interiores e exteriores, enquanto o carregamento lateral é absorvido em sua maioria pelas colunas e vigas situadas no perímetro do edifício. Quando da ação do

carregamento lateral, as paredes externas dos tubos situadas na direção do carregamento como a alma de uma viga, enquanto as paredes perpendiculares ao carregamento como os flanges.

O pequeno espaçamento das colunas ao nível do térreo torna-se inaceitável, o que torna bastante comum a adoção de grandes vigas de transição para facilitar as aberturas (figura II.4).

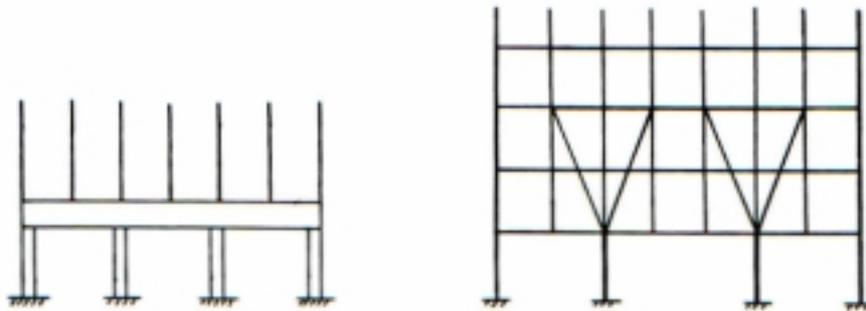


Figura II.4 - Exemplo de transição em estruturas tubulares [9]

A forma tubular foi desenvolvida originariamente para edifícios de planta retangular e, provavelmente, seu uso mais eficiente está para edificações com este formato [7]. Porém, é apropriado para outras disposições em planta, como, por exemplo, triangulares e circulares.

Embora o sistema tubular tenha sido desenvolvido originariamente para os edifícios em concreto armado, a sua introdução nos edifícios em aço foi feita por quem o desenvolveu, no caso o engenheiro Fazlu R. Kan, sócio da Skidmore e Associados [7]. O sistema tubular comporta-se satisfatoriamente tanto para estruturas em aço como para estruturas de concreto.

As estruturas tubulares treliçadas são altamente eficientes com potencial para edificações ainda mais altas do que as tubulares aporticadas. Este arranjo foi utilizado pela primeira vez em 1969, no John Hancock Building (figura II.5) em Chicago [9]. Com o treliçado de aço as colunas podem possuir maiores espaçamentos, permitindo maiores aberturas de portas e janelas do que em estruturas tubulares convencionais. Outra vantagem nas estruturas tubulares treliçadas é que o treliçamento contribui na distribuição da carga gravitacional entre as colunas, transferindo o carregamento axial das colunas mais solicitadas para as menos solicitadas [9].



Figura II.5 - Ed. John Hancock Building [9]

2.2.5. ESTRUTURAS COM PAREDES DE CISALHAMENTO:

Nestes casos a rigidez lateral da estrutura é garantida através de paredes de concreto armado ou alvenaria, construídas nos vãos entre vigas e colunas, em cada andar (figura II.6).

As paredes podem servir simultaneamente como elementos de vedação e elementos resistentes a cargas laterais. A sua alta rigidez é responsável pela resistência lateral do edifício. As paredes comportam-se como se fossem as treliças verticais de um pórtico contraventado. Devido à rigidez horizontal resultante, paredes de cisalhamento tornam-se um atraente sistema de resistência a cargas laterais, do ponto de vista econômico, para edificações com até 30 pavimentos de altura.

Diferentemente dos pórticos rígidos, as estruturas com paredes de cisalhamento dificultam a circulação, tornando-se uma solução mais adequada para edificações residenciais e de hotéis, onde a repetição dos pavimentos permite a locação mais fácil e contínua das paredes ao longo da altura da edificação.

O comportamento um tanto complexo destas paredes e a possibilidade de sua remoção inconsciente por parte do usuário da edificação são fontes de preocupação para projetistas.

Este sistema conduz a uma estrutura final leve, com as vigas rotuladas nas colunas, o que permite que o restante da estrutura seja projetado apenas para resistir à carga gravitacional.

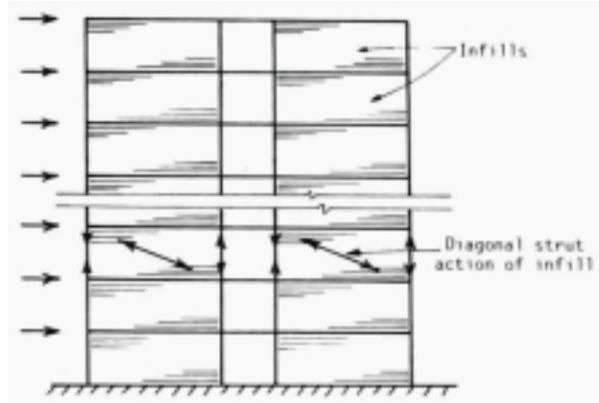


Figura II.6 - Estrutura com paredes de cisalhamento [9]

2.2.6. ESTRUTURAS COM NÚCLEOS E TRELIÇAS TRANSVERSAIS OU OUTRIGGER

Esta forma estrutural bastante eficiente consiste em um núcleo central, seja ele de concreto armado ou treliçado, com treliças horizontais que se conectam às colunas exteriores. A união elimina a ação independente do núcleo e do quadro, diminuindo consideravelmente os deslocamentos horizontais. Quando da ação das cargas laterais, as rotações do núcleo são contidas pela treliça horizontal através da transferência de tensões de tração para as colunas de barlavento, e compressão para as colunas de sotavento, conforme podemos verificar na figura II.7. Com a utilização dos outrigger tem-se um aumento significativo na rigidez lateral da edificação.

As colunas da periferia que não estão conectadas diretamente ao outrigger podem participar desta ação quando da utilização de treliças horizontais ou vigas mestras na fachada ao redor do edifício.

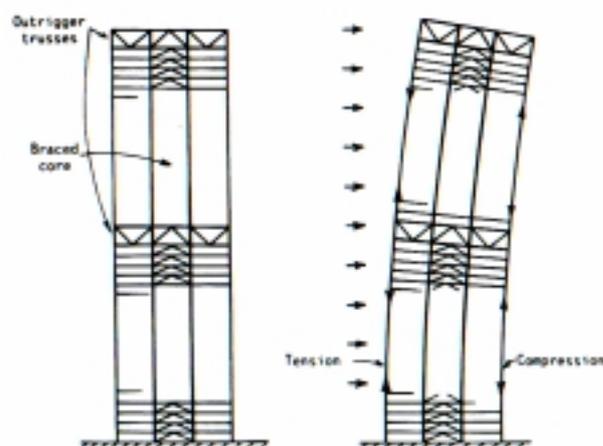


Figura II.7 - Estrutura com núcleo e treliças transversais [9]

Embora a utilização de outrigger traga à estrutura um grande aumento na sua rigidez às cargas laterais, nota-se, porém que esse ganho de rigidez diminui à medida que se acrescenta mais outrigger, de forma que o limite econômico se situa entre quatro a no máximo cinco treliças [9].

2.2.7. ESTRUTURAS COM SISTEMAS HÍBRIDOS

Muitos arranjos estruturais previamente descritos são particularmente satisfatórios para edificações com formas prismáticas, uma vez que podem ser completamente estruturadas através de um único sistema. No entanto, há de se considerar que os arquitetos cada vez mais projetam estruturas menos repetitivas e monótonas, e as formas irregulares por eles propostas desafiam a habilidade dos engenheiros estruturais.

Edifícios de forma não prismática muitas vezes não se aplicam satisfatoriamente a uma única forma de sistema estrutural, tendo então o engenheiro que improvisar, desenvolvendo uma solução satisfatória. Nestes casos pode-se abrir mão da utilização de dois ou mais sistemas de resistência a cargas laterais como podemos observar na figura II.8.

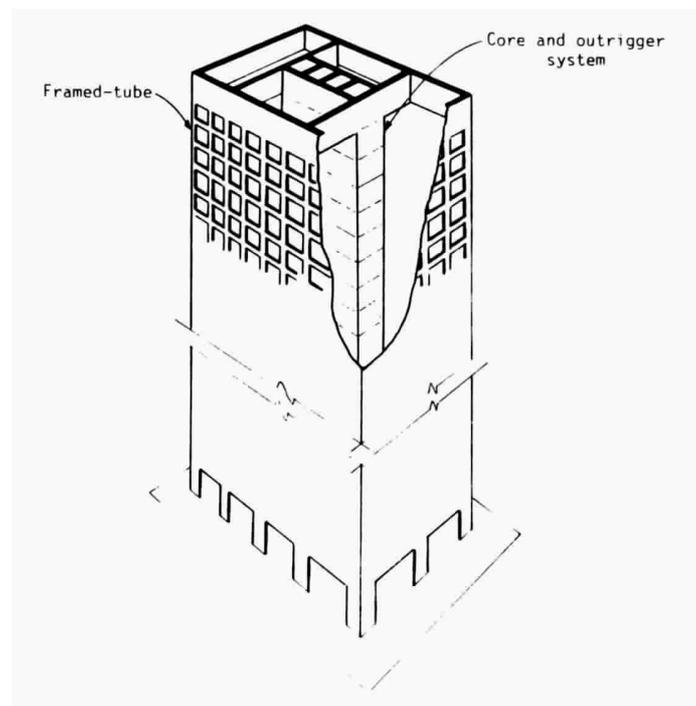


Figura II.8 - Exemplo de sistema estrutural híbrido composto por tubo aporticado, núcleo de rigidez e treliças transversais [9]

Atualmente, com a disponibilidade de potentes computadores e avançados softwares de análise, um engenheiro, com um adequado conhecimento, poderá solucionar o sistema estrutural de edifícios com alto grau de irregularidade.

2.3. CONTRAVENTAMENTOS TRELIÇADOS:

O contraventamento treliçado é um método altamente eficiente de resistência aos esforços horizontais nos sistemas estruturais de edifícios. Pilares, vigas e diagonais são conectados para que o conjunto forme uma espécie de treliça vertical em balanço. As diagonais e as vigas agem como a malha da treliça enquanto os pilares os seus banzos.

As estruturas contraventadas possuem um comportamento bem mais eficiente em relação às estruturas puramente aporticadas devido à eliminação dos momentos nas ligações entre vigas e colunas. Esta eliminação dos momentos é conseguida através da inserção de barras diagonais no interior dos quadros aporticados. Desta maneira o corte devido à carga lateral é absorvido primeiramente pelas diagonais e não mais pelas vigas. Todos os elementos que formam este treliçamento praticamente ficam sujeitos apenas a esforços axiais, o que torna este sistema estrutural particularmente eficiente. Esta eficiência pode ser explicada pelo fato de as barras trabalharem predominantemente sob esforços axiais de tração e compressão, bem mais favoráveis que, por exemplo, os esforços de flexão, resultando em elementos estruturais de menores dimensões, e com adequada rigidez ao corte horizontal.

Este sistema de resistência a cargas laterais quando utilizado em edifícios em conjunto com diafragmas horizontais, geralmente formados pelas lajes, torna-se uma solução bastante atraente em termos de custo. MELO NETO [30] explica que os contraventamentos em treliça são os mais econômicos e eficazes sistemas de resistência a cargas laterais, desde que não haja conflito com a disposição dos espaços internos do edifício.

2.3.1- TIPOS DE CONTRAVENTAMENTO:

Qualquer configuração racional de contraventamento pode ser utilizada para sistemas de contraventamento treliçado [5]. Em geral se o aço for a possível solução para a estrutura de um edifício de andares múltiplos, possivelmente o sistema de resistência a cargas laterais pode ser um contraventamento treliçado.

Os contraventamentos treliçados podem ser extremamente obstrutivos para a arquitetura embarçando a organização interna dos espaços e da circulação. Desta maneira, estes sistemas devem ser posicionados de modo a causar o mínimo de obstrução enquanto satisfaz suas funções estruturais. Como se vê, a seleção do tipo de contraventamento não é apenas função da rigidez requerida, mas também é freqüentemente influenciado pela disponibilidade de vãos que não venham a obstruir a circulação interior do edifício.

Devido a requisitos arquitetônicos, algumas vezes há apenas alguns poucos vãos ao redor dos elevadores e dependências de serviço que são passíveis de contraventamentos. Em algumas ocasiões pode ser possível contraventar maiores porções do edifício sem comprometer a arquitetura. Uma extrapolação destes sistemas treliçados, quando o contraventamento empacota o exterior do edifício, dá origem a um sistema tridimensional muito eficiente comumente conhecido como sistema tubular contraventado.

Algumas vezes o tipo de contraventamento tem que ser escolhido primeiramente visando a abertura dos vãos, em sacrifício da eficiência na resistência dos esforços laterais. Em edifícios de baixa e média altura, e que não são particularmente esbeltos, é geralmente possível para o engenheiro posicionar o sistema de contraventamento sem que o arquiteto tenha que considerá-lo durante a fase de projeto. Em edifícios esbeltos de média altura e em edifícios verdadeiramente altos, a localização do sistema de contraventamento ganha fundamental importância, sendo realmente determinante na viabilidade da estrutura.

Os mais eficientes, mas também mais obstrutivos tipos de contraventamento, são aqueles que formam treliças verticais com triângulos “totais” em cada tramo [9]. Estes incluem o treliçamento com diagonais simples, treliçamento em “X”, em “V” e “V” invertido (figura II.9). Estes treliçamentos devido ao seu alto grau de obstrução são posicionados onde a circulação não é requerida, como por exemplo, nos poços de elevadores e áreas de serviço e fachadas.

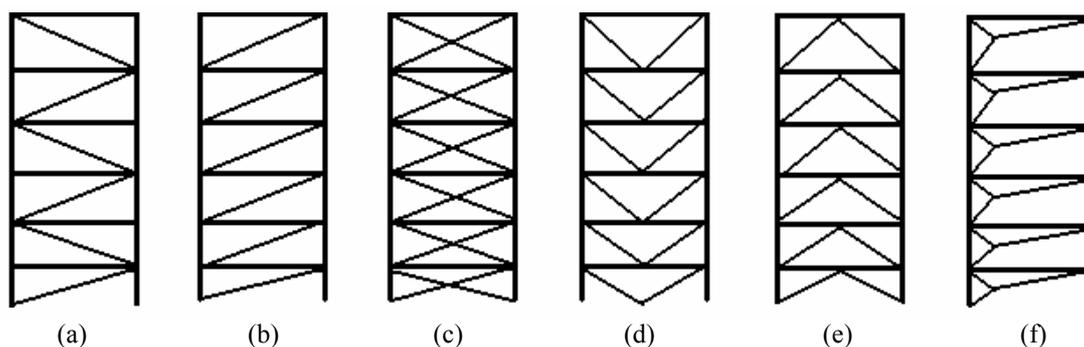


Figura II.9 - Contraventamento de triângulos “totais”

Outros tipos de contraventamentos, menos obstrutivos, que permitem a abertura de portas e janelas, são aqueles em que o treliçamento não forma triângulos completos, também conhecido como contraventamentos excêntricos, e que devido a essa excentricidade respondem ao carregamento lateral com momentos nas barras (figura II.10).

Em um sistema de contraventamento excêntrico as conexões das diagonais são deliberadamente afastadas das conexões entre as vigas e as colunas. Este sistema, embora originalmente concebido para satisfazer os requisitos de ductibilidade em zonas sísmicas, pode convenientemente ser empregado em aplicações não sísmicas [9]. Mantendo-se as conexões entre diagonais e vigas próximo às colunas, a rigidez do sistema pode ser feita muito próxima de um contraventamento concêntrico.

Geralmente estes contraventamentos são menos rígidos aos esforços laterais e, conseqüentemente, menos eficientes em relação àqueles formados por triângulos completos, onde a estrutura responde aos carregamentos laterais apenas com esforços axiais em seus membros.

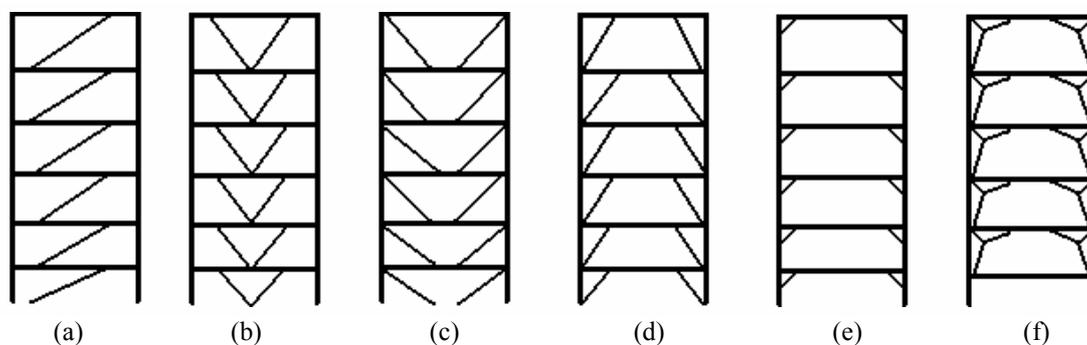


Figura II.10 - Contraventamento de triângulos parciais

Uma vantagem adicional na utilização de contraventamentos com painéis formados por triângulos “totais” é que o momento fletor e o esforço cortante nas vigas e

lajes não são influenciados significativamente pelo esforço lateral atuante na estrutura. Diante disto, as vigas e lajes de um pavimento que, neste caso, são projetadas para resistir apenas à carga gravitacional, pode ser repetida através da altura da edificação com economia no projeto e na construção.

Nos sistemas de contraventamento cujas diagonais conectam-se às vigas a uma grande distância dos seus extremos (figura II.9.d e II.9.e) a viga pode ser projetada como contínua através da conexão diminuindo assim o custo com ligações. Segundo SMITH e COULL [9] os mais vantajosos tipos de contraventamento são aqueles que possuem algum dos seus extremos conectados em vigas relativamente flexíveis verticalmente, não atraindo desta forma significante esforços quando do encurtamento das colunas.

Como dito anteriormente, os contraventamentos que não formam triângulos “cheios” podem ser usados para projetar estruturas dúcteis, mais interessantes em regiões suscetíveis a sismos. A rara ocorrência de efeitos sísmicos em nosso território fez com que estes tipos de sistemas de contraventamento não sejam objeto do nosso estudo.

Encontrar um eficiente e econômico sistema de contraventamento para um edifício alto representa para o engenheiro estrutural uma excelente oportunidade para utilizar inovadores conceitos de projeto. Entretanto, disponibilidade de larguras apropriadas para contraventamentos treliçados é freqüentemente uma consideração bastante rara. Como um guia preliminar, uma relação altura-largura entre 8 e 10 é considerada razoável para se obter um contraventamento eficiente [9]. Achar espaços para as tais larguras ótimas de contraventamento, sem entrar em conflito com o planejamento arquitetônico, pode nem sempre ser possível, forçando o engenheiro estrutural a usar sistemas de contraventamento menos ótimos.

2.3.3. UTILIZAÇÃO DE CONTRAVENTAMENTOS DE GRANDES MÓDULOS

Outra solução de contraventamento muito utilizada e bastante eficiente é a adoção de treliçamentos em “grande escala” ou em grandes módulos. Esta solução consiste em utilizar treliças cujos módulos englobam dois ou mais andares da edificação (figura II.11).

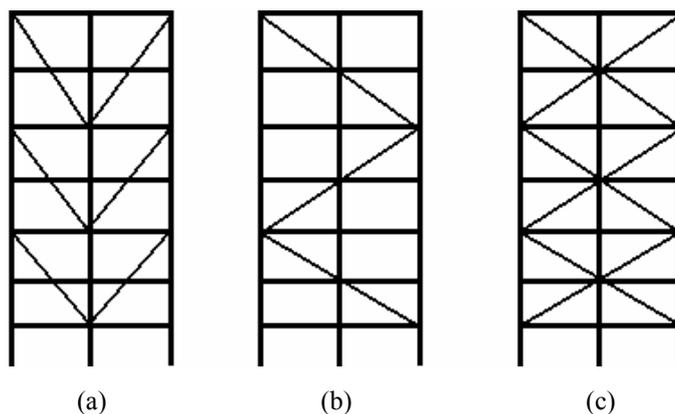


Figura II.11 - Contraventamento em grande escala

De acordo com SMITH e COULL [9] durante as últimas décadas o aumento da eficiência dos contraventamentos tem sido obtido com a utilização das treliças de grandes módulos.

Como exemplo de estruturas que utilizam estas treliças podemos citar o edifício americano Mercantile Tower, localizado no estado do Missouri, com 35 pavimentos e um contraventamento formado por quatro treliças com diagonais em V invertido, englobando três pavimentos por módulo (figura II.12.a). Outro exemplo é o Alcan Building, em Chicago com 27 pavimentos, que utiliza treliças com módulos de seis pavimentos de altura e treliçamento com duplas diagonais (figura II.12.b).

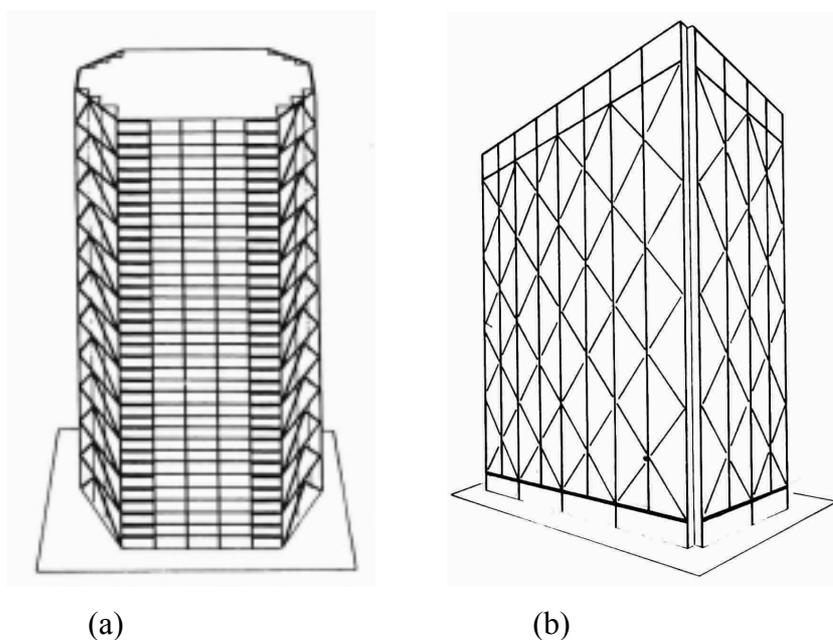


Figura II.12 - Edifícios Mercantile Tower e Alcan Building [9]

Vale lembrar que qualquer modelo razoável de contraventamento pode ser projetado, contanto que o corte provocado pelas forças laterais seja resistido em todos pavimentos.

2.3.3. COMPORTAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO TRELIÇADO:

O carregamento lateral aos quais as edificações estão sujeitas são reversíveis, ocasionando nos contraventamentos a alternância entre esforços de tração e compressão. Esta alternância concorre para que as barras que compõem os contraventamentos sejam dimensionadas para suportar o esforço de compressão. Por esta razão, sistemas de contraventamento com barras de pequeno comprimento podem ser mais interessantes, devido à menor susceptibilidade à flambagem por compressão.

A função dos elementos que compõem um contraventamento na resistência aos esforços laterais podem ser entendida através do caminhamento do corte horizontal (figura II.13) e das forças gravitacionais (figura II.14) através dos pavimentos da estrutura.

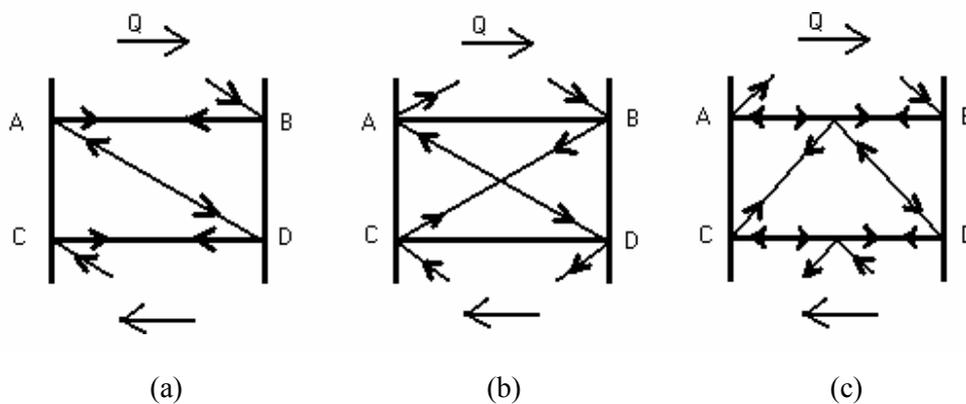


Figura II.13 - Esquema do caminhamento das cargas horizontais nos elementos dos contraventamentos

Na figura II.13.a as diagonais estão comprimidas e as vigas tracionadas, ocasionando o encurtamento das diagonais e o alongamento das vigas, dando origem à deformação por corte. Na figura II.13.b, as forças nos contraventamentos conectados nos extremos de cada barra são equilibradas horizontalmente, com as vigas sujeitas a um insignificante esforço axial. Na figura II.13.c a metade de cada viga está sujeita à compressão e a outra metade à tração. Com a inversão no sentido da força horizontal que atua na estrutura as ações e deformações em cada elemento do contraventamento serão também invertidos.

O caminhamento das forças gravitacionais de compressão transferidas às diagonais de contraventamento, enquanto os pilares da estrutura encurtam verticalmente, podem ser traçados similarmente.

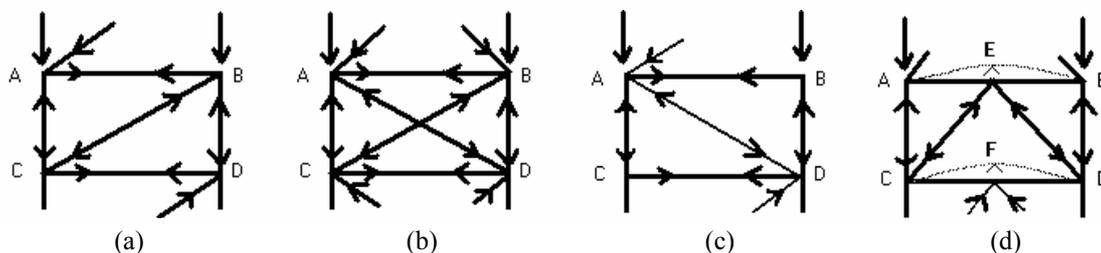


Figura II.14 - Esquema do caminhamento das cargas gravitacionais nos elementos dos contraventamentos

Enquanto as colunas da figura II.14.a e II.14.b encurtam, as diagonais ficam sujeitas à compressão, que podem ser desenvolvidas devido ao efeito de amarração provocado pelas vigas. Na figura II.14.d os pontos das vigas onde as diagonais se encontram não apresentam grandes restrições ao deslocamento vertical através da rigidez à flexão das colunas. Conseqüentemente, as diagonais não atrairão forças gravitacionais significantes.

2.3.4. COMPORTAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO À FLEXÃO:

Sistemas estruturais formados por pilares e vigas formando elementos verticais e horizontais isolados são estáveis apenas para cargas gravitacionais. Estes sistemas precisam ser contraventados para as cargas laterais. Basicamente são três as maneiras de se conseguir isto, a saber:

- através de painéis de corte,
- através de ligações resistentes a momentos entre as vigas e os pilares,
- através de treliças.

A treliça é usualmente formada por inserção de diagonais em vãos retangulares da estrutura. Se uma diagonal simples for utilizada ela precisa servir a uma função dupla: agir à tração para combater o esforço lateral em uma direção e agir à compressão para combater o esforço na direção inversa. Devido aos elementos tracionados serem mais eficientes do que os elementos comprimidos dos contraventamentos, seu projeto

deve preferencialmente trabalhar com suas diagonais se cruzando. Em qualquer caso o treliçamento gera apenas cargas axiais nas suas barras, e seu comportamento para as cargas laterais se assemelha ao comportamento de uma estrutura com núcleo rígido.

Um contraventamento submetido à flexão comporta-se como uma treliça vertical em balanço. As colunas agem como os banzos conduzindo o momento externo, com tração nas colunas de barlavento e compressão nas colunas de sotavento. As diagonais e as vigas agem como a malha da treliça, absorvendo o corte horizontal, com as diagonais tracionadas ou comprimidas, em função da direção do carregamento. As vigas são solicitadas axialmente e em alguns casos a momento fletor também.

O efeito de deformação axial das colunas causa na estrutura uma configuração “fletida” com a concavidade voltada para sotavento, e deslocamento máximo no topo (figura II.15.a). O efeito de deformação axial nas diagonais e vigas causa na estrutura uma configuração de corte, isto é, com a concavidade voltada para barlavento e deslocamentos relativos entre pavimentos máximos na base e zero no topo (figura II.15.b). O formato final da estrutura é um efeito combinado das curvas de flexão e corte, com uma configuração resultante dependendo da magnitude relativa de cada um dos efeitos (figura II.15.c).

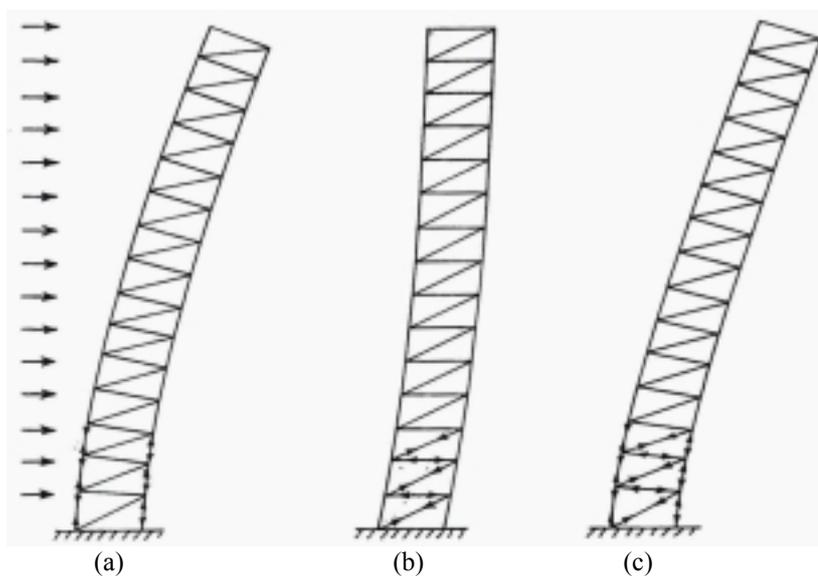


Figura II.15 - Configuração de flexão dos contraventamentos treliçados [9]

Contraventamentos que são erguidos ao longo de um único vão (figura II.16.a), o carregamento horizontal causa tração máxima na base da coluna de barlavento e compressão na de sotavento. Quanto mais delgada for a treliça formada, maiores serão

estas a forças de tração e compressão. Dependendo da magnitude das cargas mortas transferidas para estas colunas, a força de tração pode ser parcial ou totalmente suprimida. Relações entre altura e largura do contraventamento maiores que 10 podem gerar forças extremamente altas. Este problema pode ser evitado através do posicionamento sucessivo de contraventamentos em diferentes vãos (figura II.16.b). Neste tipo de arranjo a força axial nas colunas causadas pelo carregamento lateral será significativamente menor.

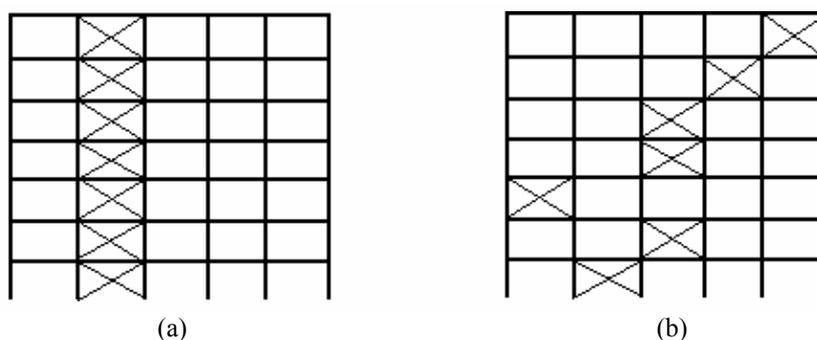


Figura II.16 - Contraventamento em único vão e em vários vãos

2.3.5. PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO TRELIÇADOS:

Durante a fase de projeto e de execução de uma estrutura que utiliza contraventamentos como o seu sistema estrutural de resistência aos esforços laterais deve-se ficar atento às considerações abaixo apresentadas a fim de que se possa obter um melhor desempenho com este sistema AMBROSE [10]:

- As diagonais precisam ser posicionadas de modo a não interferir com os sistemas habitacionais da estrutura ou outras funções do edifício. Se os membros de contraventamentos são projetados essencialmente como membros submetidos a tensões axiais, estes precisam ser executados de modo a evitar solicitações diferentes daquelas previstas para seu funcionamento.
- A reversibilidade da carga lateral precisa ser considerada. Tal consideração requer que as diagonais sejam projetadas para tração ou compressão. Pode-se

ainda colocar diagonais redundantes (como um contraventamento em X), com parte das diagonais trabalhando a tração para a carga atuando em uma direção e a outra parte trabalhando para cargas na direção inversa.

- Embora elementos diagonais freqüentemente funcionem apenas para cargas laterais, as barras horizontais e verticais precisam ser dimensionadas para as várias possibilidades de combinação de cargas laterais e gravitacionais. A estrutura deve ser analisada para todas as possíveis combinações de carregamento, e cada elemento precisa ser projetado para uma combinação crítica que represente a resposta de pico.
- Nas barras longas e esbeltas deve ser considerado o peso próprio causando flexão.
- As conexões das estruturas treliçadas precisam ser apertadas, devendo-se evitar ligações que tendem progressivamente a se deformar.
- Para se evitar carregamentos gravitacionais nas diagonais, suas conexões são algumas vezes executadas apenas após a estrutura estar pelo menos parcialmente carregada.
- Na maioria dos casos não é necessário contraventar todos os vãos de uma estrutura. Pode-se contraventar apenas poucos vãos ou apenas um único vão, ao longo de toda a altura da edificação, com os demais agindo em comboio.

CAPÍTULO - III

3.1. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

As edificações analisadas no presente estudo possuem as mesmas características arquitetônicas, diferindo apenas na quantidade de pavimentos, 30 e 50 respectivamente. Ambas possuem um pé-esquerdo de 2,85 metros, o que resulta em uma altura de 85,5 e 142,5 metros cada. A esbeltez das edificações, ou seja, a relação entre a sua altura e as dimensões em planta são:

Para a edificação de 30 pavimentos :

$$\lambda_x = H / L_x = 85.5 / 28 = 3.053$$

$$\lambda_y = H / L_y = 85.5 / 36 = 2.375$$

Para a edificação de 50 pavimentos :

$$\lambda_x = H / L_x = 142.5 / 28 = 5.089$$

$$\lambda_y = H / L_y = 142.5 / 36 = 3.958$$

Como pode ser visto na planta baixa esquematizada na figura III.1, a estrutura é formada por pilares regularmente espaçados a cada 9m na direção “X” e a cada 8m na direção “Y”, unidos por vigas formando um pórtico tridimensional. De acordo com SALLES [7], os vãos econômicos para as vigas metálicas são de 9 a 12 metros para as principais e de 6 a 9 metros para as secundárias, evitando-se assim grandes dimensões de lajes. Com base nestas recomendações as vigas principais foram posicionadas de modo a coincidir com os pilares, ou seja, com um vão de 8 metros e regularmente espaçadas a cada 9 metros, enquanto as vigas secundárias possuem vãos de 9 metros espaçadas a cada 4 metros.

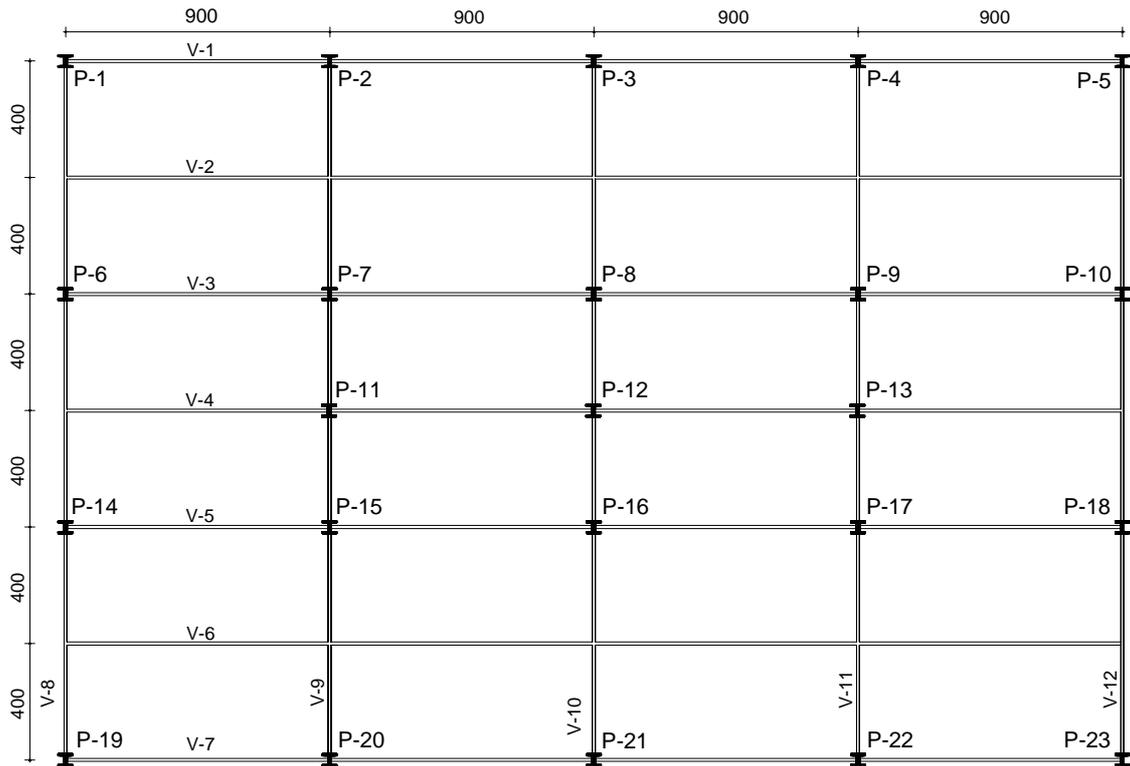


Figura III.1 - Planta Baixa do edifício modelo

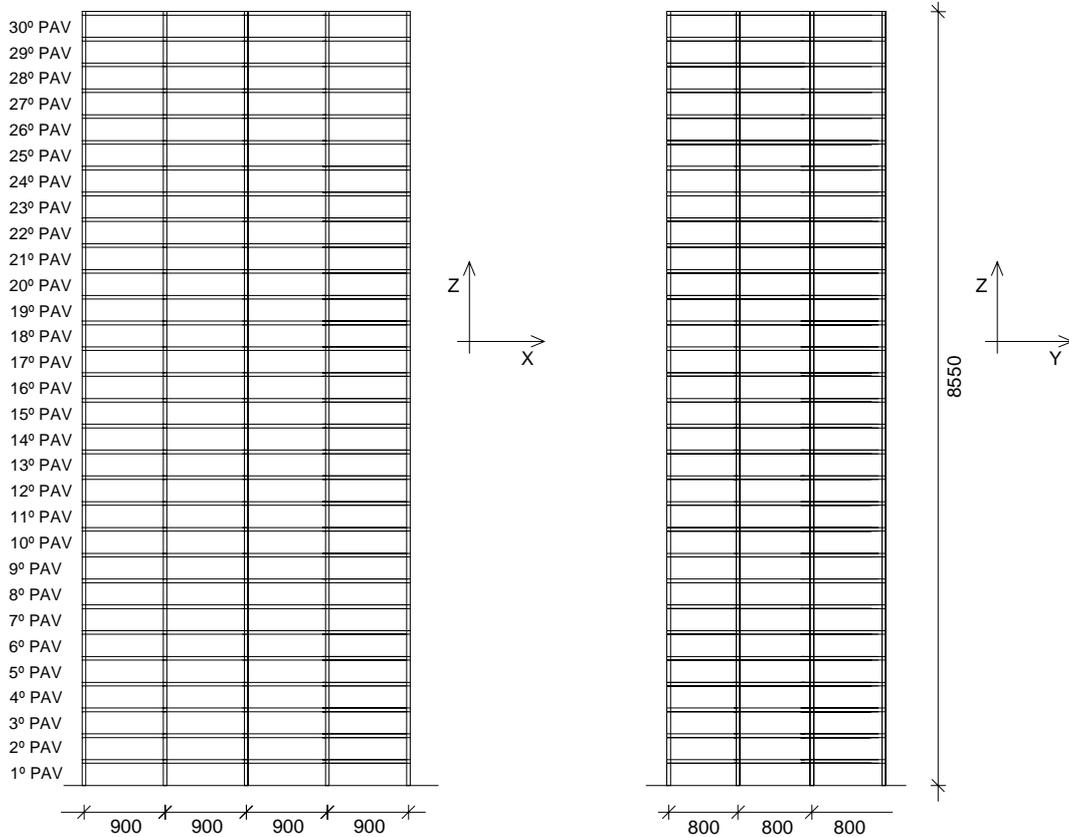


Figura III.2 - Elevação do edifício modelo de 30 pavimentos

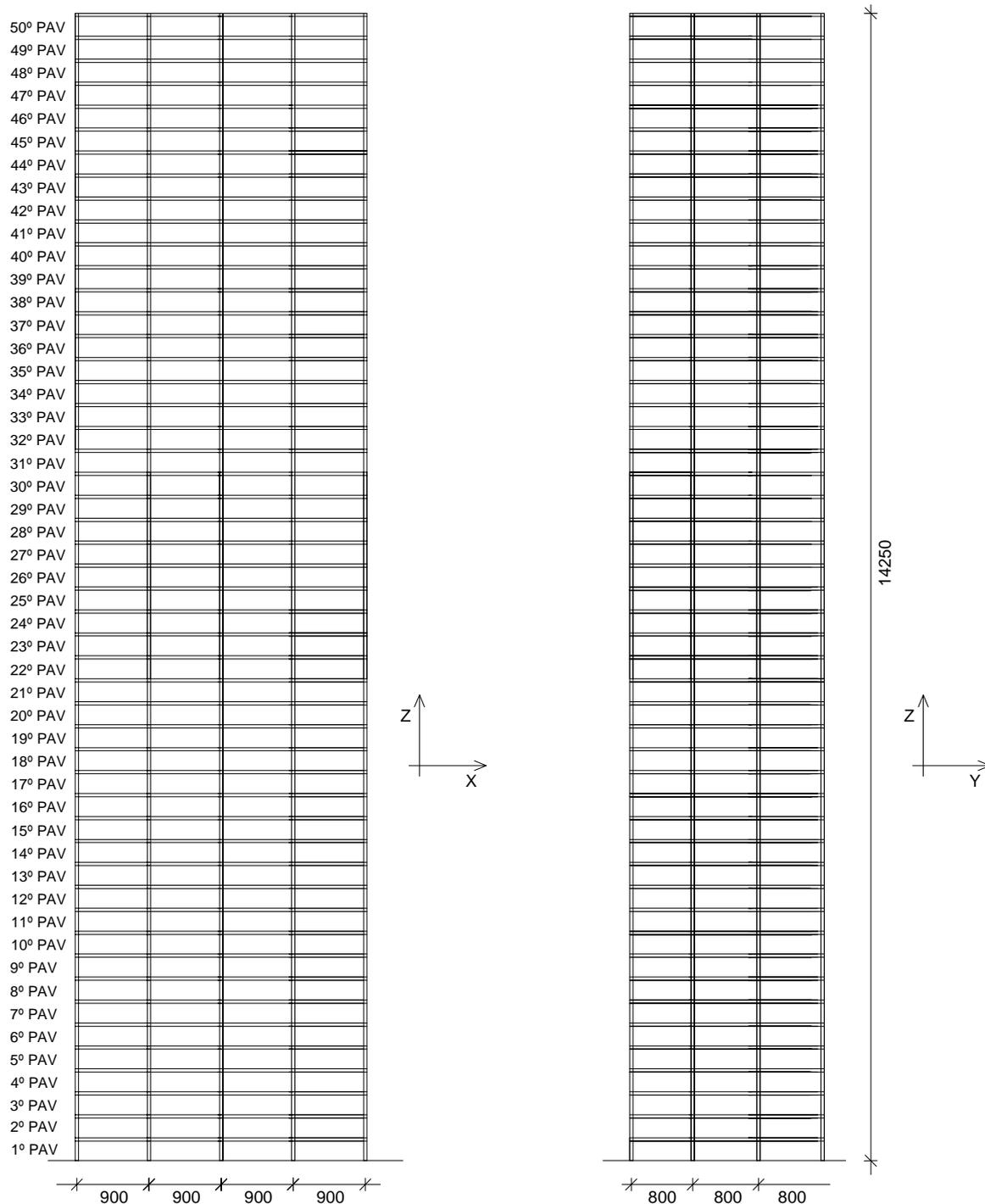


Figura III.3 - Elevação do edifício modelo de 50 pavimentos

3.1.1. DESCRIÇÃO DOS CONTRAVENTAMENTOS ANALISADOS

Diversas soluções utilizando os contraventamentos treliçados foram analisadas neste trabalho, as quais estão apresentadas a seguir.

3.1.1.1. Análise quanto ao tipo do contraventamento

Foram empregados na edificação da figura III.2 os tipos mais usuais de contraventamentos treliçados utilizados nos edifícios estruturados em aço (figura III.4), a saber:

- Contraventamento em X
- Contraventamento em V
- Contraventamento em V invertido
- Contraventamento com diagonais no mesmo sentido
- Contraventamento com diagonais em sentido contrário

O comportamento da estrutura para os diversos tipos de treliçamento foi avaliado com base nas suas deformações, no consumo de aço e nas verificações de conforto humano.

Para compor o sistema de contraventamento foram utilizadas dez treliças, sendo seis na direção Y e quatro na direção X como ilustra a figura III.4.

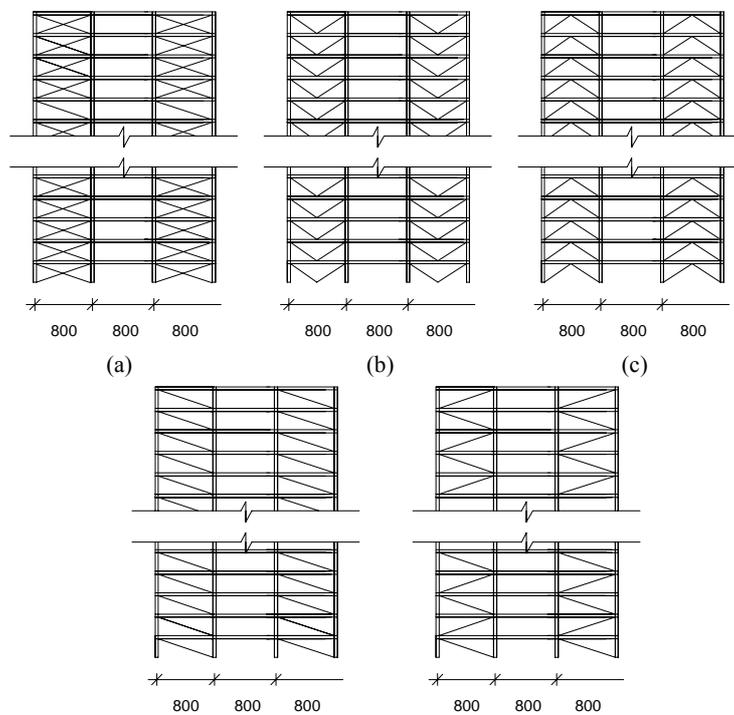


Figura III.4 - Tipos de treliçamento utilizados no contraventamento

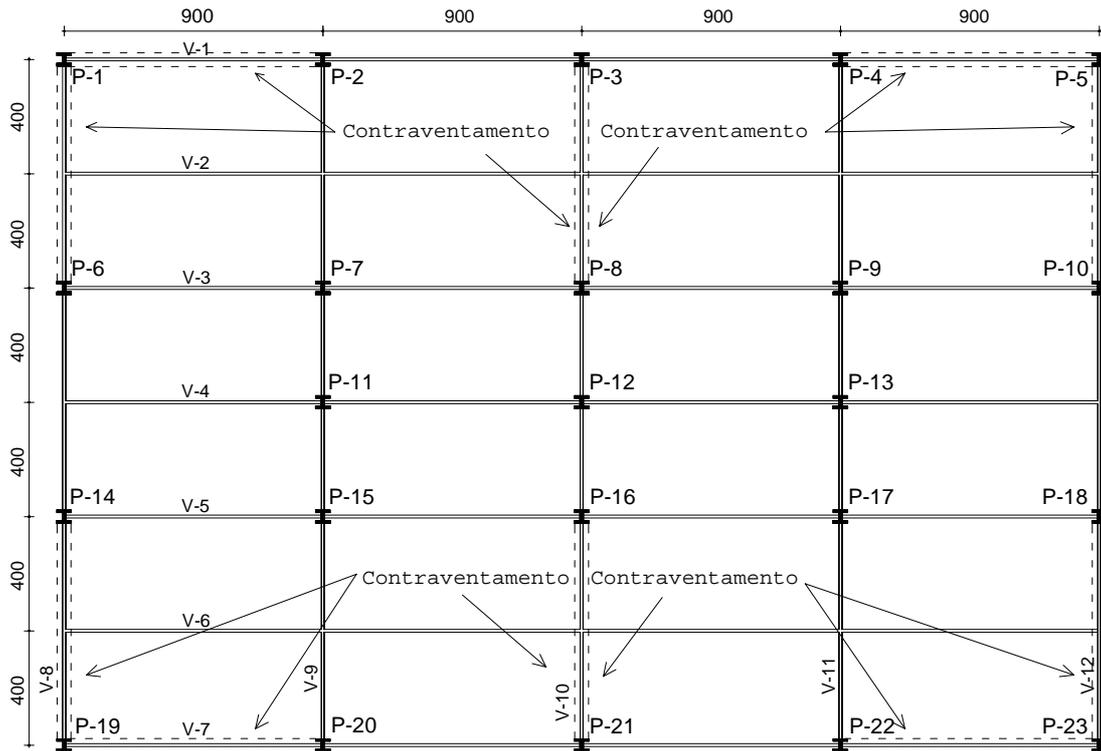


Figura III.5 - Localização em planta dos sistemas de contraventamento

3.1.1.2. Análise quanto à contribuição dos pilares, das vigas e das diagonais nos deslocamentos finais da estrutura.

Os deslocamentos finais das estruturas com contraventamentos treçados são resultantes basicamente das deformações axiais das barras que fazem parte do sistema de contraventamento.

A contribuição dos pilares, das vigas e das diagonais no contraventamento da estrutura foram verificados através de incrementos sucessivos na rigidez axial destes elementos. Foram verificados, também, os deslocamentos laterais das estruturas provocados unicamente pela deformação de cada um destes elementos. Estas análises foram realizadas para as estruturas com 30 e 50 pavimentos, sendo utilizado um contraventamento em “X” análogo ao utilizado na figura III.6.a.

3.1.1.3. Análise quanto ao posicionamento dos contraventamentos em diferentes vãos ao longo da altura da edificação

Foram realizadas três modelagens utilizando contraventamentos posicionados de diferentes formas ao longo da altura da estrutura.

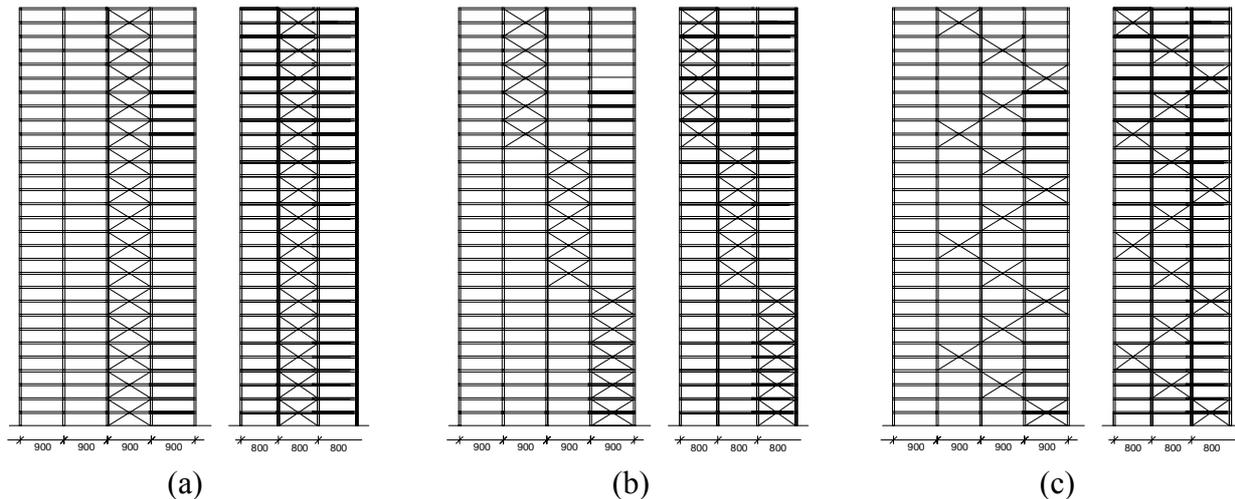


Figura III.6 - Contraventamentos posicionados em diferentes vãos

No primeiro caso o sistema de contraventamento foi posicionado ao longo da altura da edificação através de um único vão (figura III.6.a). No segundo caso o contraventamento foi posicionado ao longo de três vãos (figura III.6.b). No último caso o contraventamento foi posicionado diagonalmente ao longo dos vãos adjacentes (figura III.6.c). Estas três soluções foram analisadas para as edificações com 30 e 50 pavimentos, estando em todos os casos os sistemas de contraventamento posicionados nas fachadas.

3.1.1.4. Análise quanto à associação dos contraventamentos em linha

Foram analisadas três situações para a associação em linha de contraventamentos. Na primeira modelagem foram empregados dois contraventamentos posicionados lado a lado (figura III.7.a). Na segunda modelagem os contraventamentos foram posicionados defasados um do outro (figura III.7.b). Na terceira modelagem, optou-se por utilizar três treliças horizontais formando uma espécie de “pórtico treliçado”, de modo a impor uma interação entre os treliçamentos (figura III.7.c). Estas

soluções foram empregadas para as edificações com 30 e 50 pavimentos. No caso da utilização das treliças horizontais, estas foram posicionadas nos seguintes pavimentos:

Quadro III.1 - Posição das treliças horizontais

	EDIFÍCIO DE 30 PAVIMENTOS	EDIFÍCIO DE 50 PAVIMENTOS
1º Treliça horizontal	7º e 8º PAV	13º e 14º PAV
2º Treliça horizontal	15º e 16º PAV	25º e 26º PAV
3º Treliça horizontal	23º e 24º PAV	37º e 38º PAV

A escolha da quantidade de treliças e de seu posicionamento ao longo da altura da edificação foram baseadas nas recomendações para estruturas com outrigger.

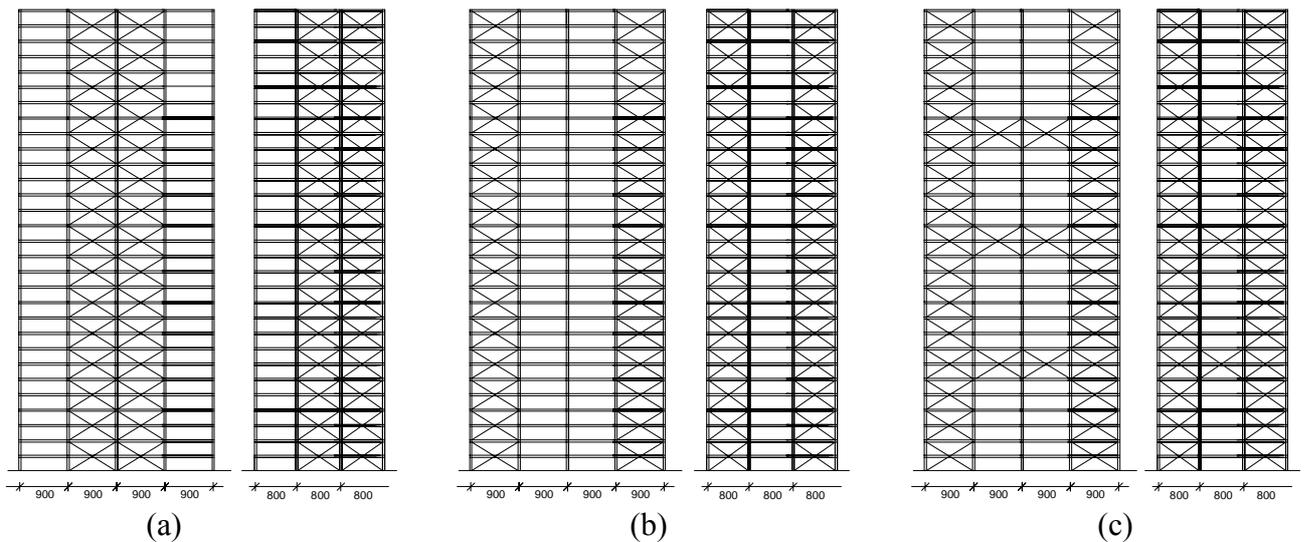


Figura III.7 - Contraventamentos associados em linha

3.1.1.5. Análise quanto ao posicionamento dos contraventamentos em relação ao centróide da seção transversal da edificação

Quanto ao posicionamento do contraventamento em relação ao centro de rotação da edificação, foram adotadas três situações distintas. No primeiro caso, os contraventamentos foram posicionados nas fachadas externas da edificação que em teoria, proporciona a situação mais favorável no combate à torção (figura III.8). No segundo caso, os contraventamentos na direção Y foram posicionados mais próximos do

centróide do edifício (figura III.9). No terceiro caso, os contraventamentos na direção X também foram posicionados mais próximos do centróide da edificação, a fim de possibilitar a verificação da contribuição destes para as cargas que atuam na direção Y (figura III.10). Em todos os casos foram utilizados contraventamentos em “X” apresentados na figura III.7.c.

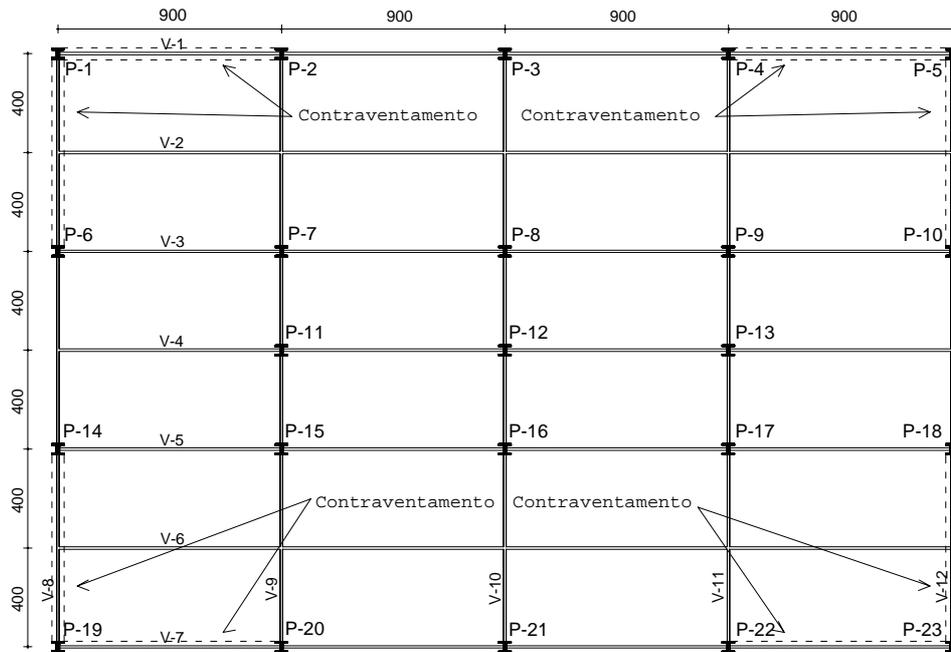


Figura III.8 - Contraventamentos posicionados nas fachadas

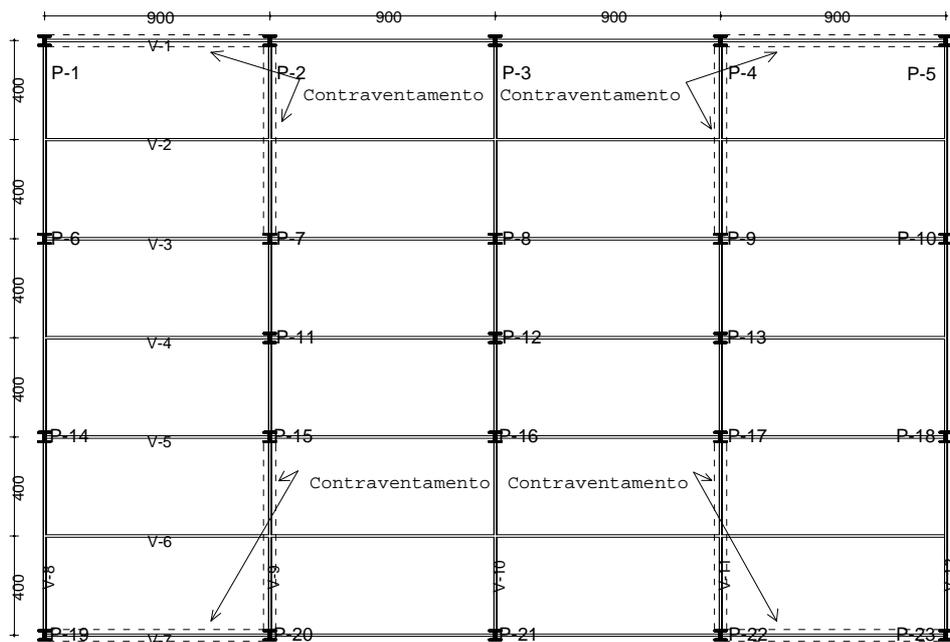


Figura III.9 - Contraventamento “X” posicionado nas fachadas e contraventamento “Y” interno

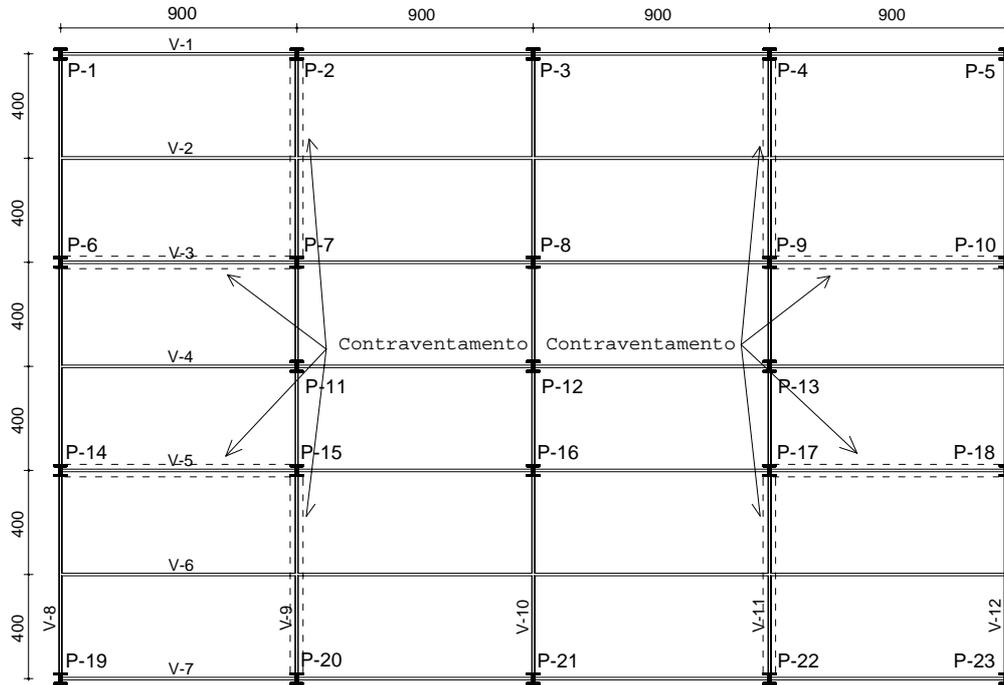


Figura III.10 - Contraventamentos em “X” e em “Y” internos

3.1.1.6. Análise quanto à esbeltez do sistema de contraventamento

As edificações com 30 e 50 pavimentos (figuras III.2 e III.3) foram modeladas utilizando contraventamentos com diferentes valores de esbeltez, ou seja, diferentes valores entre as relações de altura e largura. Os contraventamentos foram posicionados nas fachadas e a sua largura foi aumentada através do acréscimo de sua modulação (figura III.11).

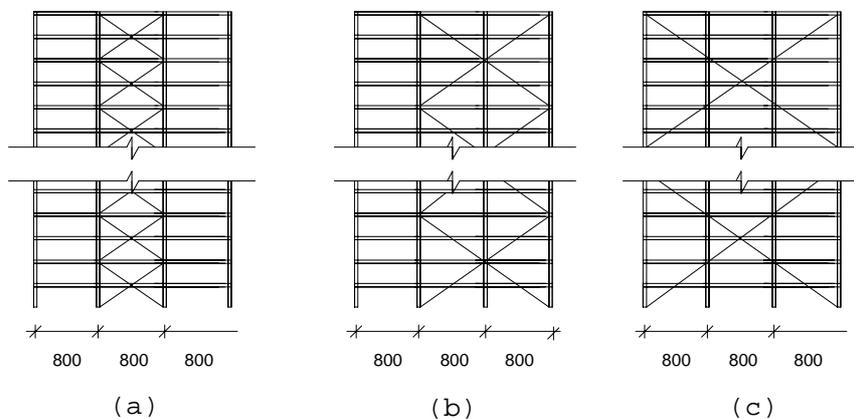


Figura III.11 - Contraventamentos com diferentes valores de esbeltez

3.1.1.7. Análise quanto ao tamanho dos módulos de contraventamento

Analisou-se o comportamento da estrutura quando da utilização de contraventamentos com grandes módulos, comparados com os contraventamentos de módulos pequenos. Na primeira análise, fez-se uso de um contraventamento em “X” com módulos pequenos situados nas fachadas da edificação (figura III.12.a). Na segunda análise, empregou-se o mesmo tipo de treliçamento, mas com módulos com o triplo da largura (figura III.12.b). A análise quanto ao tamanho dos módulos foi realizada para as edificações com 30 e 50 pavimentos.

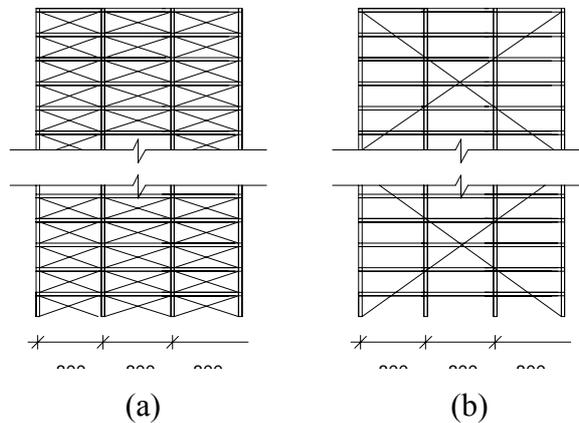


Figura III.12 - Detalhe do contraventamento

3.1.1.8. Análise quanto à diminuição do contraventamento ao longo da altura da edificação

Foi analisado o comportamento das edificações com 30 e 50 pavimentos quando da diminuição do seu sistema de contraventamento ao longo da sua altura (figura III.13). No primeiro caso as fachadas laterais da edificação foram totalmente contraventadas com três treliças juntas (figura III.13.a). No segundo caso a edificação teve seu sistema de contraventamento dividido em três partes. O terço inferior com três vãos contraventados, o terço intermediário com dois vãos contraventados e o terço superior com apenas um vão contraventado (figura III.13.b). No terceiro caso, dois vãos da estrutura foram totalmente contraventados (figura III.13.c).

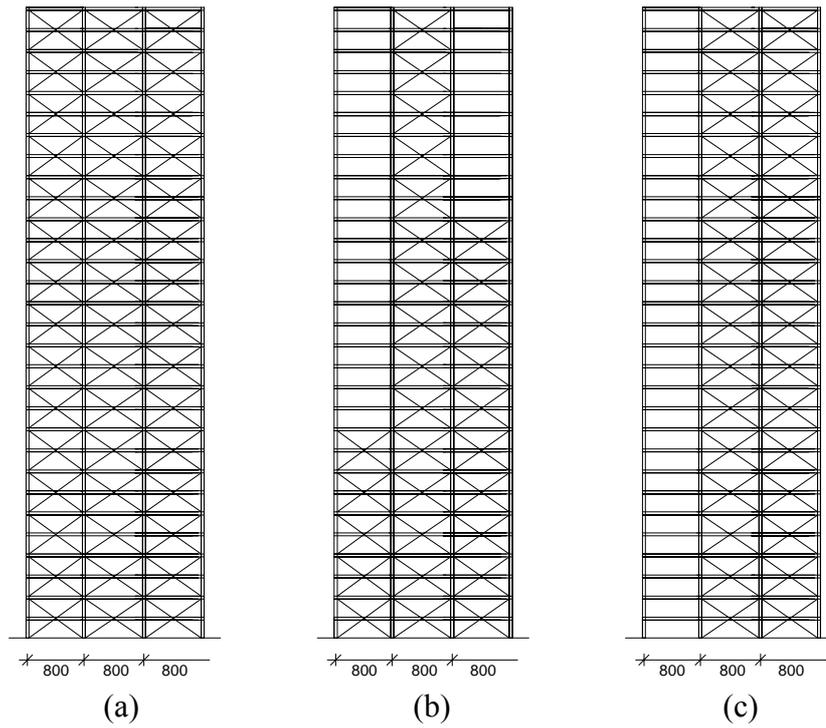


Figura III.13 - Variação do contraventamento ao longo da altura da edificação

3.1.1.9. Análise quanto à interação entre contraventamentos em vão único e contraventamento em grande escala.

Foi analisado o comportamento da interação entre um contraventamento em grande escala com um contraventamento tradicional em vão único (figura III.14).

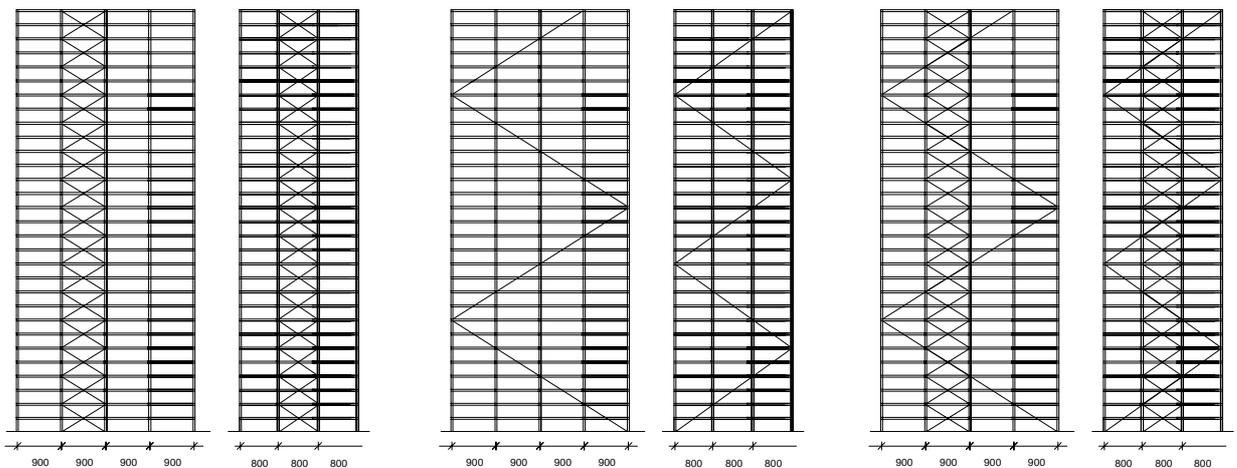


Figura III.14 - Interação entre contraventamentos em único vão e contraventamentos em grandes módulos

Esta solução pode ser bastante útil nos casos de edifícios altos em que o contraventamento apenas do núcleo de serviço é insuficiente para garantir a estabilidade da estrutura, e não se deseja abrir mão da circulação utilizando contraventamentos mais obstrutivos. Os contraventamentos foram posicionados na fachada da edificação, e esta análise foi feita para a edificação com 30 e 50 pavimentos.

3.2. AÇÕES

O tipo do carregamento atuante em edifícios altos não difere muito daqueles que atuam em edifícios de baixa e de média altura. A diferença mais importante está no expressivo aumento que algumas ações passam a exercer na estrutura além da maior importância que os efeitos dinâmicos e de segunda ordem passam a ter.

As cargas que atuam em um edifício, com exceção das cargas permanentes, não podem ser avaliadas com precisão. Vento e sismo são fortuitos na natureza, e difícil de prever com segurança a intensidade de suas ações. As sobrecargas podem ser avaliadas, mas não se tem a certeza de quando e em quanto o seu limite será ultrapassado. Teorias probabilísticas têm ajudado a engenharia estrutural a racionalizar, e até mesmo a simplificar, as aproximações para o cálculo das cargas variáveis nas estruturas. Podemos perceber que a estimativa do carregamento não é tarefa fácil, daí a falta de unanimidade observada entre as normas técnicas de diferentes países no que se refere aos coeficientes de majoração das cargas variáveis e até mesmo das cargas permanentes.

Nas estruturas de edifícios de andares múltiplos de grande altura, as ações solicitantes, usualmente admitidas, são as seguintes:

- ações permanentes
- ações variáveis
- ação do vento
- ação de sismo
- ação da temperatura
- cargas de montagem

Sabemos que a ação do vento, de sismos, as cargas de montagem e a variação de temperatura, todas são exemplos de ações variáveis; mas devido à importância destas serão tratadas em separado.

3.2.1. AÇÕES PERMANENTES

As ações permanentes estão associadas ao peso próprio dos elementos que compõem a edificação. São consideradas como cargas permanentes além do peso próprio dos elementos estruturais, os pisos, as paredes, os revestimentos, o peso das instalações, das proteções contra incêndio, dois dutos de ar, etc. Estas cargas são consideradas como atuando durante todo o tempo de vida da estrutura.

Aparentemente de fácil determinação, este carregamento só poderia ser precisado quando do término de todos os projetos da edificação. A princípio, o dimensionamento de uma estrutura de aço é um processo de tentativas, no qual as dimensões das peças estruturais se modificarão no decorrer do processo de cálculo que, a critério do calculista, pode resultar, ou não, em uma nova análise da estrutura. Percebemos então que, no decorrer do projeto estrutural, existirão alterações no peso da estrutura. Para solucionar este problema, tem-se o hábito de lançar mão de valores e expressões baseada em experiências anteriores que permitem uma estimativa inicial para a avaliação das cargas permanentes. Atualmente, alguns softwares de análise estrutural, como, por exemplo, o SAP 2000, já calculam automaticamente o peso próprio dos elementos estruturais, colaborando sobremaneira com o trabalho do engenheiro. Como a magnitude do carregamento permanente corresponde a uma elevada parcela do carregamento total, VASCONCELOS FILHO [8] sugere que o erro cometido na estimativa das cargas permanentes não ultrapasse 10%.

Servindo como parâmetro estimativo do consumo de aço em função do número de pavimentos, podemos lançar mão do ábaco da figura III.15 que apresenta de maneira aproximada o consumo de aço em função do número de andares da edificação.

Vale a pena ressaltar que qualquer estimativa do peso da estrutura não passa de aproximação, e que o cálculo das cargas permanentes deve ser cuidadosamente avaliado.

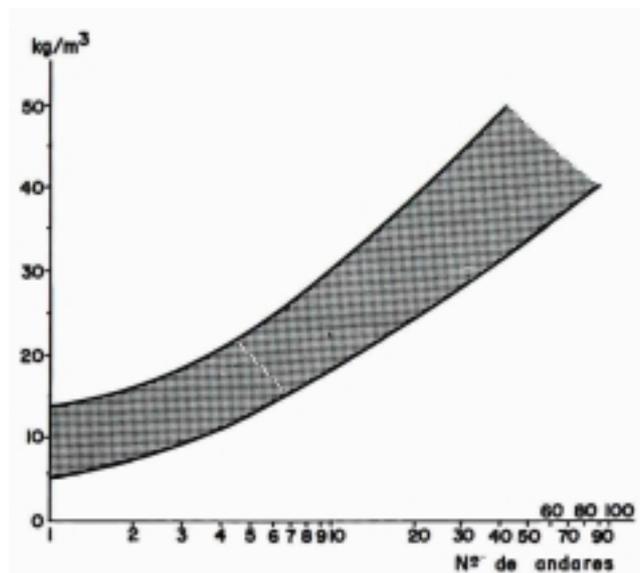


Figura III.15 - Consumo de aço x nº de andares [29]

Na estrutura objeto deste trabalho, foram consideradas as seguintes cargas permanentes atuando nos pisos:

- Peso próprio das vigas longitudinais (ou secundárias): 0,51 KN/m
- Peso próprio das vigas transversais (ou principais): 0,75 KN/m
- Peso próprio da laje: 2,79 KN/m² (Steel Deck MF-75, com espessura da forma de 1,25mm e altura total de 150mm)
- Peso próprio das paredes: 1,0 KN/m² (NBR-6120)
- Peso do revestimento: 1,0 KN/m²

3.2.2. AÇÕES VARIÁVEIS

As cargas variáveis são resultantes do uso e ocupação do edifício, como as sobrecargas devido ao peso de pessoas, objetos, materiais estocados, cargas de equipamentos, elevadores, centrais de ar condicionado, equipamentos industriais, pontes rolantes, peso de paredes removíveis, peso sobrecargas em coberturas, etc. As cargas variáveis, como o próprio nome já explica, não atuam de forma contínua na estrutura ao longo do tempo, variando não apenas de intensidade como também de posição. Estas cargas geralmente são tratadas de forma simplificada como sendo uniformemente distribuídas ao longo de uma superfície, com seu valor, na falta de informações mais precisas, especificado pela NBR-6120 [11].

Normas Técnicas de vários países permitem a redução percentual no valor das sobrecargas em função do número de pavimentos. Esta filosofia se baseia na remota possibilidade de que uma grande parte da edificação esteja sujeita simultaneamente à máxima intensidade das cargas variáveis. A NBR-6120 [11] permite, no cálculo de pilares e fundações para edifícios residenciais, comerciais e para escritórios, uma redução de até 60% nos valores das cargas acidentais.

Em nosso exemplo foi adotada uma sobrecarga de utilização no valor de 2,0 KN/m², atuando em todos os pavimentos da edificação. Para o dimensionamento dos pilares será realizada a redução da sobrecarga conforme indicado no quadro III.2.

Quadro III.2 - Redução das cargas acidentais

EDIFÍCIO COM 30 PAVIMENTOS	EDIFÍCIO COM 50 PAVIMENTOS	REDUÇÃO PERCENTUAL DA CARGA
30º PISO	50º PISO	0%
29º PISO	49º PISO	0%
28º PISO	48º PISO	0%
27º PISO	47º PISO	20%
26º PISO	46º PISO	40%
DEMAIS PISOS	DEMAIS PISOS	60%

3.2.3. AÇÃO DO VENTO

Somente a partir do início do Século XX, com o aumento do número de pavimentos das edificações, a ação do vento passou a ter uma maior importância na engenharia estrutural. Construções de pequena altura, estruturadas em concreto armado ou alvenaria, são pouco sensíveis à ação do vento. Neste sentido, alguns motivos podem ser citados, como por exemplo, a pequena altura da edificação em relação ao solo, baixa relação entre altura e dimensões em planta, elevado peso próprio, etc. Com o aumento na quantidade de pavimentos, aliado a alguns fatores que tornaram as estruturas mais suscetíveis aos esforços laterais, a consideração dos efeitos do vento passou a ser indispensável na análise estrutural destas edificações.

Nos edifícios altos a ação do vento pode ser determinante na escolha do sistema estrutural adequado para a viabilidade da edificação. Nestes casos deve existir uma

preocupação por parte do arquiteto em conciliar sua arquitetura ao sistema estrutural escolhido.

A intensidade da ação do vento é influenciada por diversos fatores, entre eles podemos citar:

- o formato da edificação
- fatores topográficos da região
- dimensões da edificação
- velocidade do vento
- rugosidade do terreno
- aberturas no edifício
- construções vizinhas

A figura III.16 exemplifica como se dá a variação da velocidade do vento em função da altura da edificação e da rugosidade do terreno [2].

Além do aumento no número de pavimentos, as estruturas atuais estão bem mais flexíveis que as de outrora, existindo uma preocupação adicional não apenas com a estabilidade da edificação, mas também com o bom funcionamento dos elementos não estruturais. Em edifícios muito susceptíveis aos esforços laterais, é comum se observar trincas em paredes, trincas em revestimentos, empenamentos em esquadrias, mau funcionamento dos elevadores, e vazamentos nas tubulações.

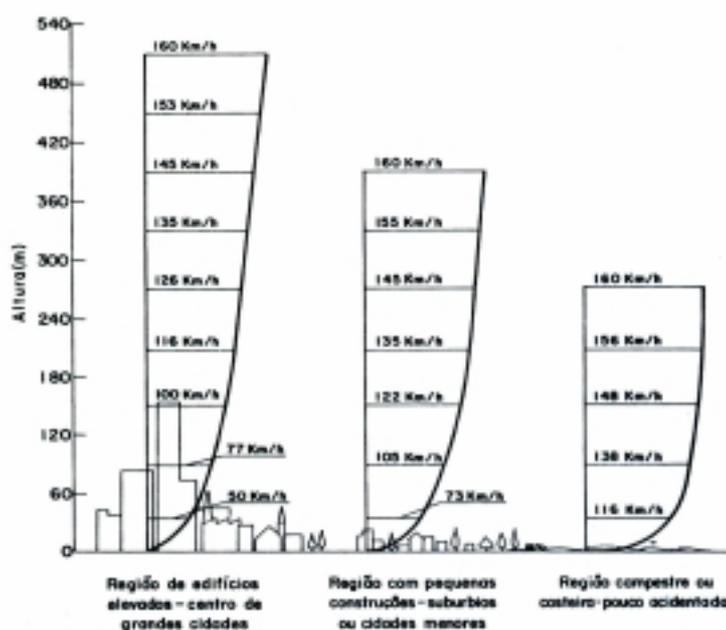


Figura III.16 - Velocidade do vento x Altura da edificação, para terrenos com diferentes graus de rugosidade [2]

As preocupações com as forças laterais tornaram-se ainda maiores à medida que os edifícios atuais perderam alguns elementos que, embora não contabilizados, colaboravam no combate às ações devidas ao vento [8]. Os edifícios atuais muitas vezes são construídos utilizando como vedação externa as fachadas de vidro, e como vedação interna divisórias leves e removíveis que, ao contrário dos tradicionais vedos em alvenaria, não colaboram de maneira significativa com a rigidez da estrutura. Nestes casos a resistência total ao deslocamento lateral é pouco superior à da estrutura. As figuras III.17 e III.18 [8], mostram a contribuição das alvenarias, escadas, divisórias e do pórtico na resistência ao deslocamento lateral para as edificações tradicionais e para os modernos arranha-céus.

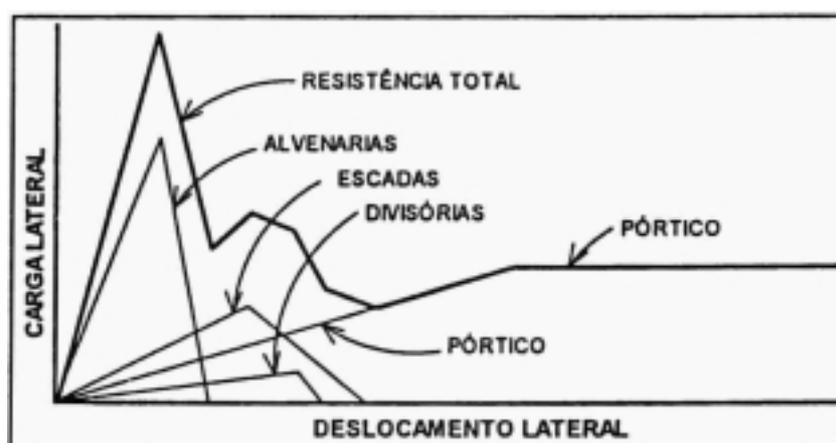


Figura III.17 - Contribuição dos elementos estruturais e não estruturais no deslocamento lateral para edificações tradicionais [8]

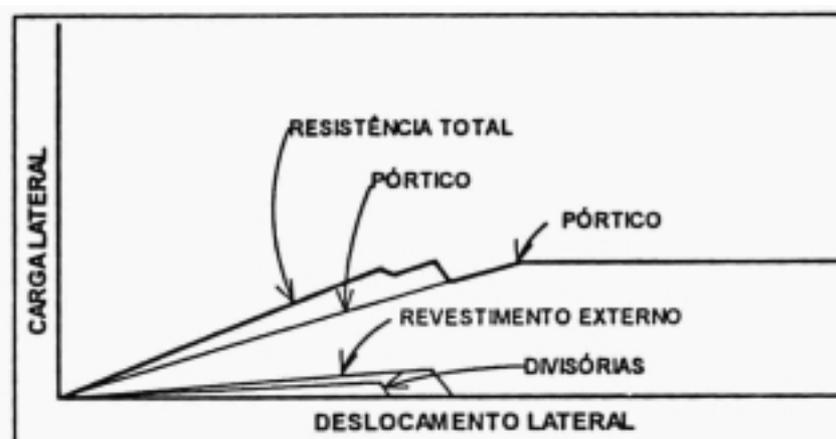


Figura III.18 - Contribuição dos elementos estruturais e não estruturais no deslocamento lateral para edificações modernas [8]

A soma destes fatores fez crescer a importância da ação do vento frente às demais ações, o que tornou necessária a busca por processos mais precisos para a determinação dos seus efeitos.

Atualmente, nos projetos estruturais em nosso país, é utilizada a NBR-6123 [12] para o cálculo da ação do vento. Apesar da ação do vento ser indiscutivelmente uma ação dinâmica, esta pode ser considerada como estática em edifícios cuja altura não ultrapasse cinco vezes a menor dimensão horizontal, nem seja superior a 50m [17]. Para edificações que não se enquadram nestas limitações, um estudo dos efeitos dinâmicos da ação do vento se faz imprescindível.

Além dos nocivos deslocamentos laterais, o vento pode causar ainda desconforto aos ocupantes das edificações. Não é fácil estabelecer critérios de conforto humano, uma vez que as reações às vibrações não variam somente de pessoa para pessoa, mas também em função da posição onde se acha o indivíduo dentro da edificação [13]. O desconforto ao ser humano causado pelo movimento lateral dos edifícios pode ser oriundo da percepção do deslocamento relativamente a algum ponto de referência e/ou, na falta deste, pela aceleração do movimento da edificação, o que já foi comprovada em inúmeros testes [7].

Em virtude da dificuldade em se conhecer com exatidão como se dá o processo perceptivo dentro do ser humano costuma-se limitar a aceleração do movimento. A NBR-6123 limita a amplitude máxima da aceleração em $0,1 \text{ m/s}^2$. Cabe lembrar que a velocidade do vento para verificação do conforto humano deve ser tomada com uma maior probabilidade de ocorrência, sendo bastante usual a consideração de que esta velocidade seja excedida em média uma vez a cada 10 anos. Para o cálculo da amplitude máxima da aceleração a NBR-6123 fornece a seguinte expressão simplificada:

$$a = 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot u \quad (\text{equação III.1})$$

Onde:

- a: é a amplitude máxima da aceleração
- f: é a frequência da estrutura
- u: é o deslocamento da estrutura

Devido à grande utilização do controle da aceleração do movimento, expressa em percentual da aceleração da gravidade, tem-se observado que a grande maioria da população reage da seguinte forma [7][13]:

$a \leq 0,5\%g$	- movimento imperceptível
$0,5\%g < a \leq 1,5\%g$	- perceptível
$1,5\%g < a \leq 5,0\%g$	- incômodo
$5,0\%g < a \leq 15\%g$	- muito incômodo
$a \geq 15\%g$	- insuportável

Para o estudo dos efeitos dinâmicos do vento a NBR-6123 apresenta o Modelo Contínuo Simplificado e o Modelo Discreto. O primeiro é aplicável a edificações apoiadas exclusivamente na base e com altura inferior a 150m, sendo considerada a resposta dinâmica destas unicamente a contribuição do modo fundamental. Em geral, a utilização apenas do primeiro modo de vibração na solução conduz a erros inferiores a 10% [12].

No Brasil não há prescrições muito detalhadas acerca do conforto humano. Embora se tenha conhecimento de que aceleração, amplitude do deslocamento e período afetam os ocupantes de uma edificação, no dia-a-dia alguns calculistas costumam apenas restringir o deslocamento da edificação a fim de diminuir a amplitude dos movimentos oscilatórios. No entanto, esta prática pode conduzir a resultados bastante insatisfatórios.

3.2.3.1. Cálculo do carregamento de vento para o edifício de 30 pavimentos

No presente trabalho o carregamento lateral devido ao vento foi estabelecido em conformidade com a NBR-6123 [12], sendo utilizado o método contínuo simplificado para a consideração dos efeitos dinâmicos devido à turbulência atmosférica. Esta mesma norma estabelece que, para edificações paralelepípedicas, sejam consideradas as excentricidades causadas por vento agindo obliquamente ou por efeito de vizinhança. Dessa forma, os resultados obtidos para o carregamento do vento serão aplicados com as seguintes excentricidades, em relação ao eixo vertical geométrico da edificação:

$$e_x = 0,075 \cdot L_x \quad (\text{equação III.2})$$

$$e_y = 0,075 \cdot L_y \quad (\text{equação III.3})$$

O que fornece os seguintes valores para as excentricidades:

$$e_x = 2,7 \text{ m}$$

$$e_y = 1,8 \text{ m}$$

Foi considerado que a edificação se encontra na cidade do Recife, em terreno plano e em zona urbanizada.

Parâmetros atribuídos ao modelo:

- Velocidade básica do vento: 30 m/s
- Fator topográfico: $S_1 = 1,0$
- Fator estatístico: $S_3 = 1,0$
- Coeficientes de arrasto na direção X:

$$h / l_1 = 85,5 / 24 = 3,56$$

$$l_1 / l_2 = 24 / 36 = 0,667$$

$$\text{Logo, } Ca_x = 1,14$$

- Coeficiente de arrasto na direção Y:

$$h / l_1 = 85,5 / 36 = 2,375$$

$$l_1 / l_2 = 36 / 24 = 1,5$$

$$\text{Logo, } Ca_y = 1,36$$

- Categoria: IV
- Classe: C
- Parâmetros p e b: $p = 0,23$ e $b = 0,71$ (Tabela 20 da NBR-6123 [12])
- Razão de amortecimento: $\xi = 0,010$
- Forma modal: $\gamma = 1,2$
- Velocidade de projeto V_p :

$$V_p = 0,69 \cdot S_1 \cdot S_3 \quad (\text{equação III.4})$$

$$V_p = 20,7 \text{ m/s}$$

- Pressão dinâmica do vento q_0 :

$$q_0 = 0,613 \cdot V_p^2 \quad (\text{equação III.5})$$

$$q_0 = 262,6 \text{ N/m}^2$$

- Coeficiente de Amplificação Dinâmica

Com o auxílio da figura 17 da NBR-6123 [12], foi possível estabelecer os valores dos coeficientes de amplificação dinâmica, a saber:

$$\xi_X = 1.343$$

$$\xi_Y = 1.343$$

- Variação da pressão dinâmica em função da altura $q(z)$:

$$q(z) = q_0 \cdot b^2 \cdot [(z/z_r)^{2p} + (h/z_r)^p \cdot (z/h)^y \cdot \frac{1+2\cdot\gamma}{1+\gamma+p} \cdot \xi] \quad (\text{equação III.6})$$

- A força estática equivalente de arrasto que incide em cada face ao nível das lajes é dada por:

$$F = q(z) \cdot A \cdot Ca \quad (\text{equação III.7})$$

Ou ainda:

$$F_X := Ca_X \cdot L_Y \cdot \int_{2.85 \cdot i - \frac{2.85}{2}}^{2.85 \cdot i + \frac{2.85}{2}} q(z) dz \quad (\text{equação III.8})$$

$$F_Y := Ca_Y \cdot L_X \cdot \int_{2.85 \cdot i - \frac{2.85}{2}}^{2.85 \cdot i + \frac{2.85}{2}} q(z) dz \quad (\text{equação III.9})$$

Onde:

i : é o i -ésimo pavimento da edificação

Ca_x e Ca_y : são os coeficientes de arrasto na direção “X” e “Y” respectivamente

L_x e L_y : são as dimensões em planta da edificação

As cargas concentradas em cada laje foram obtidas por meio das equações III.8 e III.9 e seus valores encontram-se descritos no quadro III.3.

Quadro III.3 - Força do vento concentrada ao nível de cada laje para o edifício de 30 pavimentos

LAJE	COTA (M)	F_x (KN)	F_y (KN)
1	2.85	6.79	12.14
2	5.70	9.95	17.81
3	8.55	12.59	22.53
4	11.40	14.98	26.81
5	14.25	17.24	30.85
6	17.10	19.40	34.71
7	19.95	21.49	38.46
8	22.80	23.54	42.12
9	25.65	25.55	45.72
10	28.50	27.53	49.27
11	31.35	29.50	52.78
12	34.20	31.44	56.26
13	37.05	33.37	59.71
14	39.90	35.29	63.15
15	42.75	37.20	66.56
16	45.60	39.10	69.96
17	48.45	40.99	73.36
18	51.30	42.88	76.74
19	54.15	44.70	80.11
20	57.00	46.65	83.49
21	59.85	48.53	86.85
22	62.70	50.41	90.22
23	65.55	52.29	93.58
24	68.40	54.17	96.94
25	71.25	56.05	100.30
26	74.10	57.93	103.66
27	76.95	59.80	107.02
28	79.80	61.68	110.38
29	82.65	63.56	113.74
30	85.5	65.44	117.11
TOTAL		1130,04	2022,34

De acordo com a NBR-6123 [12], as verificações relativas ao conforto, devem ser realizadas para velocidades do vento com maior probabilidade de ocorrência que a velocidade de projeto estrutural. Considera-se admissível que a amplitude máxima da

aceleração seja excedida, em média, uma vez a cada dez anos. Nestas condições, foi adotado para o fator estatístico S_3 o valor de 0.63. Procedendo-se os cálculos de maneira análoga à explicitada anteriormente, foi possível obter os resultados constantes no quadro III.4.

Quadro III.4 - Força do vento concentrada ao nível de cada laje para o edifício de 30 pavimentos para a verificação do conforto

LAJE	COTA (M)	F_x (KN)	F_y (KN)
1	2.85	3.14	5.61
2	5.70	4.60	8.24
3	8.55	5.82	10.42
4	11.40	6.93	12.40
5	14.25	7.97	14.26
6	17.10	8.97	16.05
7	19.95	9.94	17.78
8	22.80	10.89	19.48
9	25.65	11.82	21.14
10	28.50	12.73	22.78
11	31.35	13.64	24.41
12	34.20	14.54	26.01
13	37.05	15.43	27.61
14	39.90	16.32	29,20
15	42.75	17.20	30.78
16	45.60	18.08	32.35
17	48.45	18.96	33.92
18	51.30	19.83	35.48
19	54.15	20.70	37.05
20	57.00	21.57	38.60
21	59.85	22.44	40.16
22	62.70	23.31	41.72
23	65.55	24.18	43.27
24	68.40	25.05	44.82
25	71.25	25,92	46.38
26	74.10	26.79	47.93
27	76.95	27.65	49.49
28	79.80	28.52	51.04
29	82.65	29.39	52.59
30	85.5	30.26	54.15
TOTAL		522.59	905.92

3.2.3.2. Cálculo do vento para o edifício de 50 pavimentos:

Assim como no caso da edificação com 30 pavimentos, foi considerado que o prédio se encontrava na cidade do Recife, em terreno plano e em zona urbanizada.

Parâmetros atribuídos ao modelo:

- Velocidade básica do vento: 30 m/s

- Fator topográfico: $S_1 = 1,0$
- Fator estatístico: $S_3 = 1,0$
- Coeficientes de arrasto na direção X:
 - $h / l_1 = 142,5 / 24 = 5,94$
 - $l_1 / l_2 = 24 / 36 = 0,67$
 - Logo, $Ca_x = 1,19$
- Coeficiente de arrasto na direção Y:
 - $h / l_1 = 142,5 / 36 = 3,96$
 - $l_1 / l_2 = 36 / 24 = 1,5$
 - Logo, $Ca_y = 1,45$
- Categoria: IV
- Classe: C
- Parâmetros p e b: $p = 0,23$ e $b = 0,71$ (Tabela 20 da NBR-6123)
- Razão de amortecimento: $\xi = 0,010$
- Forma modal: $\gamma = 1,2$
- Velocidade de projeto V_p :
 - $V_p = 0,69 \cdot S_1 \cdot S_3$ (equação III.4)
 - $V_p = 20,7 \text{ m/s}$
- Pressão dinâmica do vento q_0
 - $q_0 = 0,613 \cdot V_p^2$ (equação III.5)
 - $q_0 = 262,6 \text{ N/m}^2$
- Coeficiente de Amplificação Dinâmica

Com o auxílio da figura 17 da NBR-6123 [12], foi possível estabelecer os valores dos coeficientes de amplificação dinâmica, a saber:

$$\xi_X = 1.219$$

$$\xi_Y = 1.178$$

- Variação da pressão dinâmica em função da altura $q(z)$:

$$q(z) = q_0 \cdot b^2 \cdot [(z/z_r)^{2p} + (h/z_r)^p \cdot (z/h)^y \cdot \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \cdot \xi] \quad (\text{equação III.6})$$

- A força estática equivalente de arrasto que incide em cada face ao nível das lajes é dada por:

$$F = q(z) \cdot A \cdot C_a \quad (\text{equação III.7})$$

Ou ainda:

$$F_x := C_{a_x} \cdot L_y \cdot \int_{2.85 \cdot i - \frac{2.85}{2}}^{2.85 \cdot i + \frac{2.85}{2}} q(z) dz \quad (\text{equação III.8})$$

$$F_y := C_{a_y} \cdot L_x \cdot \int_{2.85 \cdot i - \frac{2.85}{2}}^{2.85 \cdot i + \frac{2.85}{2}} q(z) dz \quad (\text{equação III.9})$$

Os valores das cargas concentradas em cada laje foram obtidos por meio das equações III.8 e III.9 acima e encontram-se descritos no quadro III.5.

Quadro III.5 - Força do vento concentrada ao nível de cada laje para o edifício de 50 pavimentos

LAJE	COTA (M)	F _X (KN)	F _Y (KN)
1	2.85	6.80	12.41
2	5.70	9.74	17.76
3	8.55	12.09	22.02
4	11.40	14.16	25.77
5	14.25	16.06	29.20

LAJE	COTA (M)	F _X (KN)	F _Y (KN)
26	74.10	46.48	83.90
27	76.95	47.80	86.25
28	79.80	49.10	88.59
29	82.62	50.41	90.93
30	85.50	51.71	93.25

6	17.10	17.84	32.43
7	19.95	19.54	35.49
8	22.80	21.17	38.44
9	25.65	22.76	41.30
10	28.50	24.30	44.08
11	31.35	25.81	46.79
12	34.20	27.29	49.46
13	37.05	28.75	52.08
14	39.90	30.18	54.66
15	42.75	31.60	57.21
16	45.60	33.00	59.73
17	48.45	34.39	62.22
18	51.30	35.77	64.70
19	54.15	37.14	67.15
20	57.00	38.49	69.58
21	59.85	39.84	72.00
22	62.70	41.18	74.40
23	65.55	42.52	76.79
24	68.40	43.84	79.17
25	71.25	45.17	81.54

31	88.35	53.01	95.58
32	91.20	54.30	97.89
33	94.05	55.59	100.20
34	96.90	56.88	102.51
35	99.75	58.17	104.81
36	102.60	59.46	107.11
37	105.45	60.74	109.41
38	108.30	62.03	111.70
39	111.15	63.31	113.99
40	114.00	64.59	116.28
41	116.85	65.87	118.56
42	119.70	67.14	120.84
43	122.55	68.42	123.12
44	125.40	69.70	125.40
45	128.25	70.97	127.68
46	131.10	72.25	129.95
47	133.95	73.52	132.22
48	136.80	74.79	134.50
49	139.65	76.07	136.77
50	142.5	77.34	139.04
TOTAL		2250,76	4056.86

Para as verificações de conforto, foi adotado o valor de 0.68 para o fator estatístico S_3 , resultando nos carregamentos constantes no quadro III.6.

Quadro III.6 - Força do vento concentrada ao nível de cada laje para o edifício de 50 pavimentos para a verificação do conforto

LAJE	COTA (M)	F_x (KN)	F_y (KN)
1	2.85	3.14	5.74
2	5.70	4.49	8.21
3	8.55	5.57	10.18
4	11.40	6.52	11.92
5	14.25	7.39	13.50

LAJE	COTA (M)	F_x (KN)	F_y (KN)
26	74.10	21.23	38.80
27	76.95	21.82	39.88
28	79.80	22.41	40.96
29	82.62	23.00	42.04
30	85.50	23.59	43.12

6	17.10	8.20	14.99
7	19.95	8.98	16.41
8	22.80	9.73	17.78
9	25.65	10.45	19.10
10	28.50	11.15	20.38
11	31.35	11.84	21.64
12	34.20	12.51	22.87
13	37.05	13.18	24.08
14	39.90	13.83	25.28
15	42.75	14.47	26.45
16	45.60	15.11	27.62
17	48.45	15.74	28.77
18	51.30	16.37	29.92
19	54.15	16.99	31.05
20	57.00	17.60	32.17
21	59.85	18.22	33.29
22	62.70	18.82	34.40
23	65.55	19.43	35.51
24	68.40	20.03	36.61
25	71.25	20.63	37.70

31	88.35	24.18	44.19
32	91.20	24.77	45.27
33	94.05	25.35	46.33
34	96.90	25.93	47.40
35	99.75	26.52	48.47
36	102.60	27.10	49.53
37	105.45	27.68	50.59
38	108.30	28.26	51.65
39	111.15	28.84	52.71
40	114.00	29.42	53.77
41	116.85	29.99	54.82
42	119.70	30.57	55.88
43	122.55	31.15	56.93
44	125.40	31.72	57.98
45	128.25	32.30	59.04
46	131.10	32.88	60.09
47	133.95	33.45	61.14
48	136.80	34.03	62.19
49	139.65	34.60	63.24
50	142.5	35.18	64.29
TOTAL		1026.34	1876,46

3.2.4. AÇÃO DE SISMO

Os terremotos provocam uma onda de choque que atua na fundação da edificação, submetendo-a a movimentos horizontais e verticais. Na prática, a estrutura é calculada para resistir apenas aos movimentos horizontais dos sismos, pois a experiência tem mostrado que os incrementos de esforços provocados pelos movimentos verticais são de menor importância [8]. Uma filosofia de projeto bastante geral em casos de sismos admite que a edificação poderá apresentar danos nos elementos não estruturais em casos de sismos moderados e até mesmo apresentar danos nos elementos estruturais em casos de sismos mais severos, desde que não venha a colapsar [9]. Atualmente, vem buscando-se alterar esta filosofia tradicional tendo em vista que o custo da estrutura é pequeno frente ao resto da edificação, podendo em

alguns casos ser mais econômico tornar a estrutura mais resistente aos efeitos dos terremotos. Para tanto, dispositivos amortecedores estão sendo introduzidos em edifícios mais modernos, a fim de absorver parte da ação sísmica, transmitindo à superestrutura forças de intensidade pouco superiores àquelas provocadas pelo vento.

Em nosso país não há ocorrência de ações sísmicas de maior intensidade que venha a afetar as estruturas. Dessa forma, a análise mais detalhada deste fenômeno foge do escopo deste trabalho.

3.2.5. AÇÃO DA TEMPERATURA

A variação de temperatura introduz alteração nas dimensões dos elementos estruturais. O impedimento das deformações destes elementos origina o aparecimento de tensões nas estruturas.

As tensões adicionais geradas pelas variações de temperatura podem ser controladas por dispositivos que permitem os deslocamentos, como por exemplo, as juntas de dilatação. Caso não existam estes dispositivos, pode-se ainda dimensionar a estrutura para resistir a tais ações.

É bastante comum associar os efeitos da temperatura com as dimensões em planta da edificação. No entanto a altura da edificação, principalmente nos edifícios de grande altura, pode ter influência significativa.

A preocupação com os efeitos da temperatura no plano horizontal e seu desprezo ao longo da altura foram responsáveis por inúmeros danos causados não só às paredes divisórias, mas também à própria estrutura de inúmeros edifícios [8]. A diferença de temperatura entre os pilares da fachada e os pilares internos pode facilmente chegar a 15°C, ocasionando deslocamentos relativos no topo dos pilares da ordem de 5cm em prédios de concreto armado com mais de 100 pavimentos [8].

O comprimento máximo entre juntas de dilatação para edifícios estruturados em aço deve ser de 45 a 60m para os elementos estruturais expostos e de 60 a 90m para os protegidos [15].

3.2.6. CARGAS DE MONTAGEM

As estruturas em que todas as fases construtivas não tenham sua segurança garantida pela verificação da obra pronta, deve ter, incluídas no projeto, as verificações

das fases construtivas mais significativas e sua influência na fase final [14]. As cargas de montagem são aquelas que solicitam a própria estrutura durante a fase de construção. Geralmente a estrutura é dimensionada para suportar todos os carregamentos da edificação acabada. Porém, podem ocorrer situações em que as peças de uma estrutura sejam solicitadas durante a sua montagem por cargas superiores àquelas produzidas quando da estrutura acabada.

Dentre as cargas de montagem que aparecem com frequência solicitando as estruturas na fase de construção da obra, podemos citar:

- peso do material de construção estocado
- peso do entulho da obra
- peso de equipamentos como guinchos, gruas, etc.
- reação dos escoramentos de partes da obra em construção, nas partes já construídas.

Um exemplo clássico de cargas de montagem aparece nas vigas mistas (aço-concreto) executadas sem escoramento, quando a viga de aço deve ser calculada para resistir a todos os esforços que surgem na fase que antecede à cura do concreto, ocasião em que a viga não pode ainda ser tratada como mista.

Para o dimensionamento das vigas mistas, a NBR-14323 [16] recomenda que seja considerada como atuando nas lajes com forma de aço incorporada uma sobrecarga de construção, cujo valor deve ser o mais nocivo dentre os seguintes:

- Uma carga uniformemente distribuída de no mínimo $1,0 \text{ KN/m}^2$
- Carga linear de $2,2 \text{ KN/m}$, perpendicular à direção do vão, na posição mais desfavorável, esta exigência é válida somente para a verificação ao momento fletor.

3.2.7. OUTRAS AÇÕES

Além das descritas até este momento, podem ser citadas ainda outras ações como, por exemplo, os recalques diferenciais, a retração, a fluência, ações devidas à neve entre outras.

Estas ações, embora devessem, não costumam preocupar os projetistas. Ora porque estes carregamentos não atuam em nossa região, ora porque seus efeitos costumam ser relativamente pequenos. Vale lembrar que a NBR-8800 [17] recomenda que seja levado em consideração o efeito da fluência no cálculo das deformações nas vigas mistas.

3.3. COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Os métodos para a combinação das ações que atuam em uma estrutura e seus efeitos variam de acordo com as normas técnicas de cada país. A combinação das ações, devida às ações permanentes e variáveis com suas respectivas reduções, são realizadas tendo em vista a difícil probabilidade da edificação ser solicitada simultaneamente por diversas cargas variáveis em sua máxima intensidade.

A NBR-8800 [17] exige que nenhum estado limite aplicável seja excedido quando a estrutura for submetida a todas as combinações apropriadas de ações. Os estados limites contemplados pela NBR-8800 [17] é o Estado Limite Último e o Estado Limite de Utilização. Os estados limites últimos estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil. Os estados limites de utilização estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de serviço.

Para os estados limites últimos devem-se verificar as combinações normais, que podem atuar ao longo da vida útil da estrutura, e as aplicáveis às etapas construtivas. Para os estados limites de utilização, são válidas as mesmas combinações, neste caso utilizando-se menores coeficientes de ponderação.

Em função da combinação em análise, os coeficientes podem ser obtidos no corpo da referida norma. No caso de edifício de andares múltiplos usuais, três ações devem ser combinadas: peso próprio (P_p), sobrecargas (S_c) e vento (V).

3.3.1. COMBINAÇÕES DE AÇÕES PARA OS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

Para os estados limites últimos, foram utilizadas as combinações normais, fornecidas pela NBR-8800 [17] e apresentadas na equação III.10 abaixo.

$$\sum \gamma_g \cdot G + \gamma_{q1} \cdot Q_1 + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \psi_j \cdot Q_j) \quad (\text{equação III.10})$$

Onde:

- G: são as ações permanentes que atuam na estrutura
- Q₁: é a ação variável predominante
- Q_j: são as ações demais ações variáveis
- γ_g : coeficiente de ponderação das ações permanentes
- γ_{qj} : coeficiente de ponderação das ações variáveis
- ψ : fatores de combinação

Desta forma, as combinações das ações que atuarão na estrutura como um todo, para os estados limites últimos, podem ser escritas, já assumindo valores para os coeficientes de ponderação, como:

- Peso próprio (P_p) + Sobrecarga (S_c)

$$1,3 P_p + 1,5 S_c \quad (\text{equação III.11})$$

- Peso próprio (P_p) + Vento (V)

$$1,3 P_p + 1,4 V \quad (\text{equação III.12})$$

$$1,0 P_p + 1,4 V \quad (\text{equação III.13})$$

- Peso próprio (P_p) + Sobrecarga (S_c) + Vento (V)

$$1,3 P_p + 1,5 S_c + 1,4 \cdot 0,6 V \quad (\text{equação III.14})$$

$$1,3 P_p + 1,4 V + 1,5 \cdot 0,65 S_c \quad (\text{equação III.15})$$

Dentre as combinações acima descritas parece óbvio que as combinações críticas são:

$$C_1 = 1,3 P_p + 1,5 S_c + 1,4 \cdot 0,6 V \quad (\text{equação III.14})$$

$$C_2 = 1,3 P_p + 1,4 V + 1,5 \cdot 0,65 S_c \quad (\text{equação III.15})$$

$$C_3 = 1,0 P_p + 1,4 V \quad (\text{equação III.13})$$

As combinações de ações para o estado limite último durante a construção foram utilizadas para o dimensionamento das vigas da edificação, enquanto o concreto não possuía resistência adequada para que estas trabalhassem como mistas. Neste caso a combinação para o estado limite último, já assumindo valores para os coeficientes de ponderação, foi:

$$C_4 = 1,2 P_p + 1,3 S_c \quad (\text{equação III.16})$$

3.3.2. COMBINAÇÕES DE AÇÕES PARA OS ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

No dimensionamento nos estados limites de utilização é necessário verificar o comportamento da estrutura sob ação de cargas em serviço. Desta maneira, em um estado limite de utilização, as cargas são combinadas na forma da equação III.10, sem, entretanto, majorar seus valores ($\gamma_g = \gamma_q = 1$).

Assim, as combinações de ações utilizadas na estrutura para a verificação dos estados limites de utilização foram os seguintes:

$$C_5 = P_p + S_c + 0,6 V \quad (\text{equação III.17})$$

$$C_6 = P_p + V + 0,65 S_c \quad (\text{equação III.18})$$

$$C_7 = P_p + V \quad (\text{equação III.19})$$

Para as vigas da edificação a combinação de ações para o estado limite de utilização foi:

$$C_8 = 1,0 P_p + 1,0 S_c \quad (\text{equação III.20})$$

3.4. MODELAGEM DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Os elementos que fazem parte do sistema estrutural adotado são os horizontais (vigas e lajes), verticais (pilares) e diagonais (responsáveis pelo contraventamento vertical da estrutura). Foi considerada a não linearidade geométrica na análise estrutural através do processo P-delta. Admitiu-se o comportamento elástico-linear dos materiais devido às pequenas deformações ocorridas.

3.4.1. SISTEMA DE PISO:

A maioria dos sistemas estruturais de resistência a cargas laterais para edifícios consiste na combinação de elementos verticais e horizontais. Os elementos horizontais são mais frequentemente os pisos. Quando estes pisos possuem rigidez suficiente para se comportar como um plano rígido, ele é chamado de diafragma rígido.

Nos edifícios de andares múltiplos as lajes possuem dupla função; a primeira, como se sabe, é a de servir como o piso da edificação; a segunda função, não menos importante, é de servir como diafragma horizontal.

Um diafragma horizontal típico funciona coletando os esforços horizontais em um determinado nível da edificação e, em seguida, distribuindo estes esforços entre os elementos verticais de resistência a cargas laterais.

Caso o piso seja bastante rígido, a distribuição dos esforços horizontais para os elementos verticais será essencialmente na proporção da sua rigidez relativa; caso contrário, sendo o piso flexível, a sua continuidade pode ser desprezível e não funcionará como diafragma. Por esta razão as lajes das edificações devem possuir rigidez suficiente para realizar esta distribuição de maneira adequada. A rigidez de um diafragma é função do material do qual o diafragma é constituído, bem como da relação entre o seu comprimento e largura. No caso do sistema de piso não possuir rigidez suficiente pode-se lançar mão de artifícios para se conseguir isto, como por exemplo, a utilização de contraventamentos horizontais ao nível das vigas.

Uma observação interessante é que quando o centróide das forças laterais que agem no diafragma horizontal não coincide com o centróide da rigidez dos elementos verticais, será provocado um efeito de rotação, originando uma torção na estrutura.

O sistema de piso empregado nas estruturas, objeto deste trabalho, foram as lajes com forma de aço incorporadas, mais conhecidas como Steel Deck (figura III.19). Este tipo de laje possui uma forma de aço na sua parte inferior, funcionando, antes da cura do concreto, como suporte das ações permanentes e sobrecargas de construção e, depois da cura, como armadura positiva da laje. Esta laje é considerada como mista, por propiciar o trabalho conjunto da forma de aço com a camada de concreto, formando um único elemento estrutural. A forma de aço deve, para tal, ser capaz de transmitir o cisalhamento longitudinal na interface aço-concreto. Os mecanismos responsáveis por tal transmissão são, geralmente, mossas nas formas de aço trapezoidais, ou reentrâncias que confinam o concreto. Quando presas ao vigamento de aço, através de conectores de

cisalhamento, estas lajes passam a colaborar no combate ao momento fletor das vigas, formando também um sistema misto de vigamento.

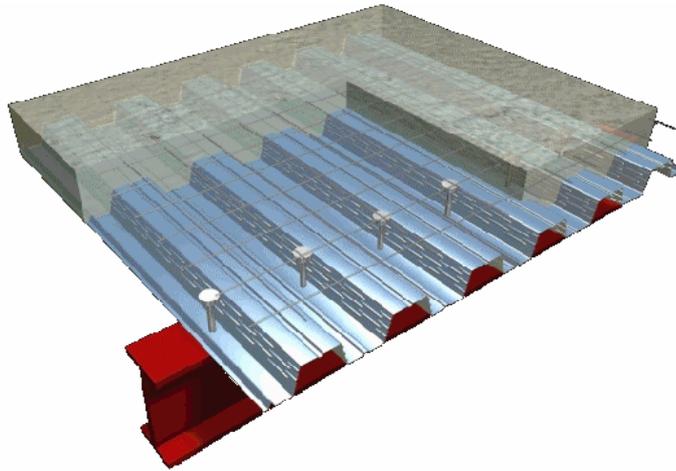


Figura III.19 - Vista geral de uma laje Steel Deck MF-75

Este sistema de piso foi escolhido para ser utilizado neste trabalho tendo em vista o bom comportamento que apresenta como diafragma rígido, além das vantagens que ele possui, dentre as quais podemos destacar as seguintes [7]:

- possibilidade de trabalhar em conjunto com as vigas metálicas formando um sistema misto;
- possibilidade de dispensa do uso de escoramento;
- maior rapidez construtiva;
- redução no desperdício de material;
- facilidade de instalação;
- facilidade de passagem de dutos e de fixação de forros;
- redução ou mesmo eliminação da armadura de tração na região de momentos positivos;
- maior segurança do trabalho por servir de plataforma de serviço e de proteção aos operários que trabalham nos andares inferiores.

Algumas limitações também podem ser citadas para o uso deste tipo de laje, como por exemplo [20]:

- eventual necessidade da colocação de armaduras adicionais para satisfazer à legislação em vigor relativa à resistência ao fogo em

edificações, ou através da aplicação de um forro suspenso, ou da pulverização de fibras isolantes na face inferior da laje;

- em pavimentos onde as cargas dinâmicas interferem na união entre a forma de aço/concreto. Armadura de aço pode ser colocada na parte superior da laje ao longo dos vãos da forma;
- aditivos para a aceleração do processo de cura do concreto à base de cloretos devem ser evitados, pois eles atacam a galvanização das chapas de aço.

Na modelagem da estrutura, as lajes foram concebidas como diafragma rígido, não considerando, portanto, a rigidez à flexão no plano da laje. Esta hipótese simplificadora reduz a quantidade de graus de liberdade do problema [19]. Os nós que compõem o plano da laje passam a ter apenas três graus de liberdade, a saber:

- Rotação em torno de X,
- Rotação em torno de Y,
- Translação segundo Z.

Outros três graus de liberdade são atribuídos ao nó mestre que corresponde ao ponto representativo de todos os nós de um piso. Os graus de liberdade do nó-mestre são:

- Translação segundo X,
- Translação segundo Y,
- Rotação em torno de Z

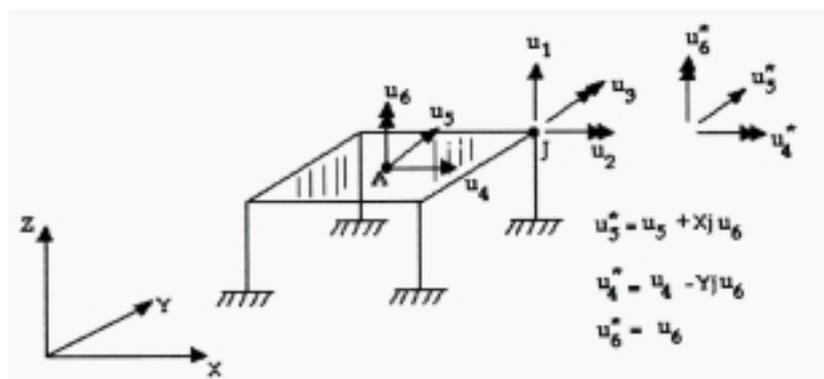


Figura III.20 - Representação do diafragma rígido [26]

Para o dimensionamento da laje utilizou-se os seguintes dados:

- Vão: 4m
- Cargas após a cura: 4 KN/m^2 (Sobrecarga + revestimento + divisórias)
- Concreto: 25 MPa
- Laje sem escoramento durante a fase de cura

Com base nestas informações o tipo de laje indicado para a estrutura em questão foi o Steel Deck MF-75, com espessura da forma de aço de 1.25mm, e altura total de 150mm (forma + concreto) . De acordo o fabricante esta laje possui um peso próprio de $2,79 \text{ KN/m}^2$.

3.4.2. VIGAS

As vigas foram modeladas como elementos de barras bi-articulados, onde suas extremidades foram conectadas tanto em pilares como em outras vigas

As vigas foram dimensionadas como mistas, com base nas prescrições da NBR-8800 [17], sendo as características da seção mista homogeneizada introduzidas posteriormente na análise estrutural. Reduções no consumo de aço da ordem de 20 a 30% são freqüentemente possíveis em sistemas mistos [24]. Além da economia de aço, outras vantagens foram levadas em consideração na escolha deste tipo de vigamento, a saber:

- menor altura de vigamento;
- pisos com boa rigidez à flexão no plano horizontal;
- possibilidade de vencer maiores vãos.

Muito embora se diga costumeiramente que as vigas são mais econômicas quanto maior for seu grau de hiperestaticidade, no caso das vigas mistas de piso geralmente a solução biapoiada costuma conduzir a soluções mais econômicas. As mais simples e econômicas ligações de apoio de vigas, como as cantoneiras de alma ou chapa simples, têm pouca rigidez e resistência à flexão [18]. Sendo assim, torna-se mais conveniente que as vigas construídas com este tipo de ligação sejam calculadas como

simplesmente apoiadas. Tais vigas possuem as seguintes vantagens em relação às calculadas como contínuas [18]:

- normalmente, uma pequena parte da alma fica sujeita à compressão e a mesa comprimida é travada pela laje de concreto; assim, a resistência da viga não é limitada pela flambagem do perfil de aço, global ou local;
- a alma fica sujeita a estados de tensões menos severos; torna-se maior a possibilidade de se executar furos para a passagem de dutos;
- os momentos fletores e as forças cortantes são estaticamente determinados e não são influenciados pela fissuração, retração ou deformação lenta do concreto;
- não há interação entre comportamentos de vãos adjacentes;
- os momentos transmitidos aos pilares são baixos ou quase nulos;
- a fissuração do concreto é menor, já que está sujeito à tração apenas nos apoios (devido à tendência de continuidade);
- a análise estrutural e o dimensionamento são rápidos e simples.

3.4.2.1. Solicitações nas vigas mistas:

As vigas dos pisos foram projetadas em seção mista aço/concreto, com interação parcial e sem escoramento durante a fase de cura do concreto. Optamos por não utilizar interação completa porque, geralmente, no sistema de construção não escorado, a seção de aço apropriada para resistir aos esforços antes da resistência do concreto atingir 75% do f_{ck} , geralmente é suficiente para resistir aos esforços após a cura fazendo uso apenas de uma interação parcial, tornando-se desnecessário ou mesmo antieconômico a adoção da interação completa. A experiência vem demonstrando que graus de interação da ordem de 70 a 90% são bastante interessantes do ponto de vista econômico [18]. Vale a pena lembrar que a NBR-8800 [17] limita a um mínimo de 50% o grau de interação para as vigas mistas.

No dimensionamento das vigas dos pisos, foi admitido o sistema não escorado, ou seja, a viga de aço trabalhando isoladamente, é dimensionada para resistir ao peso próprio do concreto fresco, juntamente com outras cargas de construção, aplicadas antes que o concreto adquira resistência adequada. Deve-se, dessa forma, adotar dois carregamentos básicos, a saber:

- o primeiro, que solicita a viga metálica, enquanto o concreto não atinge 75% da sua resistência característica.
- o segundo, que solicita a viga mista, quando a resistência do concreto excede aquele valor.

As cargas consideradas antes do concreto atingir 75% da sua resistência foram:

- $P_1 = 0,51 \text{ KN/m}$ (peso próprio das vigas longitudinais ou secundárias)
- $P_2 = 0,75 \text{ KN/m}$ (peso próprio das vigas transversais ou principais)
- $P_3 = 2,79 \cdot 4 = 11,16 \text{ KN/m}$ (Reação da laje)
- $P_4 = 1 \cdot 4 = 4,0 \text{ KN/m}$ (sobrecarga de construção)

Após a resistência do concreto ter atingido 75% daquela prevista em projeto, as seguintes ações irão solicitar a viga mista:

- $P_5 = 1 \cdot 4 = 4,0 \text{ KN/m}$ (peso do revestimento)
- $P_6 = 1 \cdot 4 = 4,0 \text{ KN/m}$ (peso das divisórias)
- $P_7 = 1 \cdot 4 = 4,0 \text{ KN/m}$ (sobrecarga de utilização)

Considerando que as lajes Steel-Deck são armadas apenas em uma direção, não apenas pelo sentido das nervuras das formas, mas também devido à relação entre os comprimentos dos vãos da laje, apenas as vigas longitudinais (V-1, V-2, V-3, V-4, V-5, V-6 e V-7) irão receber a carga proveniente das lajes. As demais vigas (V-8, V-9, V-10, V-11, V-12) serão solicitadas pelas reações das primeiras. Vale lembrar que as vigas de bordo (V-1, V-7, V-8 e V-12) recebem apenas a metade dos carregamentos acima explicitados, exceto é claro, o seu peso próprio.

Com base nos carregamentos anteriormente descritos, determinamos quais as cargas permanentes e sobrecargas que atuam nas vigas dos pisos antes e depois do concreto atingir 75% de sua resistência característica (quadro III.7 e III.8).

Quadro III.7 - Carregamento atuante nas vigas longitudinais ou secundárias

ETAPA DA CONSTRUÇÃO	TIPO DO CARREGAMENTO		CARGAS ATUANTES (KN/m e KN)			
			V-2, V-3, V-4, V-5 e V-6		V-1 e V-7	
			Durante a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck 28}$	Permanente	Distrib.	P_1+P_3
Concent.	-	0	-		0	
Durante a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck 28}$	Sobrecarga	Distrib.	P_4	4	$P_4/2$	2
Concent.		-	0	-	0	
Após a construção $f_{ck} > 75\%f_{ck 28}$	Permanente	Distrib.	$P_1+P_3+P_5+P_6$	19.67	$P_1+(P_3+P_5+P_6)/2$	10.09
		Concent.	-	0	-	0
Após a construção $f_{ck} > 75\%f_{ck 28}$	Sobrecarga	Distrib.	P_7	8	$P_7/2$	4

Quadro III.8 - Carregamento atuante nas vigas transversais ou principais

ETAPA DA CONSTRUÇÃO	TIPO DO CARREGAMENTO		CARGAS ATUANTES (KN/m e KN)			
			V-9, V-10, V-11		V-8 e V-12	
			Durante a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck 28}$	Permanente	Distrib.	P_2
Concent.	Reação das vigas long	105.3	Reação das vigas long.		52.65	
Durante a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck 28}$	Sobrecarga	Distrib.	-	0	-	0
		Concent.	Reação das vigas long	36	Reação das vigas long.	18
Após a construção $f_{ck} > 75\%f_{ck 28}$	Permanente	Distrib.	P_2	0.75	P_2	0.75
		Concent.	Reação das vigas long	177.3	Reação das vigas long.	88.65
Após a construção $f_{ck} > 75\%f_{ck 28}$	Sobrecarga	Distrib.	-	0	-	0
		Concent.	Reação das vigas long	72	Reação das vigas long.	36

Utilizando-se para os carregamentos acima as combinações de ações para os estados limites últimos e de utilização, as solicitações obtidas para as vigas estão apresentadas nos quadros III.6 e III.7 abaixo.

Quadro III.6 - Solicitações nas vigas longitudinais ou secundárias

TIPO DE SOLICITAÇÃO	ETAPA DA CONSTRUÇÃO	ESTADO LIMITE	VALOR DA SOLICITAÇÃO (KN.cm e KN)	
			V-2, V-3, V-4 V-5 e V-6	V-1 e V-7
Momento fletor	Durante a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck,28}$	Utilização	$M_1 = 15865.9$	$M_1 = 8191.1$
		Último	$Md_1 = 19444.0$	$Md_1 = 10031.9$
Momento fletor	Após a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck,28}$	Utilização	$M_2 = 28015.9$	$M_2 = 14226.1$
		Último	$Md_2 = 38040.6$	$Md_2 = 19356.0$
Esforço cortante	Durante a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck,28}$	Utilização	$V_1 = 70.51$	$V_1 = 36.40$
		Último	$Vd_1 = 86.40$	$Vd_1 = 44.60$
Esforço cortante	Após a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck,28}$	Utilização	$V_2 = 124.55$	$V_2 = 63.34$
		Último	$Vd_2 = 169.1$	$Vd_2 = 86.00$

Quadro III.7 - Solicitações nas vigas transversais ou principais

SOLICITAÇÃO	ETAPA DA CONSTRUÇÃO	ESTADO LIMITE	VALOR DA SOLICITAÇÃO (KN.cm e KN)	
			V-9, V-10, V-11	V-8 e V-12
Momento fletor	Durante a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck,28}$	Utilização	$M_1 = 28860.0$	$M_1 = 14730.0$
		Último	$Md_1 = 35352.0$	$Md_1 = 18036.0$
Momento fletor	Após a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck,28}$	Utilização	$M_2 = 50460.0$	$M_2 = 25530.0$
		Último	$Md_2 = 68478.0$	$Md_2 = 34629.0$
Esforço cortante	Durante a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck,28}$	Utilização	$V_1 = 73.65$	$V_1 = 30.29$
		Último	$Vd_1 = 90.20$	$Vd_1 = 46.90$
Esforço cortante	Após a construção $f_{ck} \leq 75\%f_{ck,28}$	Utilização	$V_2 = 127.65$	$V_2 = 65.26$
		Último	$Vd_2 = 173.10$	$Vd_2 = 88.50$

De posse das solicitações, foi possível proceder com o dimensionamento das vigas mistas. Para tanto foi elaborado, para este trabalho, um programa computacional baseado nas prescrições da NBR-8800 [17], o qual se encontra no apêndice 1. Para a elaboração deste programa foi utilizado o software Mathcad.

Deste dimensionamento resultaram vigas mistas com as características constantes no quadro III.8.

Quadro III.8 - Características das vigas mistas

VIGAS	PERFIL ADOTADO	VIGA DE AÇO		VIGA MISTA		I_{ef}/I_x	W_{ef}/W_x
		I_x (cm ⁴)	W_x (cm ³)	I_{ef} (cm ⁴)	W_{ef} (cm ³)		
V-1	VS 450x51	22640,0	1006	48228,1	1395,3	2,130	1,387
V-2	VS 450x51	22640,0	1006	64256,1	1535,3	2,838	1,526
V-3	VS 450x51	22640,0	1006	64256,1	1535,3	2,838	1,526
V-4	VS 450x51	22640,0	1006	64256,1	1535,3	2,838	1,526
V-5	VS 450x51	22640,0	1006	64256,1	1535,3	2,838	1,526
V-6	VS 450x51	22640,0	1006	64256,1	1535,3	2,838	1,526
V-7	VS 450x51	22640,0	1006	48228,1	1395,3	2,130	1,387
V-8	VS 550x75	52750,0	1918,0	90997,5	2390,8	1,725	1,246
V-9	VS 550x75	52750,0	1918,0	111722,2	2536,0	2,118	1,322
V-10	VS 550x75	52750,0	1918,0	111722,2	2536,0	2,118	1,322
V-11	VS 550x75	52750,0	1918,0	111722,2	2536,0	2,118	1,322
V-12	VS 550x75	52750,0	1918,0	90997,5	2390,8	1,725	1,246

As propriedades geométricas da seção mista, utilizadas na determinação das tensões e deformações em regime elástico, são obtidas por homogeneização teórica da seção. A homogeneização da seção nada mais é do que a transformação da seção de concreto em uma seção equivalente de aço. Esta transformação é obtida através da redução da largura efetiva do concreto dividindo-a pela relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha = E_{aço} / E_{concreto} \quad (\text{equação III.21})$$

Vale lembrar que no cálculo da seção mista homogeneizada deve ser desprezada a área referente ao concreto tracionado (figura III.21).

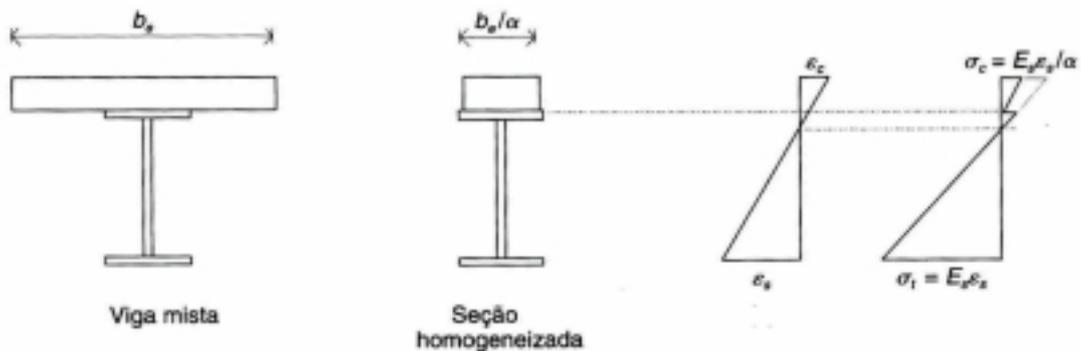


Figura III.21 - Seção homogeneizada para cálculo em regime elástico [28]

A NBR-8800 [17] recomenda que no cálculo das deformações das vigas mistas seja levado em consideração o efeito da fluência do concreto. Considerando-se que a deformação plástica ε_{cc} vale φ vezes a deformação elástica ε_{c0} , donde a deformação total $\varepsilon_{c\infty}$ é dada por [28]:

$$\varepsilon_{c\infty} = \varepsilon_{c0} + \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} \cdot (1 + \varphi) \quad (\text{equação III.22})$$

Onde φ é conhecido como coeficiente de fluência. Daí resultam as seguintes expressões:

$$E_{\text{conc } \infty} = E_{c0} / (1 + \varphi) \quad (\text{equação III.23})$$

$$\alpha_{\infty} = \alpha \cdot (1 + \varphi) \quad (\text{equação III.24})$$

O valor do coeficiente de fluência é influenciado por diversos fatores, como por exemplo, condições de cura, materiais utilizados, condições ambientais, etc. Para tanto PFEIL [28] sugere o uso do valor de $\varphi = 2$, recomendado pelo Eurocode, o que fornece:

$$\alpha_{\infty} = \alpha \cdot (1 + 2) \Rightarrow \alpha_{\infty} = 3 \cdot \alpha \quad (\text{equação III.25})$$

O valor de α_{∞} só é atingido após alguns anos de atuação da carga. Simplificadamente, o Eurocode 4 permite que a deformação lenta seja levada em consideração, dividindo-se o módulo de elasticidade do concreto por 2 [18] [28].

3.4.3. PILARES

Os pilares foram modelados através de elementos de barra com ligações rígidas entre os lances de pilares. A não-linearidade geométrica foi considerada através do processo P-delta. A análise numérica da estrutura foi feita utilizando-se o método dos elementos finitos.

Para que os resultados das estruturas analisadas fossem condizentes com a nossa realidade, assim como nas vigas mistas, foi elaborado um programa computacional (apêndice - 2) a fim de realizar o dimensionamento dos pilares de acordo com as

prescrições da NBR-8800 [17], para os efeitos combinados de força normal de compressão e momento fletor.

Foram utilizados nos pilares perfis da série CS, todos posicionados com as almas no sentido do eixo Y. No posicionamento dos pilares foi levada em consideração a intensidade das solicitações de flexão, que são maiores em torno do eixo X, devido à maior área exposta de vento e o menor número de pilares na direção Y. As reduções de pilares, quando possível, foram realizadas a cada seis pavimentos para a edificação de 30 andares e a cada 10 pavimentos para a edificação com 50 andares. Na redução dos pilares foi mantida constante a altura dos perfis, reduzindo apenas a espessura das chapas que os formam, a fim de facilitar a execução das emendas.

3.4.4. DIAGONAIS DE CONTRAVENTAMENTO:

As diagonais foram modeladas através de elementos de barra com seus extremos articulados. Estes elementos tiveram, assim como as vigas e os pilares, verificadas suas capacidades resistentes de acordo com a NBR-8800 [17]. Os tipos de perfis mais utilizados nos contraventamentos de edificações em aço são as cantoneiras, perfis de seção tubular, além dos perfis H laminados e soldados (figura III.22) [29]. Para compor as diagonais de contraventamento das edificações analisadas no presente trabalho foram utilizados os perfis laminados H de abas paralelas para as edificações de 30 pavimentos e perfis soldados de série C.S. para as edificações de 50 pavimentos.

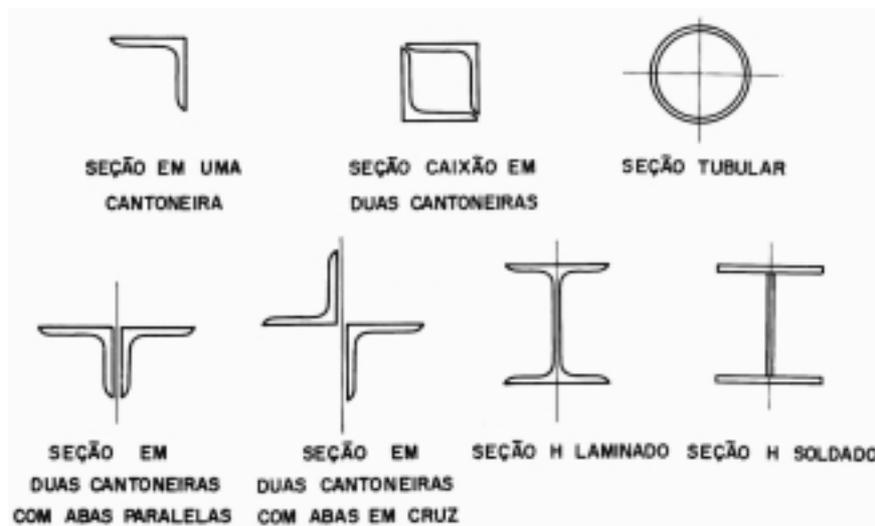


Figura III.22 - Tipos de perfis para contraventamento [29]

3.4.5. SISTEMAS DE LIGAÇÃO:

O termo ligação se aplica aos detalhes construtivos que promovem a união de partes da estrutura. Um ponto importante na etapa de projeto é a definição do sistema de ligação a ser adotado entre os elementos que compõem a estrutura metálica como: vigas, pilares e contraventamentos. A rigidez das ligações, ou seja, sua capacidade de impedir a rotação relativa entre as partes ligadas, é responsável pelo comportamento final da estrutura.

As ligações devem ser convenientemente concebidas e executadas de modo que as mesmas se comportem em termos de rotações e deslocamentos conforme consideradas na análise estrutural, sob pena da estrutura não se comportar conforme estabelecido.

De um modo geral as ligações podem ser classificadas quanto à rigidez em:

- ligações rígidas (engastadas);
- ligações flexíveis (rotuladas);
- ligações semi-rígidas

Na realidade, não existem ligações perfeitamente rígidas ou perfeitamente flexíveis. Agrupamos as ligações em rígidas ou flexíveis de acordo com o seu grau de rigidez (figura III-24). Uma ligação considerada flexível deverá apresentar, após o carregamento da estrutura, uma rotação relativa entre as partes da ordem de 80% ou mais, daquela teoricamente esperada caso a conexão fosse livre a girar. Quanto às rígidas, estas devem apresentar, após o carregamento da estrutura, uma restrição à rotação da ordem de 90% ou mais daquela teoricamente necessária à ocorrência de nenhuma rotação. Caso a restrição às rotações esteja entre 20 e 90%, as ligações são classificadas como semi-rígidas [22].

As ligações utilizadas na análise estrutural foram as flexíveis. Dessa forma, os nós de ligação das vigas e das diagonais de contraventamento foram modelados como rótulas perfeitas.

Além das vantagens inerentes a este tipo de ligação, como, por exemplo, facilidade de execução e menor custo, sua utilização em edifícios altos apresenta também conveniência de não transmitir momento dos pilares para as vigas quando a ação de cargas laterais. Isto resulta numa grande economia no que diz respeito à produtividade,

pois as vigas e as ligações dimensionadas para um determinado piso da edificação podem ser repetidas para os demais sem grandes preocupações, diferentemente do que ocorre em uma estrutura de pórticos rígidos.

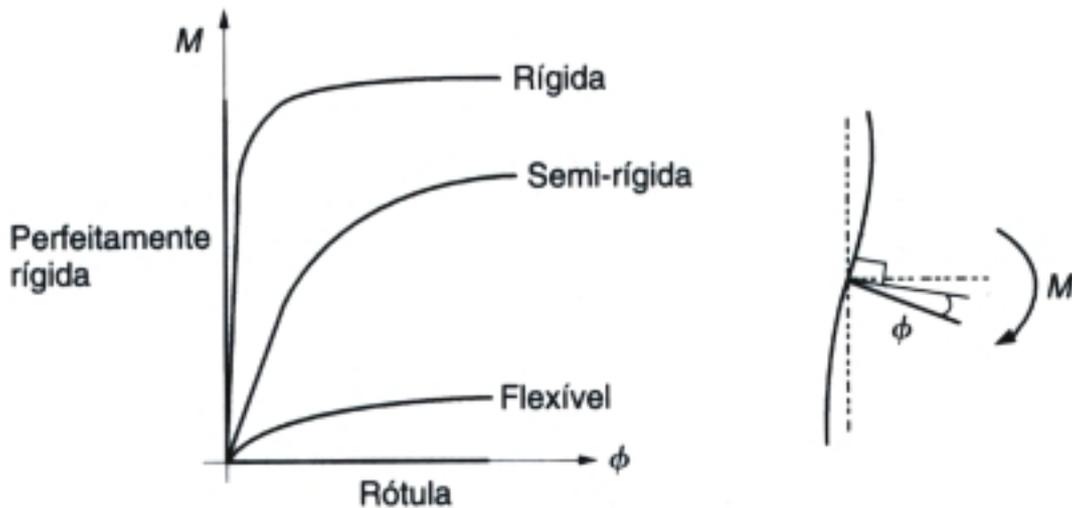


Figura III.23 - Diagrama momento /rotação para diferentes tipos de ligações [22]

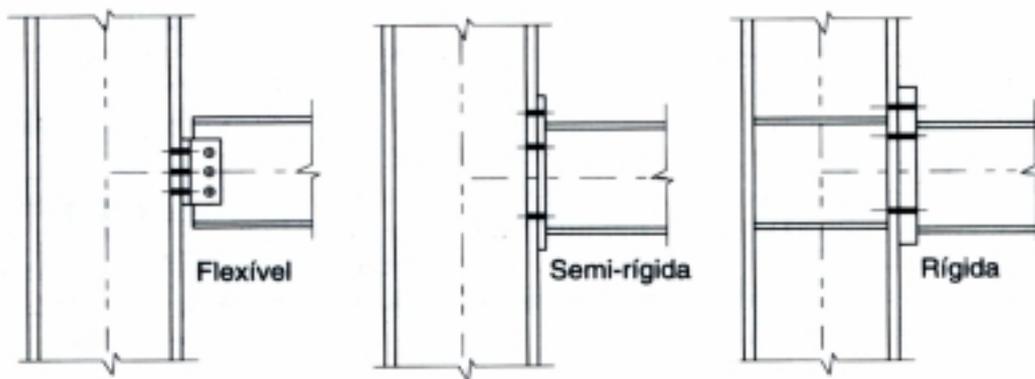


Figura III.24 - Exemplo de ligação flexível, semi-rígida e rígida [22]

3.4.6. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS:

A denominação estrutura de concreto armado ou estrutura de aço refere-se à solução utilizada para vigas e pilares, uma vez que as lajes sempre têm o concreto como componente, independentemente do tipo de estrutura [18].

Em nosso trabalho foi utilizado o aço estrutural para os pilares e diagonais de contraventamento. Para as vigas e as lajes optou-se por uma solução mista, com o

concreto na parte superior trabalhando à compressão e o aço na inferior trabalhando à tração.

3.4.6.1. Propriedades do aço

O comportamento da estrutura metálica está intimamente ligado às propriedades mecânicas do aço estrutural empregado. A NBR-8800 [17] em seu Anexo A, fornece as propriedades mecânicas e a composição química dos aços estruturais.

Independentemente do tipo do aço, são observadas as seguintes propriedades, na faixa normal de temperaturas atmosféricas:

- Módulo de elasticidade: $E = 205000 \text{ MPa}$
- Peso específico: $\gamma_a = 77 \text{ KN/m}^3$
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$
- Módulo de elasticidade transversal: $G = 78850 \text{ MPa}$
- Coeficiente de dilatação térmica: $\beta = 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Outras características indispensáveis para a análise da estrutura dependem do tipo de aço utilizado, entre as quais podemos citar o limite de escoamento (f_y) e o limite de resistência à tração (f_u), que limites são obtidos através do diagrama tensão-deformação (figura III.25) do aço em questão.

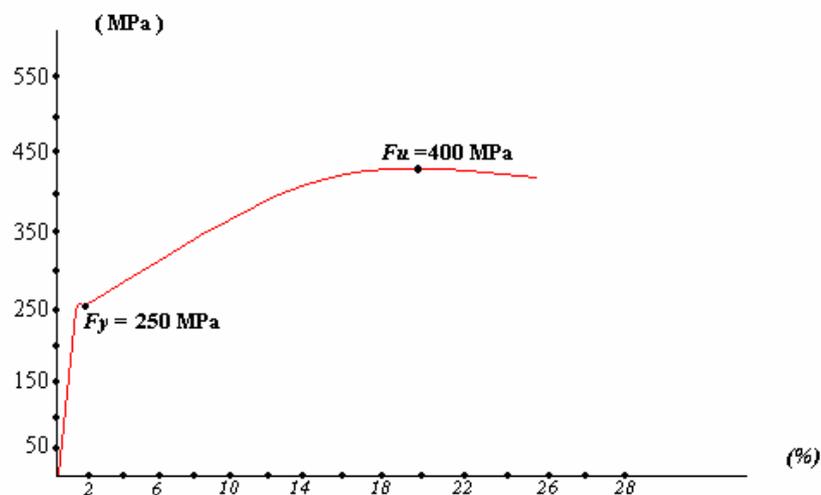


Figura III.25 - Diagrama tensão-deformação do aço ASTM-A36 [25]

Estes parâmetros são fundamentais no dimensionamento das estruturas metálicas, e os seus valores variam de acordo com o tipo do aço.

Para os pilares foram utilizados aços da alta resistência mecânica e alta resistência à corrosão atmosférica tipo USI-SAC-350 (ASTM A-588). Para as vigas e diagonais de contraventamento também foram utilizados aços de alta resistência à corrosão atmosférica do tipo USI-SAC-250 (ASTM A-709), porém de média resistência mecânica.

Estes aços, também denominados aços patináveis, desenvolvem em determinadas condições de exposição ao meio ambiente (ciclos alternados de umidade e vento) uma camada de óxido compacta e aderente ao substrato metálico (pátina), que age bloqueando o processo corrosivo, protegendo o metal. São empregados onde se requer uma redução de peso aliado a uma alta resistência à corrosão atmosférica.

As figuras III.26 e III.27 ilustram o trabalho desenvolvido pela USIMINAS no intuito de comparar o desempenho do seu aço patinável USI-SAC com o aço-carbono A-36, em relação à resistência à corrosão atmosférica [25].

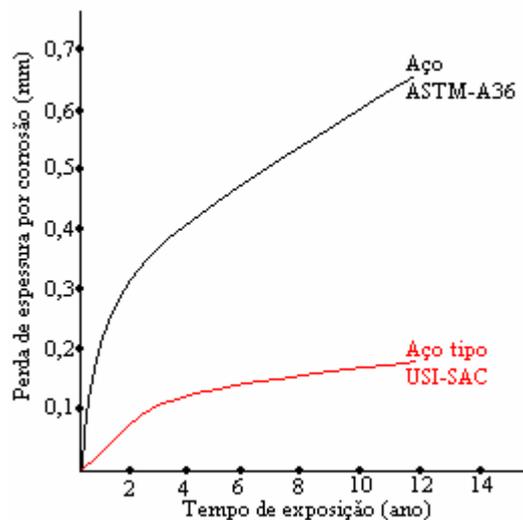


Figura III.26 - Diagrama corrosão-exposição do aço em atmosfera industrial [25]

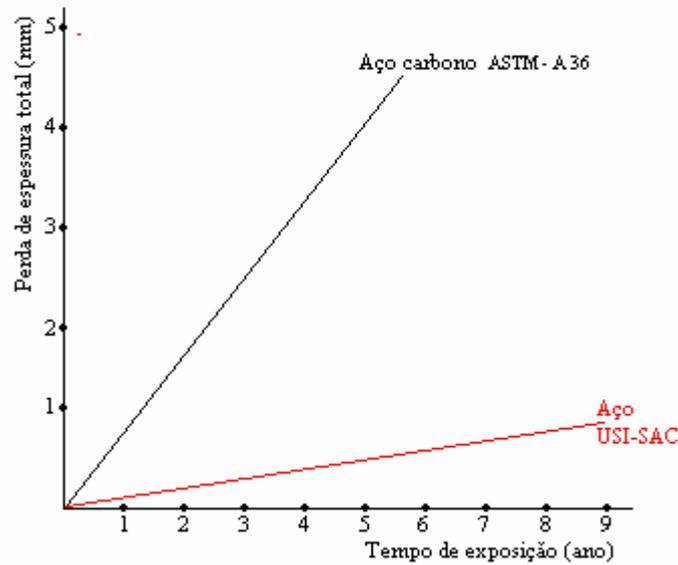


Figura III.27 - Diagrama corrosão-exposição do aço em atmosfera marinha [25]

As lajes Steel Deck utilizam aço galvanizado tipo ASTM A-653 grau 40 (ZAR 280), conforme informações do fabricante. Para os conectores de cisalhamento, foi empregado aço padrão ASTM A-108. O quadro III.9 apresenta os limites de escoamento e de resistência à tração para os aços utilizados no presente trabalho.

Quadro III.9- Propriedades mecânicas dos aços

UTILIZAÇÃO	PADRÃO ASTM	LIMITE DE ESCOAMENTO f_y (N/mm ²)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO f_u (N/mm ²)
Pilares	A-588	345	485
Vigas	A-709	250	400
Contraventamento	A-709	250	400
Lajes steel deck	A-653	280	400
Conectores	A-108	345	415

3.4.6.2. Propriedades do concreto

O concreto foi utilizado nas lajes com forma de aço incorporada (steel-deck). Seu papel é de fundamental importância, pois além de absorver os esforços de

compressão nas lajes e nas vigas mistas, absorve tensões de cisalhamento quando do comportamento das lajes como diafragma horizontal. As propriedades atribuídas ao concreto foram as seguintes:

- resistência característica: 25 MPa
- peso específico: 24 KN/m³
- módulo de elasticidade: $E_c = 42 \cdot \gamma_c^{1.5} \cdot \sqrt{f_{ck}}$ MPa
 $E_c = 24691$ MPa
- coeficiente de Poisson: $\nu = 0,2$

Um dos parâmetros mais questionados durante o projeto de revisão da atual NBR-6118/2003 [23], foi justamente o valor do módulo de elasticidade do concreto. Por se tratar de uma estrutura em aço, optou-se por adotar o módulo de elasticidade secante do concreto prescrito pela norma de aço, no caso a NBR-8800. Além do mais, dentre as equações propostas pelo EUROCODE 4, pela NBR-6118/2003 e pela NBR 8800/86, esta última é a que apresenta os valores mais conservadores para o módulo de elasticidade do concreto, como podemos observar no quadro III.10, utilizando-se um f_{ck} de 25 MPa.

Quadro III.10 - Valores do módulo de elasticidade do concreto para diferentes normas

NORMA	EQUAÇÃO PROPOSTA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)
Eurocode 4	$E_c = 9500 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3}$	30471.5
NBR-6118/2003	$E_c = 5600 \cdot (f_{ck})^{1/2}$	28000.0
NBR-8800/86 *	$E_c = 42 \cdot \gamma_c^{1.5} \cdot \sqrt{f_{ck}}$	24690.8

* Com γ_c em KN/m³; f_{ck} e E_c em MPa

A escolha do módulo de elasticidade mais conservador se faz importante à medida que a NBR-8800 recomenda que seja levado em consideração o efeito da fluência do concreto para as cargas de longa duração, no cálculo das deformações em vigas mistas.

3.5. EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM

Em uma análise estrutural, quando as equações de equilíbrio são escritas em relação à geometria deformada da estrutura, esta é classificada como análise em teoria de segunda ordem. Este tipo de análise tornou-se indispensável à medida que as estruturas ganharam altura, e foram retirados alguns elementos que, embora não computados, garantiam uma maior reserva de rigidez lateral à edificação. De modo geral, a não-linearidade geométrica é relevante, sempre que a combinação dos deslocamentos com a disposição das cargas na estrutura seja tal que conduza a uma situação de instabilidade ou ao surgimento de esforços adicionais significantes [14].

A análise em teoria de segunda ordem acrescenta aos efeitos de primeira ordem, o efeito das ações verticais na presença dos deslocamentos provocados pelas ações horizontais. Para este efeito dá-se o nome de P-delta. O não conhecimento da geometria deformada da estrutura durante a fase de formulação das equações de equilíbrio, faz da análise em teoria de segunda ordem um processo iterativo.

A NBR-8800/86 [17] recomenda que devam ser considerados efeitos significativos que resultam da deformação da estrutura, e para tanto, apresenta em seu Anexo L um método simplificado para análise da estrutura em teoria de segunda ordem.

O método apresentado pela NBR-8800 [17] é conhecido como da força lateral equivalente. Este método, que é apenas um entre os vários já desenvolvidos para estimar os efeitos de segunda ordem, leva em consideração apenas o efeito P-delta, desprezando o efeito da modificação da rigidez das barras causada pela força axial. Em geral, a consideração da alteração de rigidez em função da força normal tem pequena influência na análise da maior parte das estruturas [27].

O método proposto pela NBR-8800 [17] pode ser facilmente compreendido a partir das condições de equilíbrio da estrutura, na sua configuração deslocada. Exemplificando, para que seja satisfeito o equilíbrio na barra da figura III.28.a, tem-se:

$$M_a = -M_b + V.h + P.\Delta \quad (\text{equação III.26})$$

$$M_a + M_b = V.h + P.\Delta \quad (\text{equação III.27})$$

$$M = M_a + M_b = V.h + P.\Delta \quad (\text{equação III.28})$$

$$M = V.h + P.\Delta \quad (\text{equação III.29})$$

$$M = V.h + (P.\Delta/h).h \quad (\text{equação III.30})$$

$$M = V \cdot h + V' \cdot h \quad (\text{equação III.31})$$

Onde $V' = (P \cdot \Delta / h)$, é chamado de força cortante fictícia.

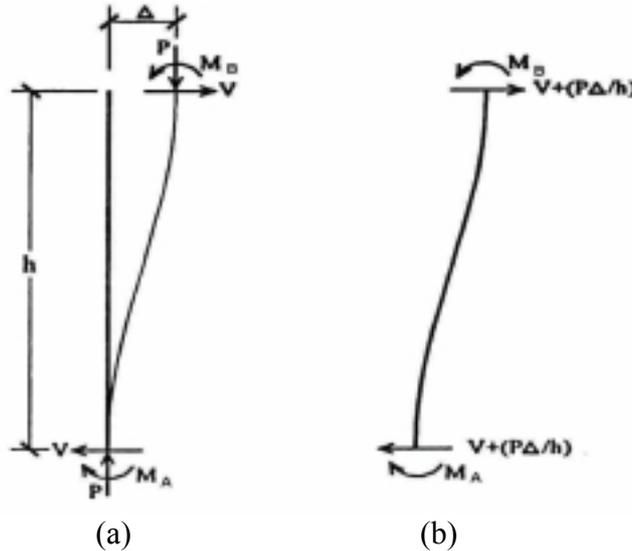


Figura III.28 - Consideração do efeito P-delta [27]

Observa-se que estas forças fictícias sujeitarão a barra a uma nova configuração (figura III.28.b). Forças cortantes reais V atuarão junto com forças cortantes fictícias V' , levando a um incremento no valor do deslocamento. Os momentos corretos nas extremidades das barras devem ser escritos utilizando a nova configuração da barra.

A dificuldade em se resolver o modelo matemático que conduz diretamente à posição de equilíbrio, faz necessário que se utilize incrementos sucessivos de solicitações, prosseguindo até que a diferença entre os incrementos de deslocamento Δ_{i+1} e Δ_i torne-se desprezível em presenças dos obtidos em iterações anteriores.

Os conceitos descritos podem ser aplicados a um edifício de vários andares como mostra a figura III.29. Para isso a força cortante fictícia que atua em cada andar i é dada pela equação:

$$V_i' = \sum P_i / h_i \cdot (\Delta_{i+1} - \Delta_i) \quad (\text{equação III.32})$$

Onde:

- $\sum P_i$: é o somatório das forças normais nos pilares do andar i
- h_i : é a altura do andar i
- Δ_{i+1} e Δ_i : são os deslocamentos horizontais nos andares $i+1$ e i respectivamente

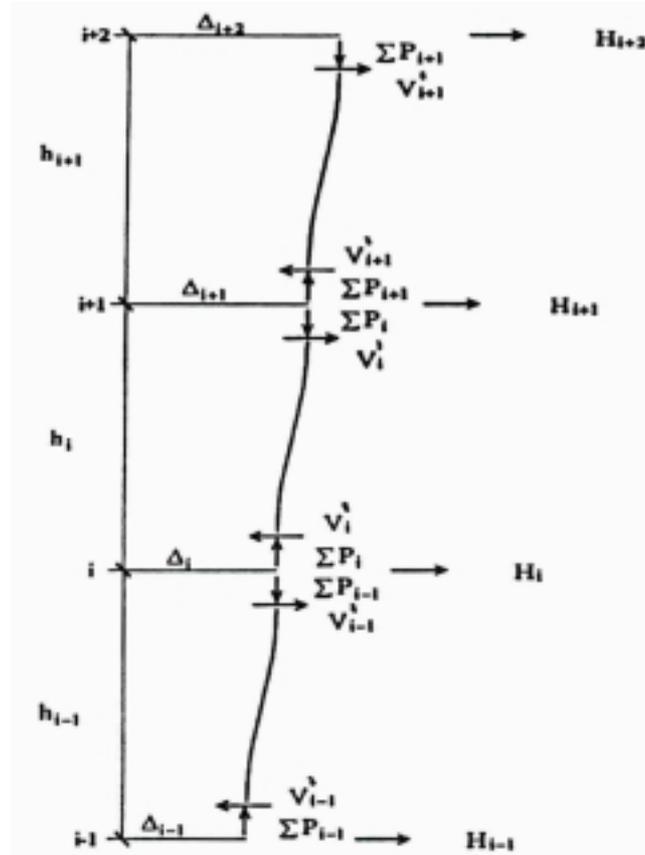


Figura III.29 - Efeito P-delta em edifícios [17]

Para o caso onde apenas são aplicados carregamentos verticais, como estes não produzem deformações horizontais significativas na estrutura, os deslocamentos horizontais iniciais, de acordo com a NBR-8800 [17] devem ser estabelecidos com base na tolerância de montagem da estrutura.

A análise dos efeitos de segunda ordem neste trabalho foi realizado pelo software SAP 2000. Convém lembrar que este software trabalha com algoritmo mais refinado do que o P- Δ clássico, pois leva em consideração, na matriz de rigidez das barras comprimidas, a deformação por flexão ocasionada pelos momentos ao longo de seu eixo, assumindo para suas linhas elásticas curvas do 3º grau [26] (as curvas reais são funções trigonométricas), o que leva a uma precisão superior àquela que se obteria considerando para as barras a formulação proposta pela NBR-8800 [17].

3.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE ESTRUTURAL

Os modelos de análises mais precisos são aqueles que consideram a estrutura como tridimensional, com a suposição das lajes como diafragmas rígidos (sem

deformação em seus próprios planos) e que fazem a compatibilização de todos os deslocamentos da estrutura [30]. A análise da estrutura pode ser realizada em regime elástico ou plástico, sendo que no segundo caso algumas limitações são impostas pela NBR-8800 [17]. No presente estudo optou-se por realizar a análise estrutural tridimensional em regime elástico.

O item 4.9.2.1 da NBR-8800 [17] permite que o comprimento de flambagem dos pilares seja tomado como sendo igual à distância entre linha de centro das vigas ($K = 1$), para as estruturas cuja estabilidade lateral seja garantida por sistema adequado de contraventamento, como por exemplo, os contraventamentos treliçados. Para tanto, o anexo H desta mesma norma exige que o sistema de contraventamento seja dimensionado para resistir não somente ao carregamento aplicado, mas, também, aos efeitos de segunda ordem. Admite-se ainda que sejam tomados valores de K inferiores à unidade, desde que demonstrados através da análise da estrutura.

A consideração dos efeitos de segunda ordem na análise elástica de sistemas resistentes a cargas horizontais sujeitos aos carregamentos reais, não é suficiente para que se considere o comprimento de flambagem dos pilares como sendo igual a distância entre as linhas de centro das vigas, devendo neste caso incluir os efeitos decorrentes da imperfeição da estrutura [9].

Pelo fato da NBR-8800 permitir valores de K até mesmo inferiores à unidade, sem levar em consideração a superposição dos efeitos devidos às imperfeições geométricas com os carregamentos reais, além de não limitar a relação entre as respostas de segunda e de primeira ordem, faz com que seja sugerida uma revisão em seu texto [18]. O Canadian Institute of Steel Construction, diferentemente da NBR-8800 [17], estabelece que a relação entre as respostas de segunda e de primeira ordem não deve ultrapassar 1.4, a menos que se demonstre que as tensões normais de cálculo nas barras, levando-se em conta as tensões residuais, são inferiores à tensão de escoamento [18].

3.7. RECOMENDAÇÕES QUANTO AO COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA

Quanto aos limites impostos ao comportamento da estrutura, como, por exemplo, as deformações e acelerações, foram adotadas as recomendações constantes na NBR-8800 [17], utilizando-se combinações de ações nominais.

Os limites de deformações laterais da estrutura e os movimentos horizontais relativos entre pisos, devidos à ação nominal do vento, de acordo com a Norma brasileira [17], não podem provocar colisão com estruturas adjacentes, nem ultrapassar os seguintes valores:

Quadro III.9 - Valores máximos recomendados para deslocamentos

DESLOCAMENTOS VERTICAIS	Sobrecarga	Barras biapoiadas de pisos e coberturas, sujeitos à fissuração.	1/360 do vão
	Sobrecarga	Idem, não sujeitos à fissuração.	1/300 do vão
DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS	Vento	Deslocamento horizontal do edifício, relativo à base	1/400 da altura do edifício
	Vento	Deslocamento horizontal entre dois pisos consecutivos, quando fachadas ou divisórias não absorverem as deformações da estrutura.	1/500 da altura do andar
	Vento	Idem, quando absorverem.	1/400 da altura do andar

A NBR-8800 [17] não apresenta recomendações muito detalhadas acerca do conforto humano quanto às ações devidas ao vento. Em seu Anexo O, esta Norma explica que a principal fonte de desconforto é a aceleração lateral, embora o ruído e os efeitos visuais possam também causar preocupação, no entanto, não esta não contempla nenhum método de análise para se determinar a aceleração lateral, indicando quatro referências bibliográficas para o cálculo aproximado.

Em nosso caso foi obtida através da análise estrutural as frequências das estruturas, e através da equação III.1 proposta pela NBR-6123, pode ser calculada a amplitude máxima da aceleração do movimento. Cumpre acrescentar que para o cálculo das frequências das estruturas se fez necessário discretizar toda a massa existente na estrutura, exceto as massas das vigas pilares e contraventamentos já computadas automaticamente pelo software.

CAPÍTULO - IV

4.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS QUANTO AOS DIFERENTES TIPOS DE CONTRAVENTAMENTO

4.1.1. DESLOCAMENTOS LATERAIS

A relação entre o deslocamento máximo no topo da estrutura e a sua altura é um dos parâmetros mais utilizados na engenharia estrutural, a fim de se avaliar a rigidez lateral de uma edificação. Embora a análise isolada dos deslocamentos laterais não seja suficiente para garantir a integridade do edifício em condições de utilização, a limitação destes deslocamentos é, sem dúvida alguma, um importante parâmetro na avaliação do comportamento à flexão da estrutura. Assim como as normas técnicas de outros países, a NBR-8800 [17] limita o deslocamento horizontal do edifício relativo à sua base em 1/400 da sua altura. Esta mesma Norma limita também o deslocamento relativo entre pisos consecutivos da edificação em 1/500 da altura do andar. Cumpre observar que a NBR-8800 [17] não fala em deslocamento no topo, mas de deslocamento horizontal relativo à base da estrutura, ou seja, nenhum nível da estrutura pode apresentar deslocamentos horizontais relativos à base superiores a 1/400 da altura.

Os valores dos deslocamentos obtidos para as estruturas com diferentes tipos de contraventamento treliçado (figura III.4), são apresentados no apêndice 3 (quadros IV.1 a IV.10). Cumpre acrescentar que estes deslocamentos são oriundos da combinação de carregamento C_6 ($C_6 = P_p + V + 0,65.S_C$), pois as restrições impostas ao comportamento da estrutura no que diz respeito às deformações e acelerações de acordo com a NBR-8800 devem ser verificadas utilizando-se combinações de ações nominais associadas ao tipo de resposta pesquisada.

4.1.1.1. Deslocamentos laterais da estrutura com contraventamento em "X"

A estrutura com sistema de contraventamento formado por diagonais em "X" apresentou os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.1 e IV.2):

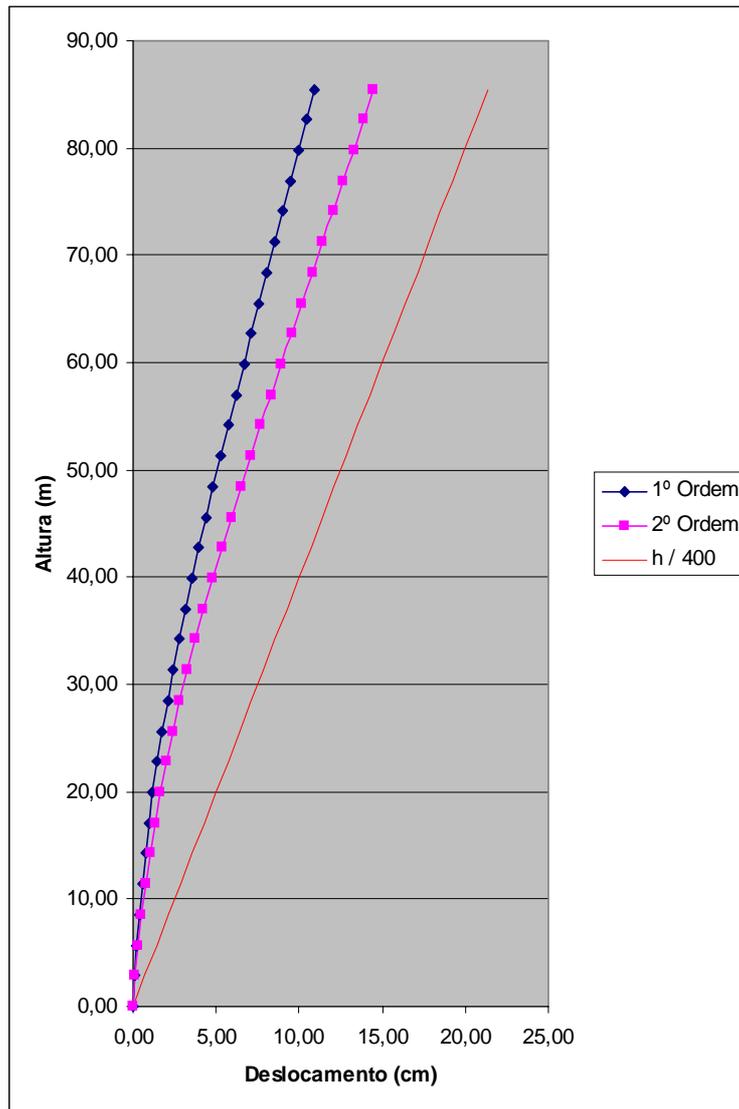


Figura IV.1 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura com 30 pavimentos e contraventamento em "X"

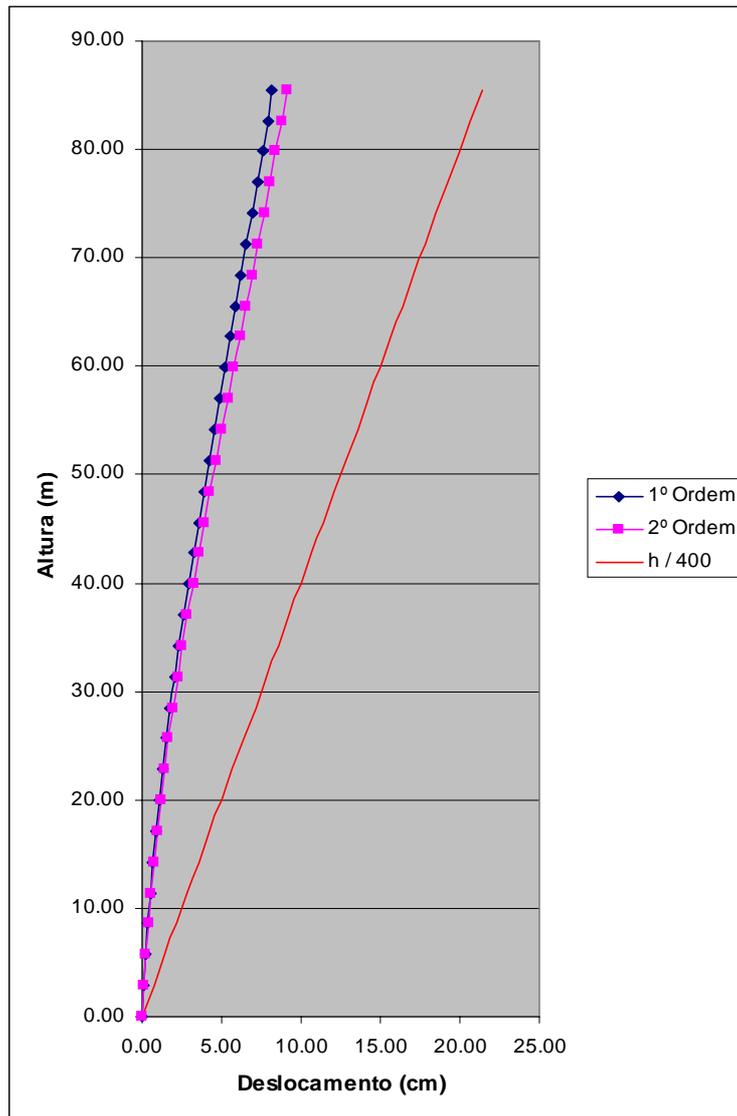


Figura IV.2 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura com 30 pavimentos e contraventamento em "X"

4.1.1.2. Deslocamentos laterais da estrutura com contraventamento em "V"

Para a estrutura com contraventamento formado por diagonais em "V", os deslocamentos obtidos estão apresentados nas figuras IV.3 e IV.4.

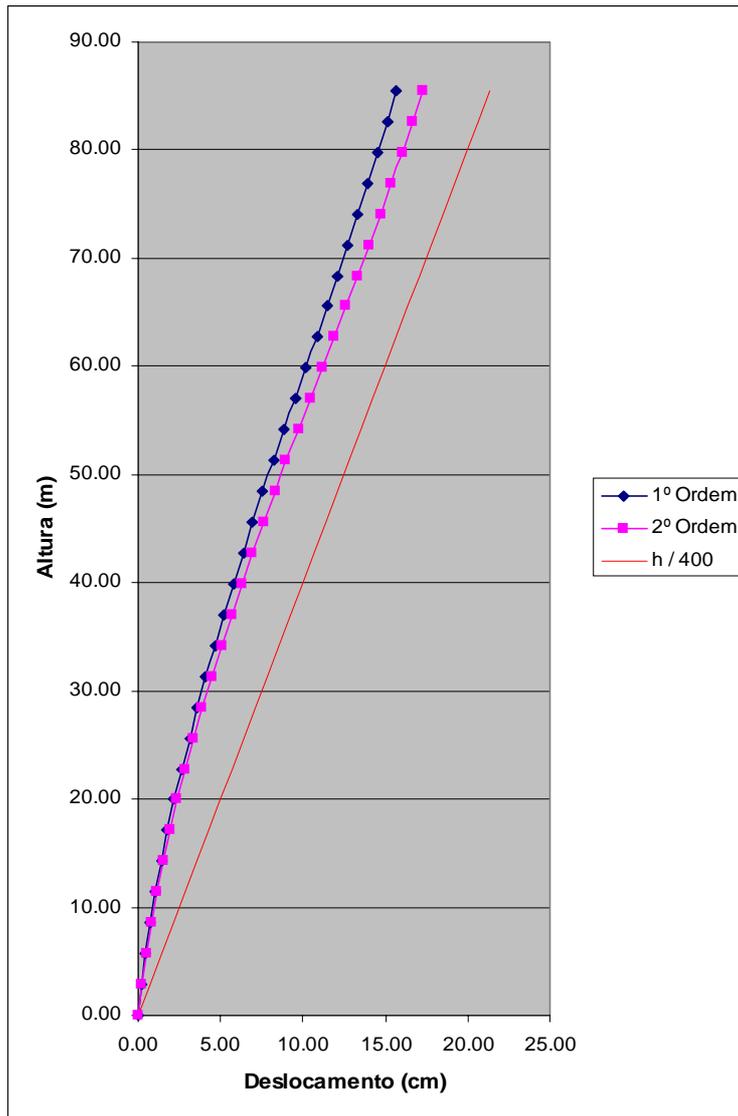


Figura IV.3 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura com 30 pavimentos e contraventamento em "V"

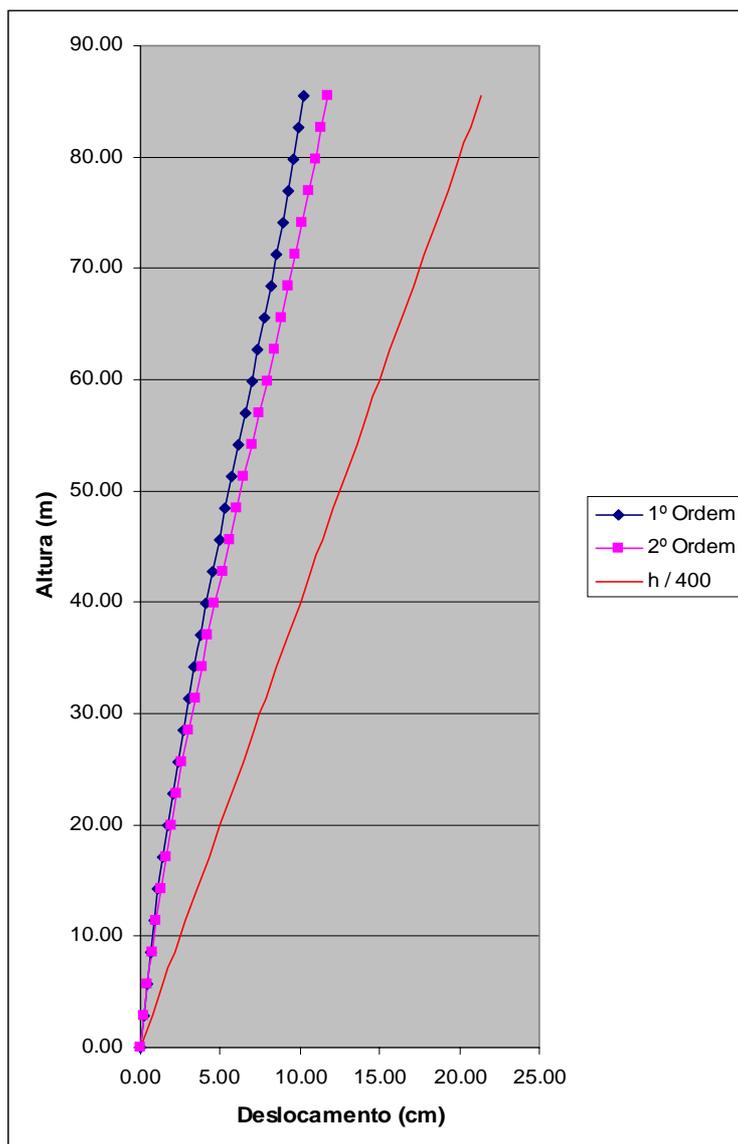


Figura IV.4 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura com 30 pavimentos e contraventamento em "V"

4.1.1.3. Deslocamentos laterais da estrutura com contraventamento em "V" invertido

Os deslocamentos laterais da estrutura contraventada com diagonais em "V" invertido estão apresentados nas figuras IV.5 e IV.6.

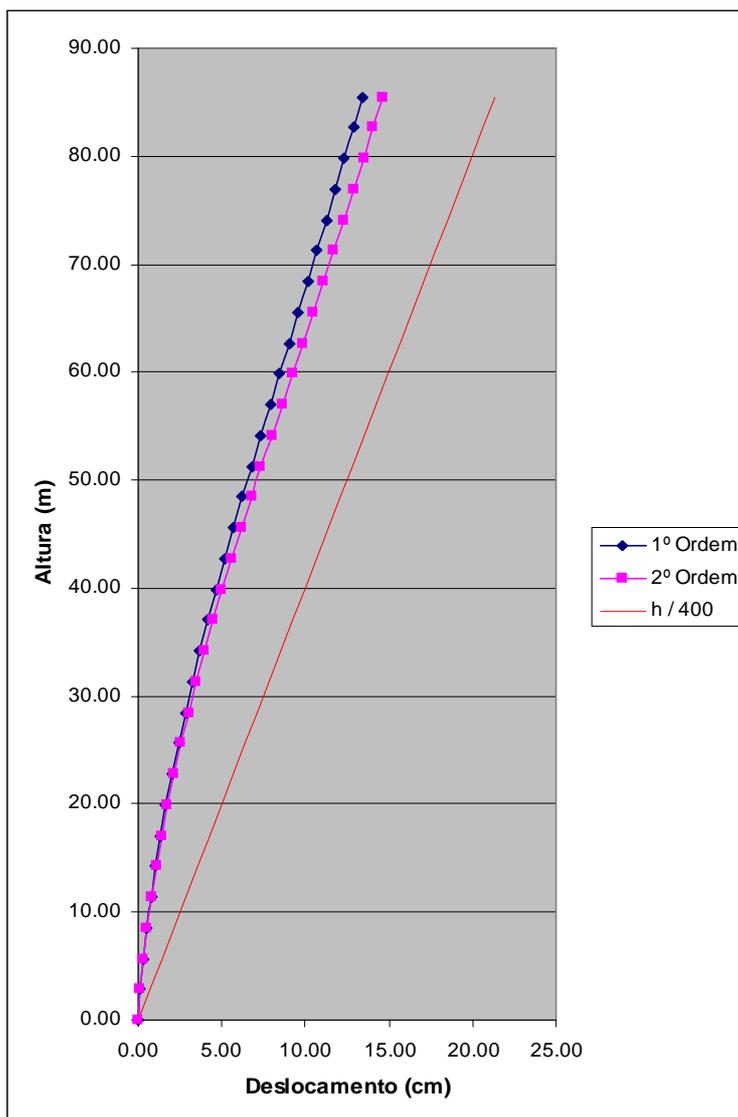


Figura IV.5 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura com 30 pavimentos e contraventamento em "V" invertido

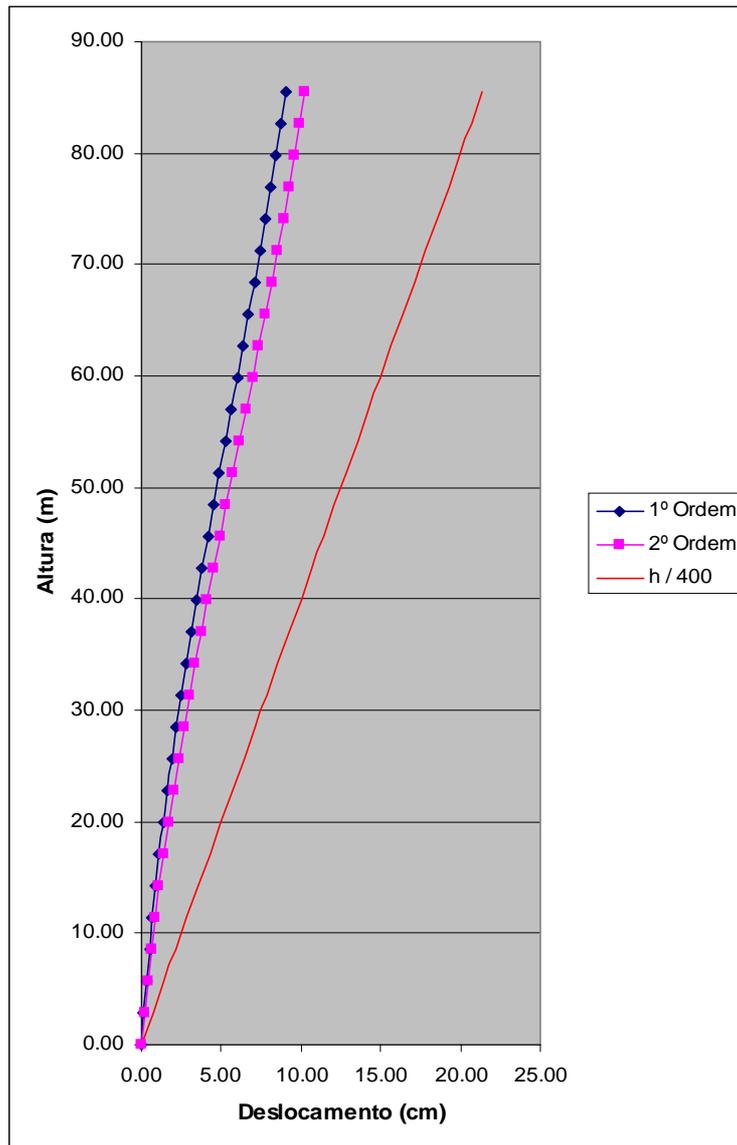


Figura IV.6 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura com 30 pavimentos e contraventamento em "V" invertido

4.1.1.4. Deslocamentos laterais da estrutura com contraventamento formado por diagonais no mesmo sentido

Os deslocamentos laterais obtidos para a estrutura contraventada com diagonais no mesmo sentido estão mostrados nas figuras IV.7 e IV.8.

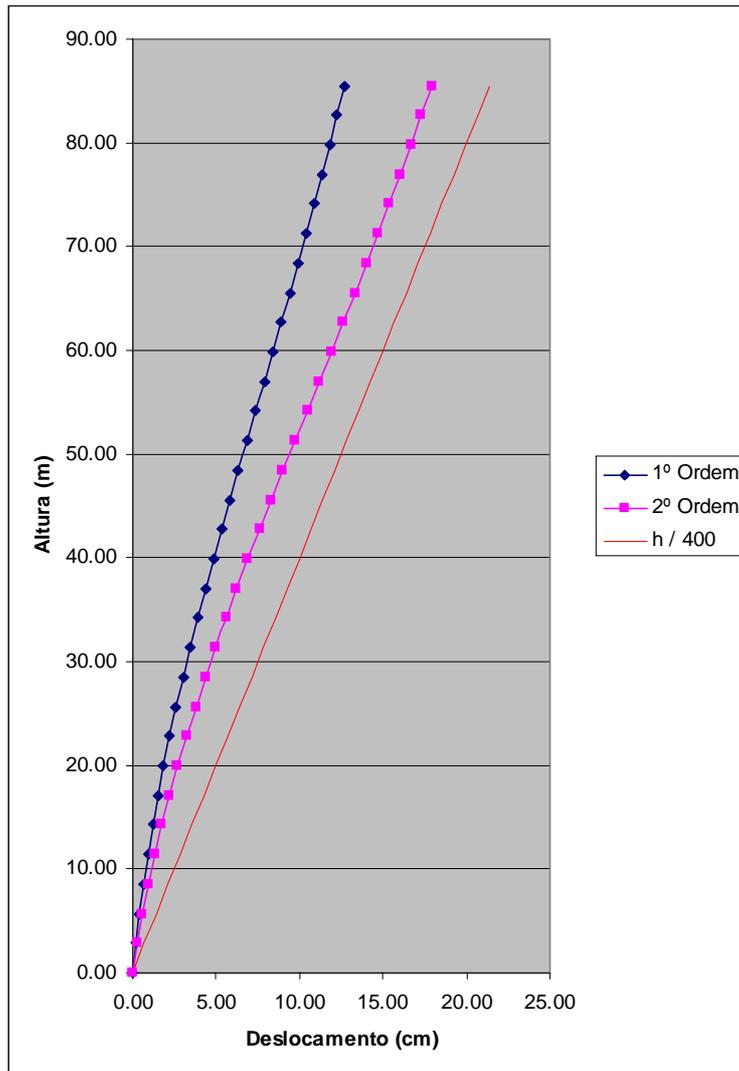


Figura IV.7 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura com 30 pavimentos contraventada com diagonais no mesmo sentido

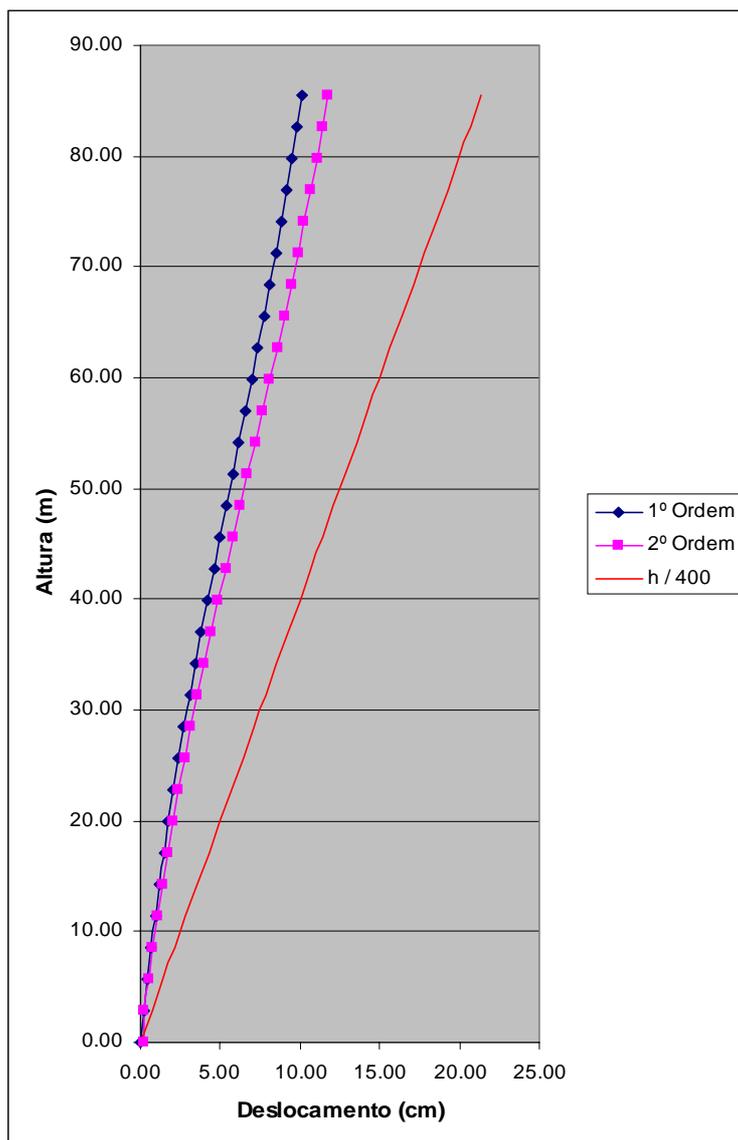


Figura IV.8 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura com 30 pavimentos contraventada com diagonais no mesmo sentido

4.1.1.5. Contraventamento com diagonais alternadas

A estrutura contraventada com diagonais em sentidos contrários obteve os seguintes deslocamentos laterais (figuras IV.9 e IV.10)

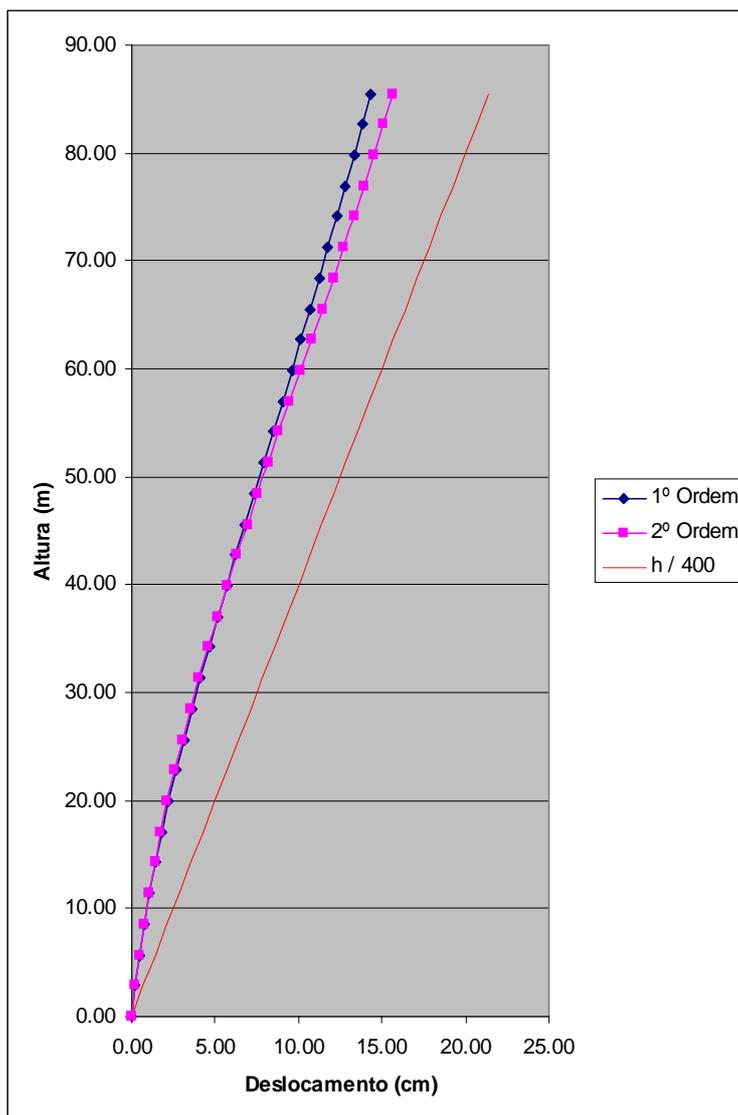


Figura IV.9 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura com 30 pavimentos contraventada com diagonais em sentido contrário

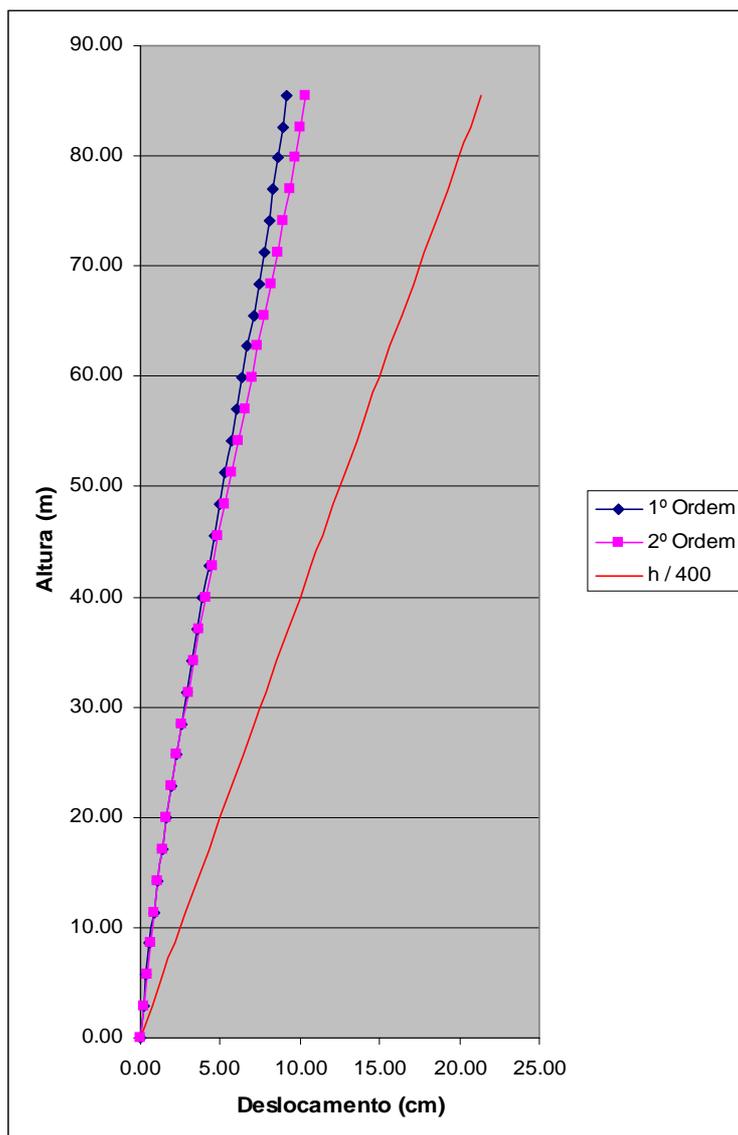


Figura IV.10 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura com 30 pavimentos contraventada com diagonais em sentido contrário

4.1.1.6. Análise comparativa dos deslocamentos para os diferentes tipos de contraventamentos

Nas figuras IV.11 e IV.12 pode-se observar o comportamento quanto aos deslocamentos laterais das estruturas utilizando os cinco diferentes tipos de contraventamentos treliçados.

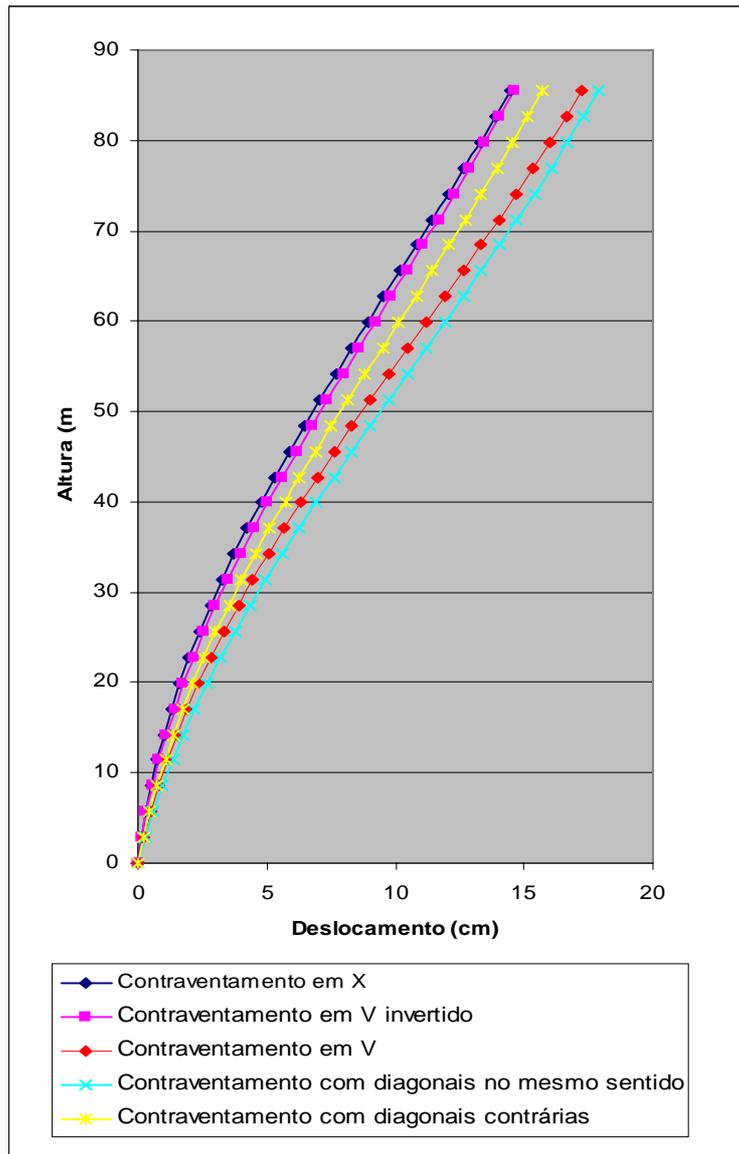


Figura IV.11 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para os diferentes tipos de contraventamento

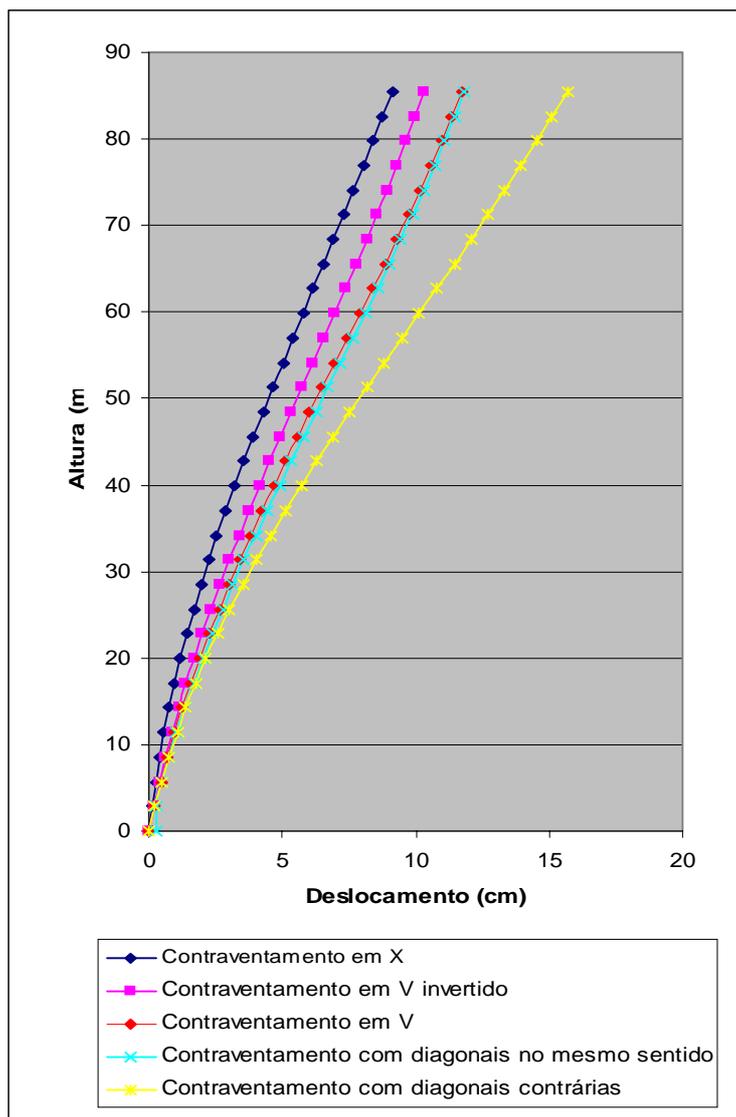


Figura IV.12 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para os diferentes tipos de contraventamento

O quadro IV.1 a seguir, mostra a relação entre o deslocamento máximo “d” no topo da estrutura e a altura “H” da edificação. Nos quadros VI.1 a VI.10 constantes no apêndice 3 estão apresentados os deslocamentos em cada pavimento da estrutura bem como os deslocamentos relativos entre pavimentos.

Quadro IV.1 - Relação entre o deslocamento no topo e a altura da edificação

	TIPO DO CONTRAVENTAMENTO				
	X	V	V Invertido	Diagonais no mesmo sentido	Diagonais em sentido contrário
d / H	1/589	1/495	1/584	1/477	1/545

As ampliações para os deslocamentos, definidos aqui como a relação entre os deslocamentos obtidos de uma análise não linear geométrica e os deslocamentos obtidos de uma análise linear foram as seguintes:

Quadro IV.2 - Amplificações de deslocamentos na direção Y

TIPO DO CONTRAVENTAMENTO				
X	V	V Invertido	Diagonais no mesmo sentido	Diagonais em sentido contrário
1,333	1,102	1,093	1,413	1,098

Com o auxílio dos gráficos das figuras IV.11 e IV.12 podemos perceber que os sistemas de contraventamento formados por treliças apresentam uma deformada bastante semelhante à deformada de uma viga em balanço, com deslocamentos mais significativos próximo ao topo. Observamos também que, dentre os cinco tipos de contraventamentos treliçados utilizados, o contraventamento com diagonais em “X” é o que apresenta melhor restrição aos deslocamentos laterais da estrutura, enquanto que o contraventamento com diagonais dispostas no mesmo sentido é o que pior se comporta em termos de deslocamentos laterais.

Muito embora todas as estruturas tenham atendido o limite de $H/400$ para o deslocamento horizontal relativo à base, nenhuma das estruturas atendeu a limitação de $h/500$, imposta pela NBR-8800, para o deslocamento relativo entre pisos consecutivos (quadros VI.1 a VI.5). Cumpre acrescentar que esta Norma permite que o deslocamento entre pisos seja de até $h/400$, nos casos em que as fachadas e divisórias sejam capazes de absorver as deformações da estrutura, limite este atendido por todas as estruturas.

Muito embora todas as estruturas tenham apresentado deslocamentos relativos à base inferiores ao preconizado pela NBR-8800, nota-se que foi utilizada uma considerável quantidade de contraventamentos na edificação, apontando para a pouca rigidez das treliças empregadas. Esta pouca rigidez lateral pode ser explicada pela esbelteza bastante elevada dos treliçamentos os quais apresentam uma relação altura/largura superior a 10.

Outra interessante constatação é que a estrutura com contraventamento formado por diagonais no mesmo sentido é a que apresenta maiores relações entre os

deslocamentos de primeira e segunda ordem. Este fato pode ser explicado pela predisposição que este tipo de estrutura apresenta: a de se deformar lateralmente sob a atuação de cargas gravitacionais. A deformação lateral devido às cargas gravitacionais é ocasionada quando do encurtamento dos pilares da estrutura, que ocasiona a compressão das diagonais de contraventamento, as quais reagem com uma componente horizontal deslocando a estrutura de seu eixo vertical (figura IV.13). Este fenômeno é acentuado quando do encurtamento dos pilares devido aos esforços de vento.

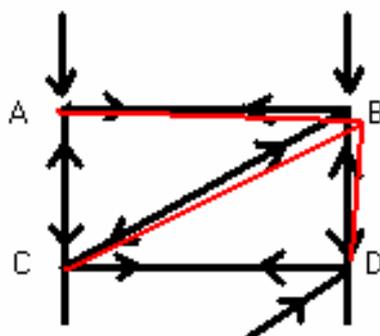


Figura IV. 13 - Comportamento dos contraventamentos com diagonais no mesmo sentido

4.1.2. VERIFICAÇÃO DO CONFORTO HUMANO PARA OS DIFERENTES TIPOS DE CONTRAVENTAMENTO

Através da análise dinâmica da estrutura obtivemos as seguintes frequências naturais correspondentes à translação segundo os eixos X e Y respectivamente:

Quadro IV.3 - Frequência natural da estrutura segundo translação nos eixos X e Y

	TIPO DO CONTRAVENTAMENTO				
	X	V	V Invertido	Diagonais no mesmo sentido	Diagonais em sentido contrário
f_1 (Hz)	0,2096	0,1914	0,2089	0,1998	0,2002
f_2 (Hz)	0,1901	0,1672	0,1821	0,1748	0,1755

Os deslocamentos laterais da estrutura, obtidos para as forças devidas ao vento utilizando um período de recorrência de 10 anos, foram os seguintes:

Quadro IV.4 -Deslocamento da estrutura na direção dos eixos X e Y

	TIPO DO CONTRAVENTAMENTO				
	X	V	V Invertido	Diagonais no mesmo sentido	Diagonais em sentido contrário
Deslocamento em X (cm)	4,77	5,13	5,01	5,69	5,61
Deslocamento em Y(cm)	5,81	7,88	7,35	7,92	8,41

De posse dos valores da frequência natural das estruturas e dos seus respectivos deslocamentos, foi possível, com o auxílio da equação III.1, fornecida pela NBR-8800, calcular a amplitude máxima da aceleração.

Quadro IV.5 - Amplitude máxima da aceleração

	TIPO DO CONTRAVENTAMENTO				
	X	V	V Invertido	Diagonais no mesmo sentido	Diagonais em sentido contrário
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0826	0,0741	0,0862	0,0895	0,0786
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,0828	0,0868	0,0961	0,0846	0,0906

Pode-se observar que todas as estruturas analisadas atenderam o critério de conforto humano estabelecido pela NBR-8800, que preconiza uma amplitude máxima da aceleração de $0,1 m/s^2$. As cinco estruturas enquadraram-se dentro do limite de 0,5% a 1,5% da aceleração da gravidade, o que corresponde a um movimento perceptível.

4.1.3. CONSUMO DE AÇO

Os perfis obtidos para as estruturas em questão estão relacionados no quadro IV.6 abaixo.

Quadro IV.6 - Perfis utilizados

	TIPO DO CONTRAVENTAMENTO				
	X	V	V Invertido	Diagonais no mesmo sentido	Diagonais em sentido contrário
Colunas - 1	CS 550x495	CS 550x495	CS 550x495	CS 600x541	CS 600x541
Colunas - 2	CS 550x290	CS 550x345	CS 550x290	CS 600x305	CS 600x305
Colunas - 3	CS 550x228	CS 550x228	CS 550x228	CS 600x250	CS 600x250
Colunas - 4	CS 550x228	CS 550x228	CS 550x228	CS 600x250	CS 600x250
Colunas - 5	CS 550x228	CS 550x228	CS 550x228	CS 600x250	CS 600x250
Contraventamento - 1	HP 250x62	W 200x35	W 200x46	W 250x73	W 250x73
Contraventamento - 2	HP 250x62	W 150x29	W 200x46	W 250x73	W 250x73
Contraventamento - 3	HP 250x62	W 150x29	W 200x46	W 250x73	W 250x73
Contraventamento - 4	HP 250x62	W 150x22	W 200x46	HP 250x62	HP 250x62
Contraventamento - 5	W 200x46	W 150x22	W 200x46	HP 250x62	HP 250x62
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75	VS 550X75	VS 550X75	VS 550X75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51	VS 450X51	VS 450X51	VS 450X51

O consumo de aço total e por elemento estrutural estão apresentados nos quadros IV.7 e IV.8. A figura IV.14 fornece um comparativo entre o consumo de aço para os contraventamentos analisados.

Quadro IV.7 - Consumo de aço por elemento

	TIPO DO CONTRAVENTAMENTO				
	X	V	V Invertido	Diagonais no mesmo sentido	Diagonais em sentido contrário
Colunas	576,33	597,58	576,33	625,20	625,20
Contraventamento	303,53	84,06	137,56	179,60	179,60
Vigas	696,20	696,20	692,20	696,20	696,20
Consumo total de aço (Ton)	1565,37	1377,84	1406,09	1501,00	1501,00

Quadro IV.8 - Consumo de aço por metro quadrado

	TIPO DO CONTRAVENTAMENTO				
	X	V	V Invertido	Diagonais no mesmo sentido	Diagonais em sentido contrário
Consumo de aço (kg/m ²)	59,90	53,13	54,40	57,91	57,91

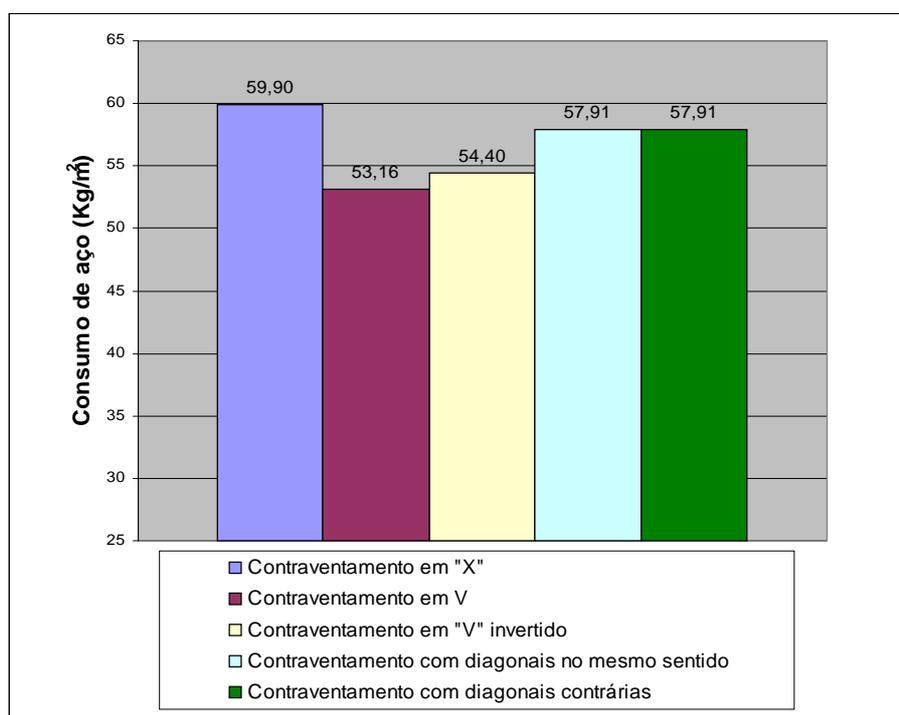


Figura IV.14 - Consumo de aço por metro quadrado para os diferentes tipos de contraventamento

De posse dos valores acima apresentados observa-se que o contraventamento em “X” é aquele que apresenta o maior consumo de aço estrutural. Este alto consumo, como se verifica através do quadro IV.8, é devido principalmente à grande quantidade de aço consumida pelas diagonais de contraventamento; o que se pode explicar pelo fato destes contraventamentos atraírem significativa parcela dos esforços gravitacionais quando do encurtamento das colunas. A absorção, por parte do contraventamento em “X”, de parte dos esforços das colunas pode ser constatado pelo baixo consumo de aço dos pilares, comparado com os outros tipos de contraventamento (quadro IV.7). Além do alto consumo de aço dos contraventamentos em “X” estes apresentam ainda o agravante de possuir um maior gasto com ligações. Os contraventamentos que possuem

seus extremos conectados em vigas relativamente flexíveis verticalmente, como, por exemplo, os contraventamentos em “V” e “V” invertido, foram os que apresentaram os mais baixos consumos de aço, por não atraírem significativa parcela de esforços oriundos do encurtamento dos pilares. Em especial, o contraventamento em “V”, apresenta uma vantagem em relação ao “V” invertido, por ter sua diagonais solicitadas inicialmente à tração devido à reação das vigas de piso (figura IV.14), resultando em um alívio nos esforços de compressão gerados pela ações laterais (figura IV.15).

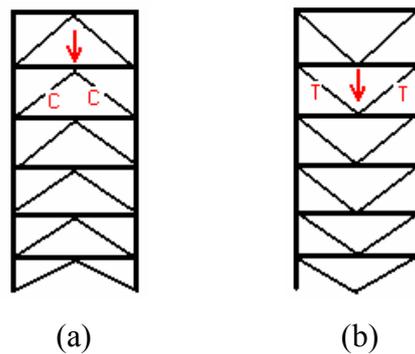


Figura IV.15 - Comportamento dos contraventamentos em “V” e “V” invertido

Os contraventamentos formados por diagonais simples apresentaram um consumo de aço um pouco inferior ao consumo do contraventamento em “X”. Observa-se que os pilares foram os elementos estruturais que contribuíram de forma mais significativa para o aumento deste consumo de aço na estrutura. O maior consumo de aço dos pilares pode ser explicado pelo fato das diagonais simples não absorverem de forma tão significativa os esforços gravitacionais devido ao encurtamento das colunas, aliado à maior suscetibilidade destes contraventamentos aos efeitos de segunda ordem.

Em geral as estruturas possuíram baixo consumo de aço estrutural, o que vem a comprovar que o uso de contraventamentos treliçados é uma boa opção como sistema estrutural de resistência a cargas laterais.

4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS QUANTO À CONTRIBUIÇÃO DA RIGIDEZ AXIAL DOS PILARES, VIGAS E DIAGONAIS, NOS DESLOCAMENTOS LATERAIS DA ESTRUTURA

Os deslocamentos laterais das estruturas com contraventamento treliçado estão diretamente relacionados com as deformações sofridas pelas suas barras. Dessa maneira,

foi possível quantificar qual a importância da rigidez axial dos elementos que compõem o sistema de contraventamento, nos deslocamentos laterais da estrutura.

4.2.1. INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ AXIAL DOS PILARES NOS DESLOCAMENTOS FINAIS DA ESTRUTURA

As figuras IV.16 e IV.17 apresentam os deslocamentos laterais da estrutura de 50 pavimentos para diferentes valores da rigidez axial dos pilares. O contraventamento utilizado como explicado no item 3.1.1.2 foi formado por uma única treliça em cada fachada da estrutura. Tabelas com os valores dos deslocamentos são apresentados no apêndice 3.

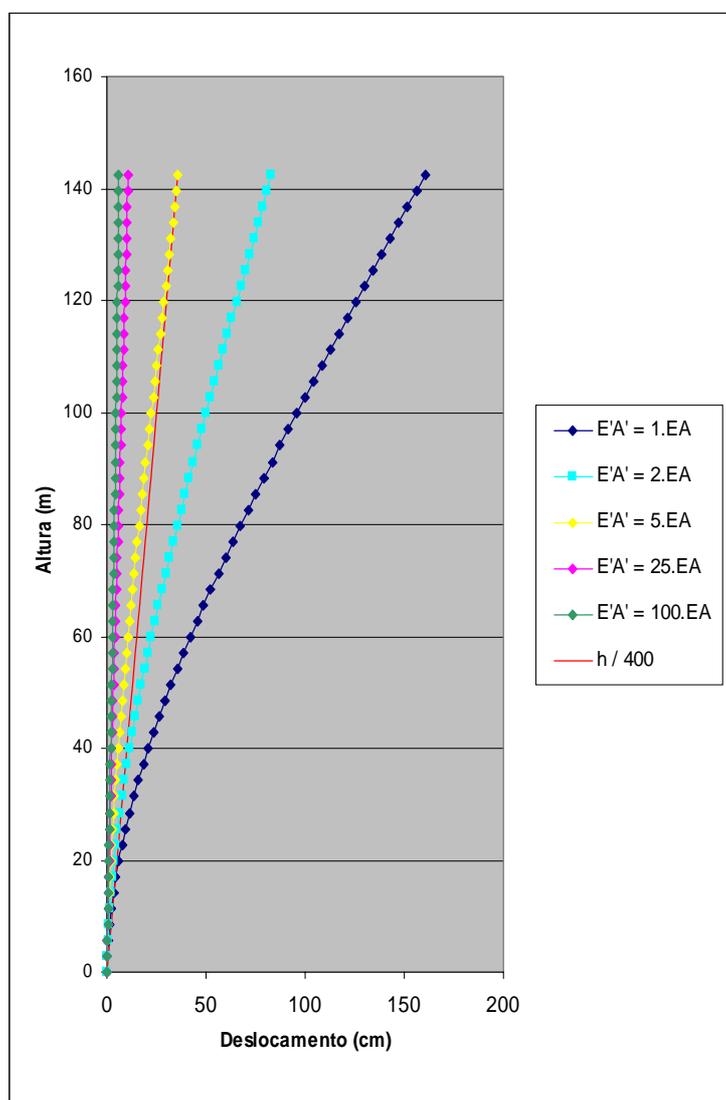


Figura IV.16 - Deslocamento lateral na direção "Y" x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial dos pilares

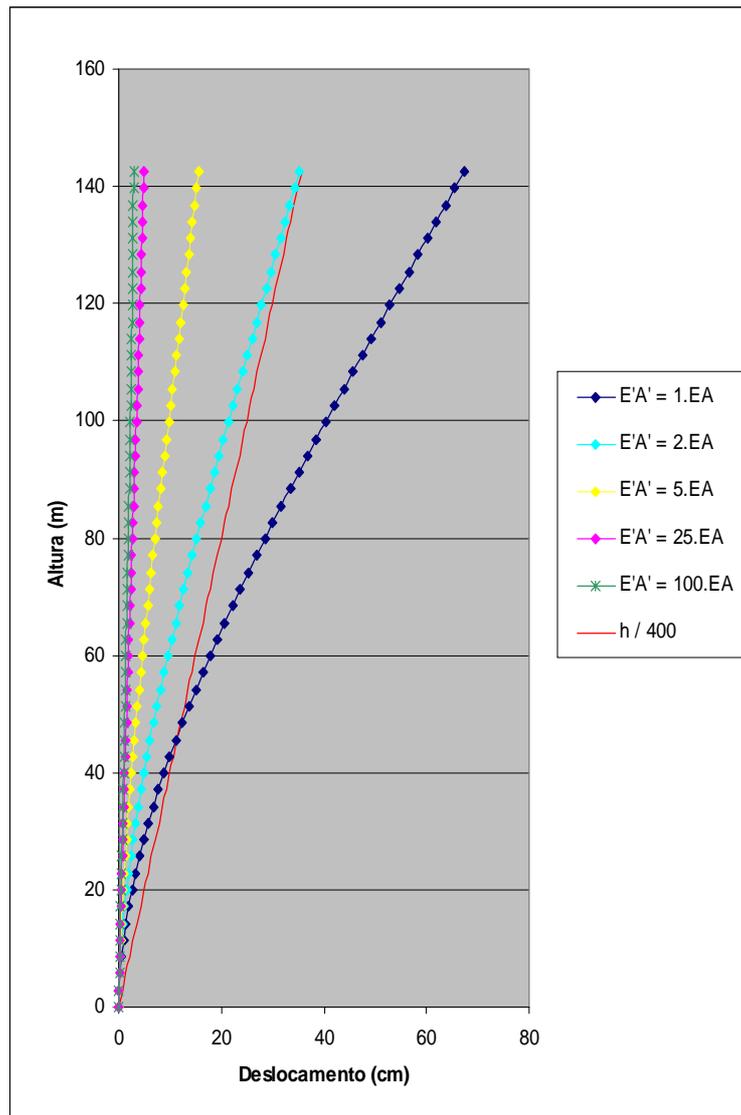


Figura IV.17 - Deslocamento lateral na direção “X” x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial dos pilares

4.2.2. INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ AXIAL DAS DIAGONAIS NOS DESLOCAMENTOS FINAIS DA ESTRUTURA

As figuras IV.18 e IV.19 apresentam os deslocamentos laterais da estrutura de 50 pavimentos para diferentes valores de rigidez axial das diagonais de contraventamento.

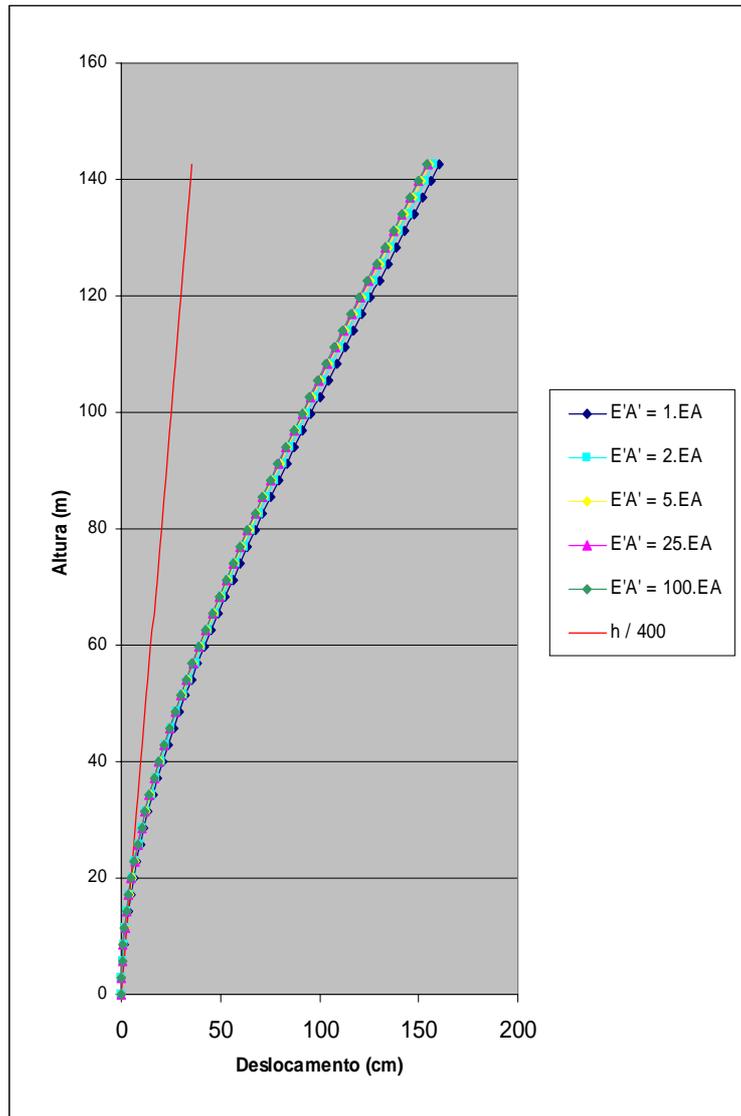


Figura IV.18 - Deslocamento lateral na direção “Y” x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial das diagonais

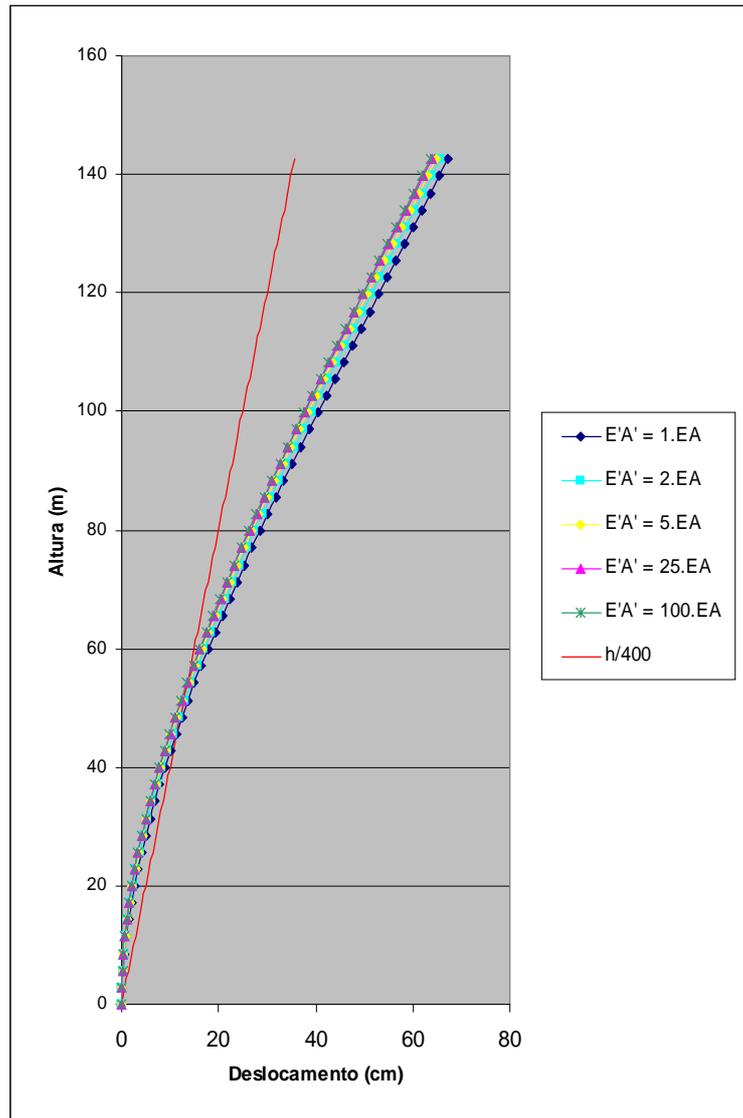


Figura IV.19 - Deslocamento lateral na direção “X” x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial das diagonais

4.2.3. INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ AXIAL DAS VIGAS NOS DESLOCAMENTOS FINAIS DA ESTRUTURA

As figuras IV.20 e IV.21 apresentam os deslocamentos laterais da estrutura de 50 pavimentos para diferentes valores de rigidez axial das vigas que fazem parte do sistema de contraventamento.

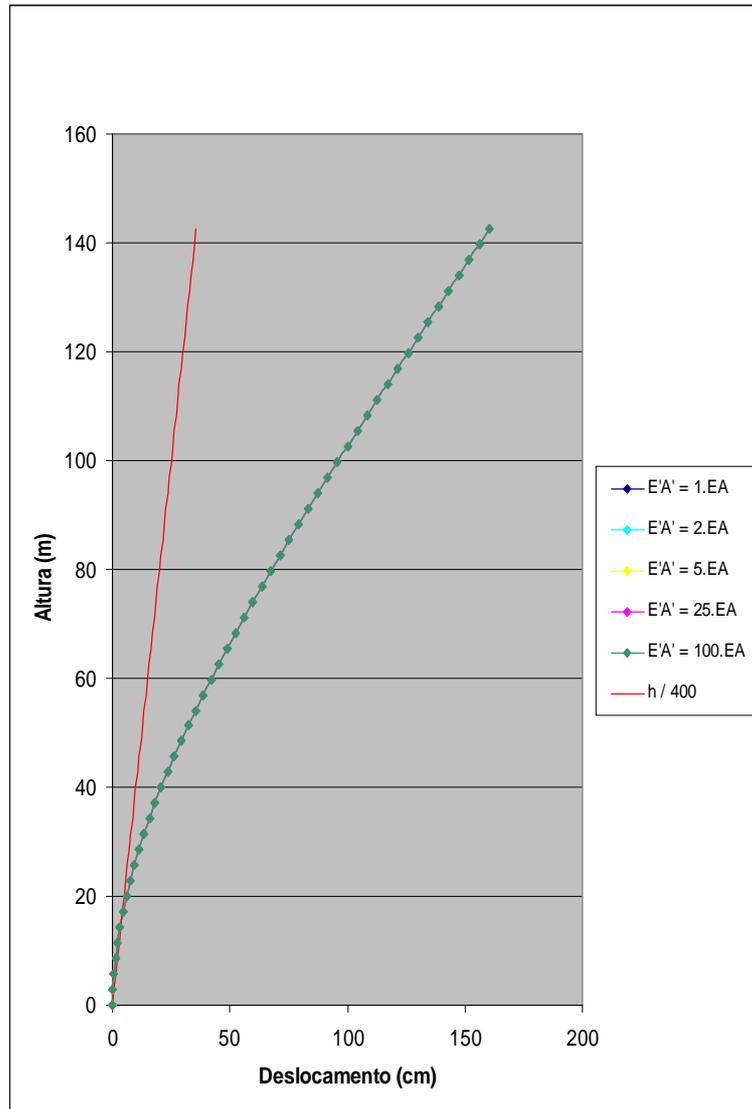


Figura IV.20 - Deslocamento lateral na direção "Y" x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial das vigas

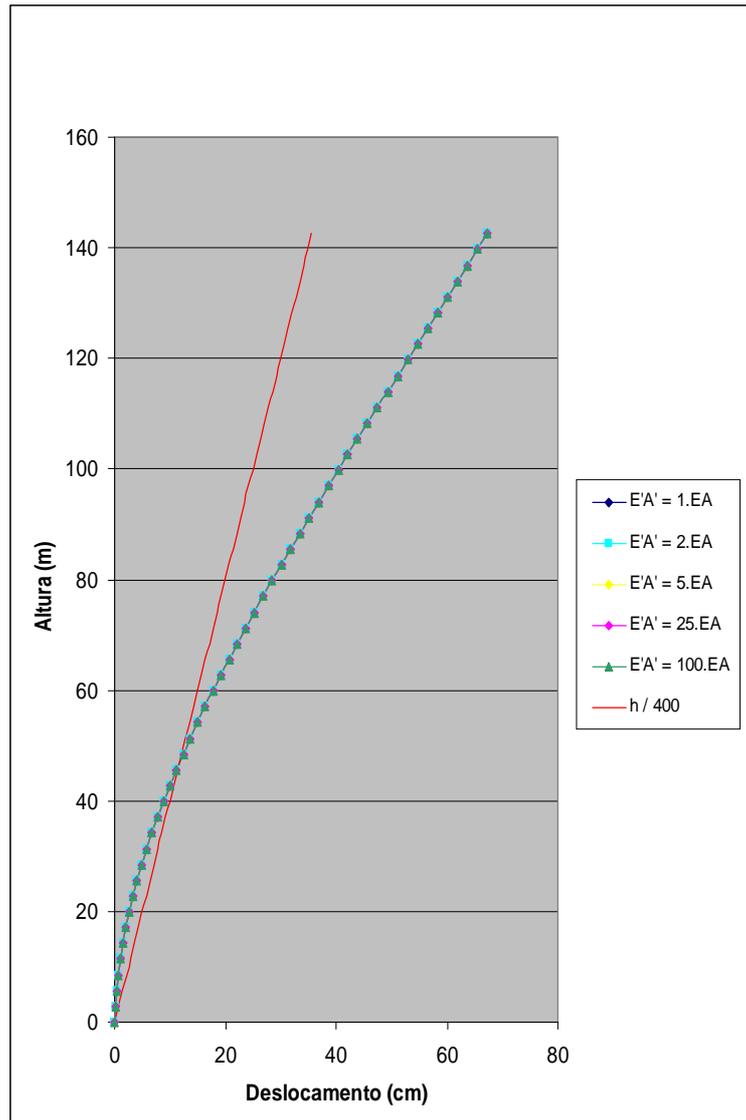


Figura IV.21 - Deslocamento lateral na direção “X” x Altura da edificação, para diferentes valores de rigidez axial das vigas

4.2.4. ANÁLISE DA CONTRIBUIÇÃO DOS PILARES, CONTRAVENTAMENTOS E VIGAS NOS DESLOCAMENTOS LATERAIS DA ESTRUTURA

As figuras IV.22 e IV.23 apresentam os deslocamentos laterais da estrutura de 50 pavimentos, bem como as contribuições de cada elemento estrutural nestes deslocamentos.

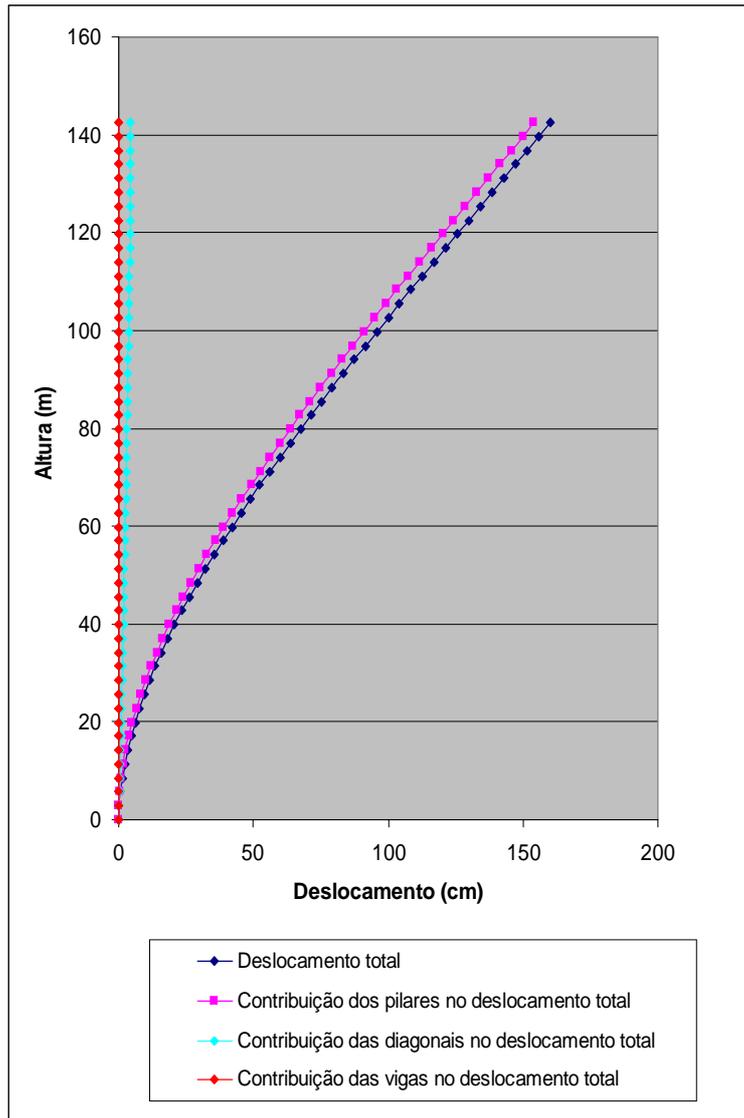


Figura IV.22 - Deslocamento lateral na direção “Y” devido aos pilares, vigas e diagonais x Altura da edificação

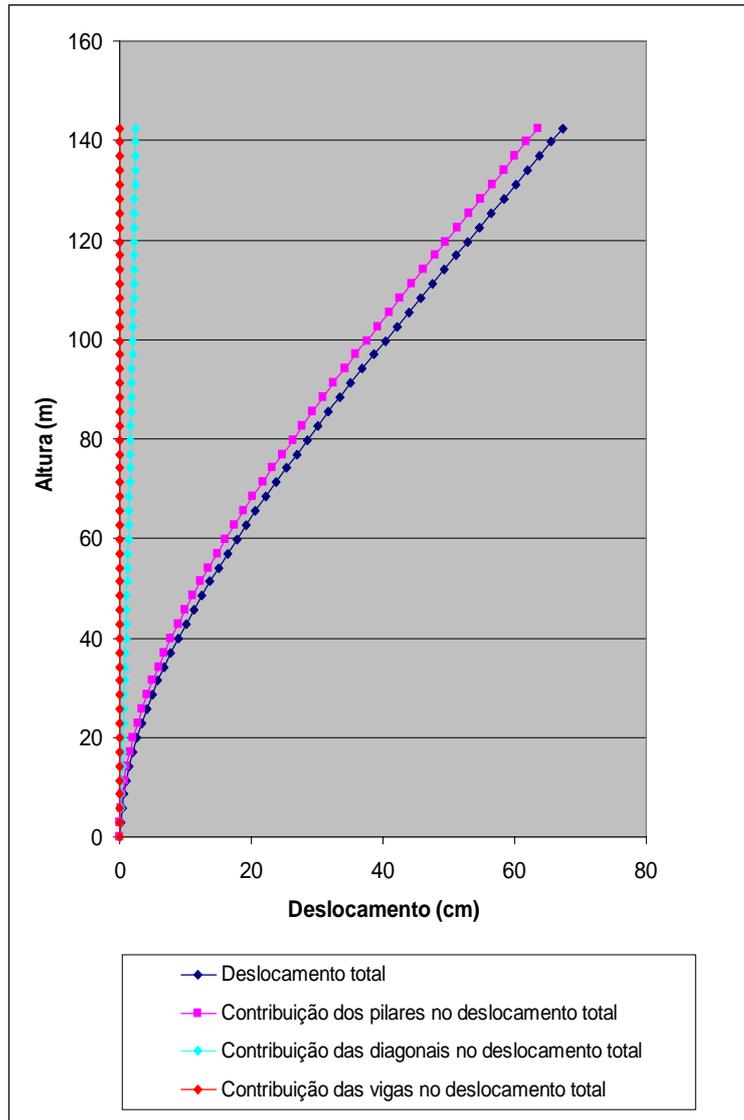


Figura IV.23 - Deslocamento lateral na direção “X” devido aos pilares, vigas e diagonais x Altura da edificação

Podemos observar que a rigidez axial dos pilares é responsável por cerca de 95% dos deslocamentos laterais da estrutura. De maneira inversa, a rigidez axial das diagonais e das vigas possui uma participação bastante pequena nos deslocamentos da estrutura. Vale salientar que, apesar da rigidez axial destes dois elementos apresentar uma pequena participação nos deslocamentos laterais da estrutura, a função destas barras é importantíssima, e a sua eliminação poderia ocasionar o colapso da estrutura.

Podemos perceber ainda, através das figuras IV.22 e IV.23, que a deformação axial das colunas causa na estrutura uma configuração típica de flexão, com concavidade da estrutura voltada para sotavento e deslocamento máximo no topo.

Mantendo-se as colunas indeformáveis axialmente, observa-se que a deformação axial das vigas e em especial das diagonais de contraventamento, dão origem a uma configuração típica de deformação por corte, com a concavidade da estrutura voltada para barlavento e deslocamentos relativos entre pavimentos mais acentuados próximos à base da estrutura.

Percebe-se ainda que, embora os pilares sejam responsáveis pela maior parcela dos deslocamentos laterais da estrutura, a tentativa de se contraventar uma estrutura através do incremento na rigidez axial dos pilares é uma tarefa pouco apropriada. O aumento na rigidez lateral da estrutura se mostra mais significativo para incrementos de até cinco vezes a rigidez axial dos pilares. Incrementos na rigidez axial dos pilares maiores que cinco vezes a rigidez axial inicial tornam-se pouco significativos, como se pode observar através da figura IV.24.

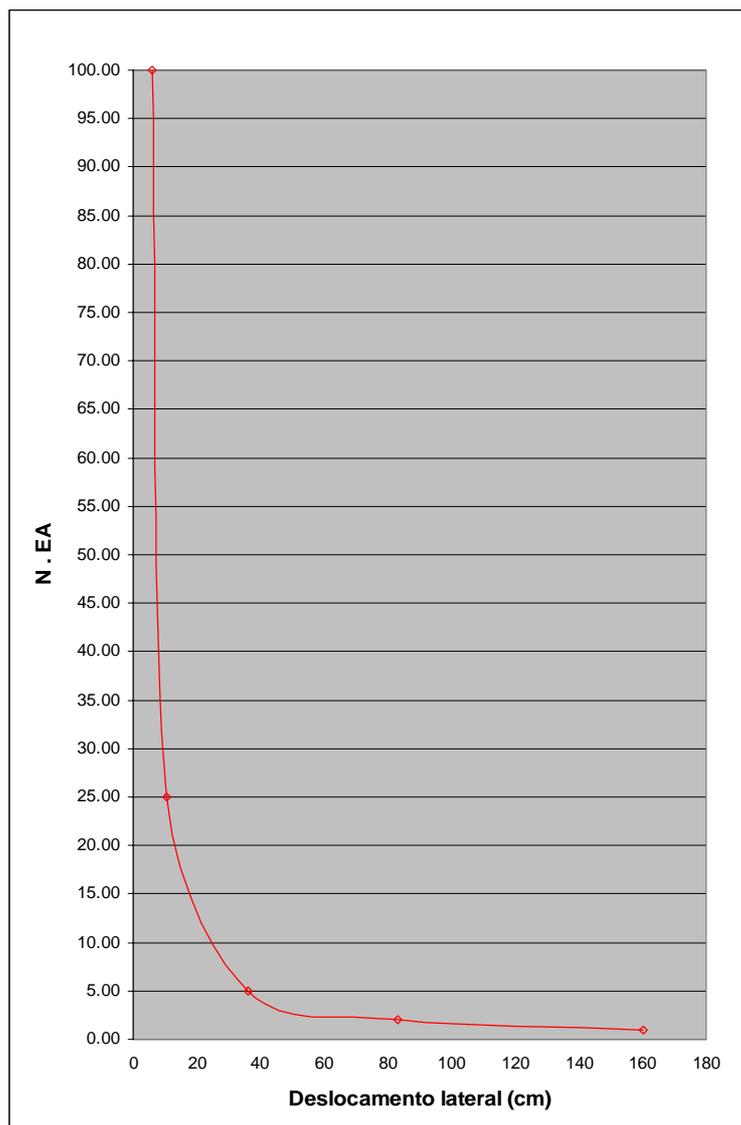


Figura IV.24 - Deslocamento lateral na direção “Y” x Rigidez axial dos pilares

4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS QUANTO AO POSICIONAMENTO DOS CONTRAVENTAMENTOS EM DIFERENTES VÃOS AO LONGO DA ALTURA DA EDIFICAÇÃO

Como explicado no capítulo III, foram analisadas três diferentes formas de posicionamento dos contraventamentos, ao longo da altura da edificação, a saber:

- Contraventamento posicionado em um único vão ao longo de toda a altura da edificação (figura III.6.a),
- Contraventamento posicionado em três vãos adjacentes ao longo da altura da edificação (figura III.6.b),
- Contraventamento posicionado em vãos adjacentes ao longo da altura (figura III.6.c).

Esta análise foi feita para as edificações com 30 e 50 pavimentos, e os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

4.3.1. DESLOCAMENTOS LATERAIS

Os deslocamentos laterais, obtidos para as edificações com 30 e 50 pavimentos utilizando os diferentes posicionamentos dos contraventamentos estão apresentados nas figuras IV.25 a IV.36. Os quadros VI.14 a VI.19 presentes no apêndice 3 fornecem os valores destes deslocamentos.

4.3.1.1. Contraventamento posicionado em um único vão ao longo de toda a altura da edificação

As estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por um treliçamento ao longo de um único vão da estrutura em toda a sua altura, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figuras IV.25 a IV.28):

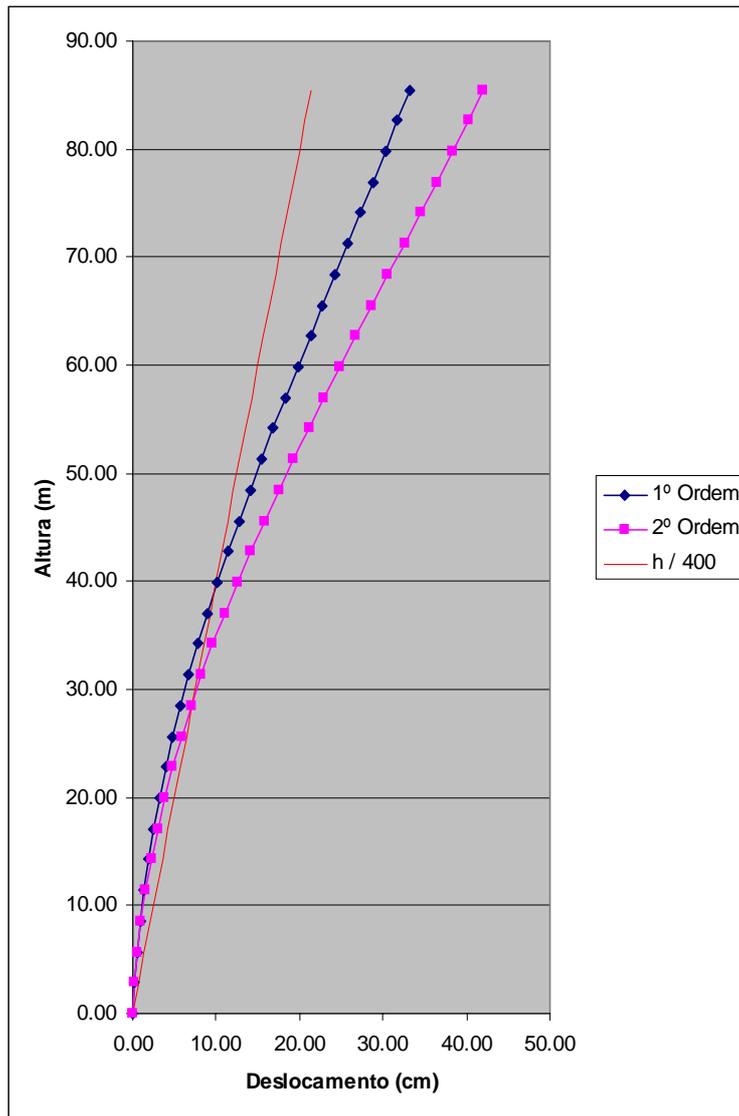


Figura IV.25 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão

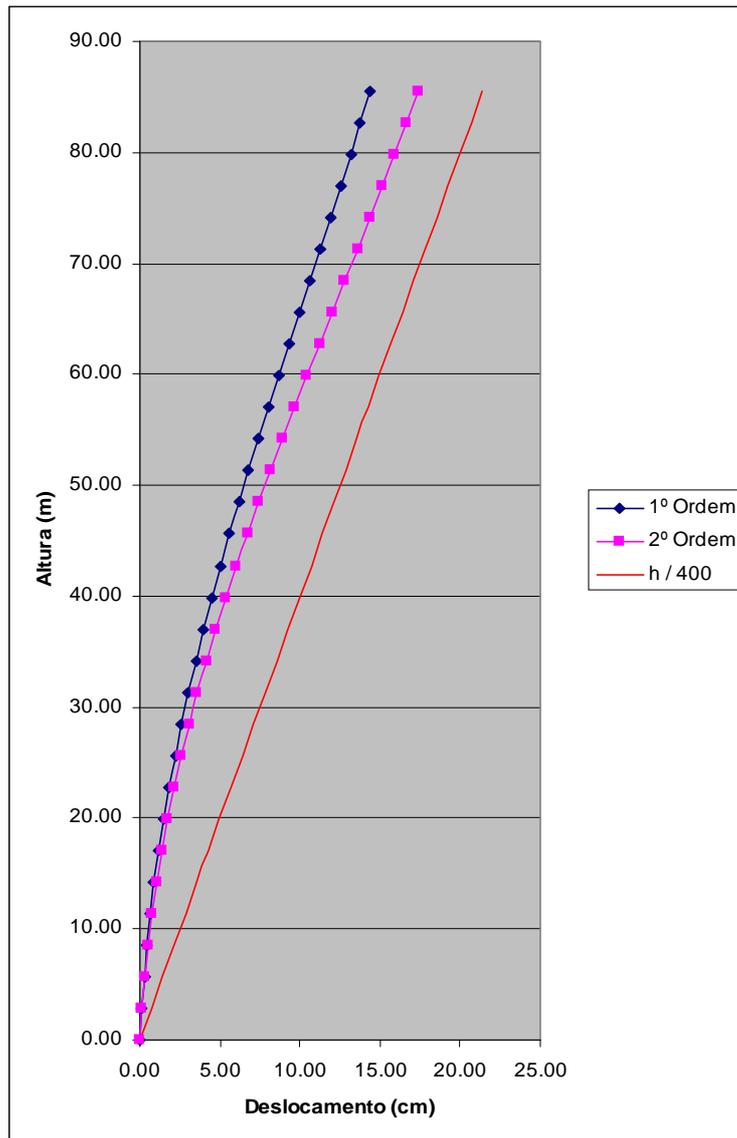


Figura IV.26 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão

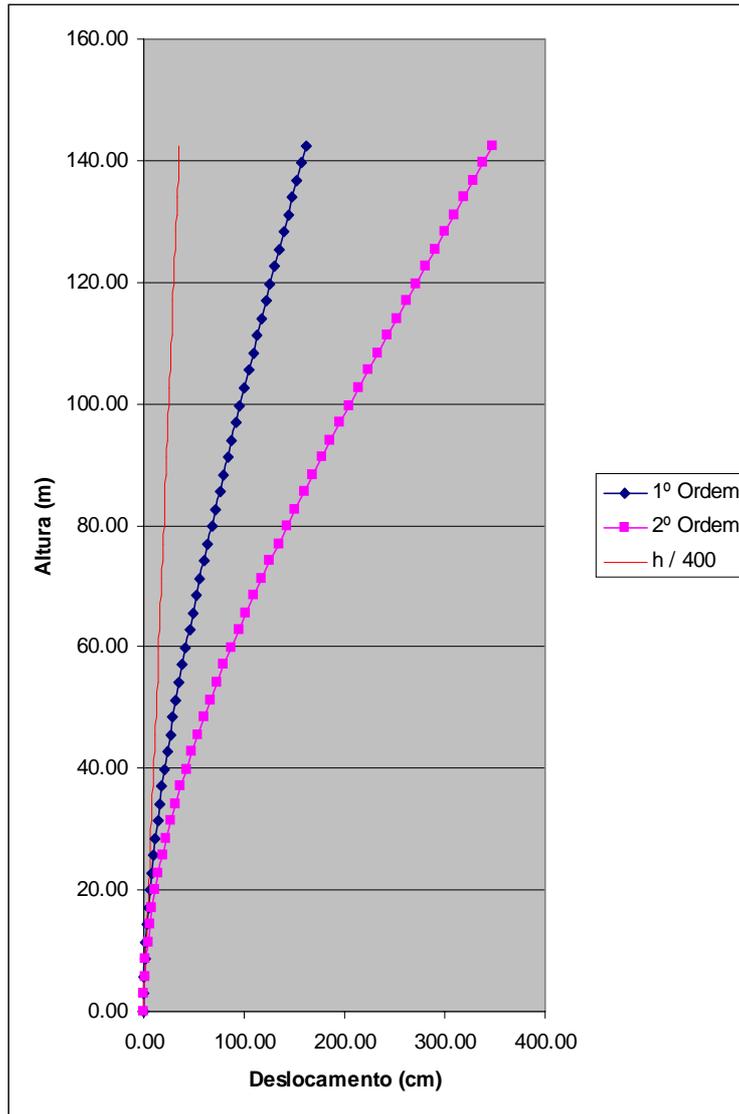


Figura IV.27 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão

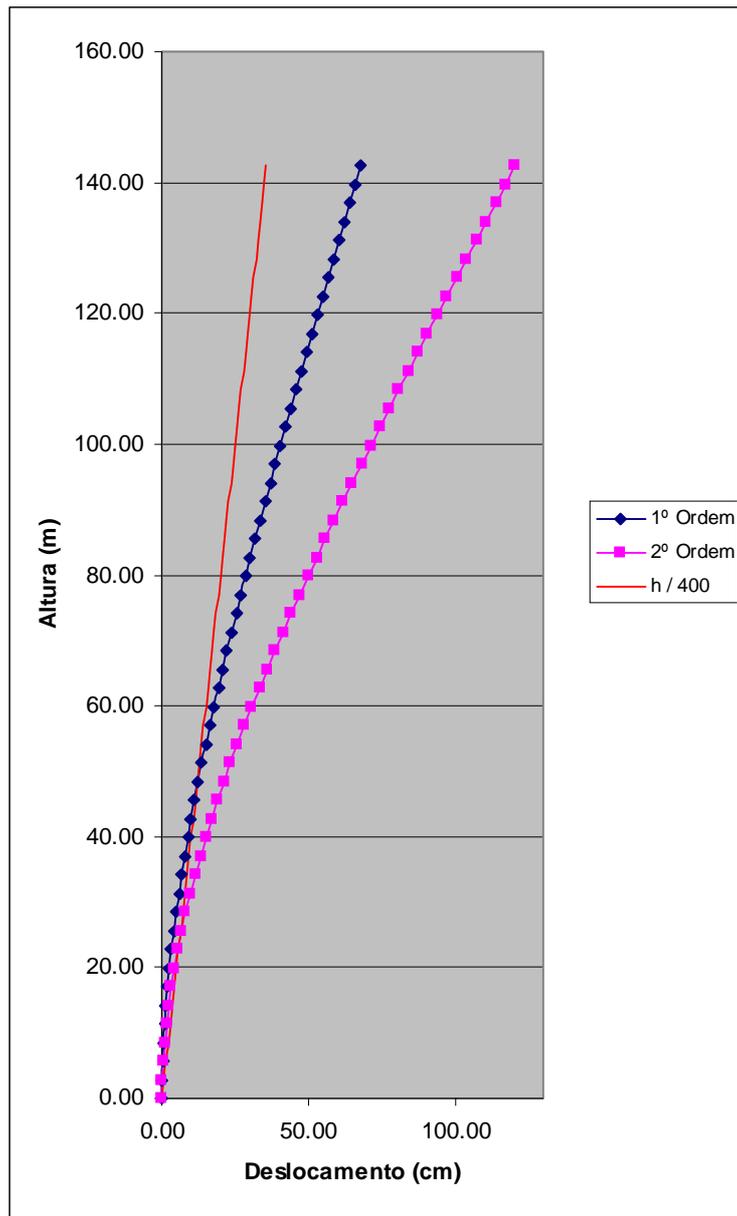


Figura IV.28 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão

4.3.1.2. Contraventamento posicionado em três vãos ao longo da altura da edificação

As estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por treliças posicionadas em três vãos adjacentes ao longo da altura da edificação, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.27 a IV.30):

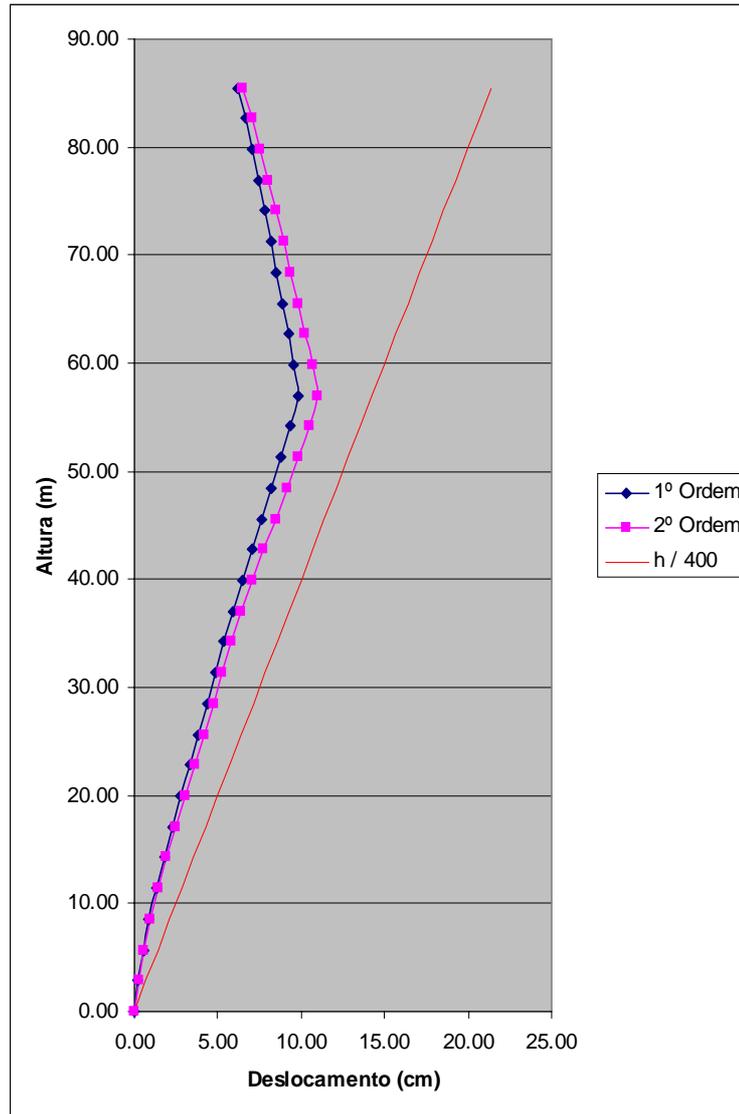


Figura IV.29 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos posicionados ao longo de três vãos

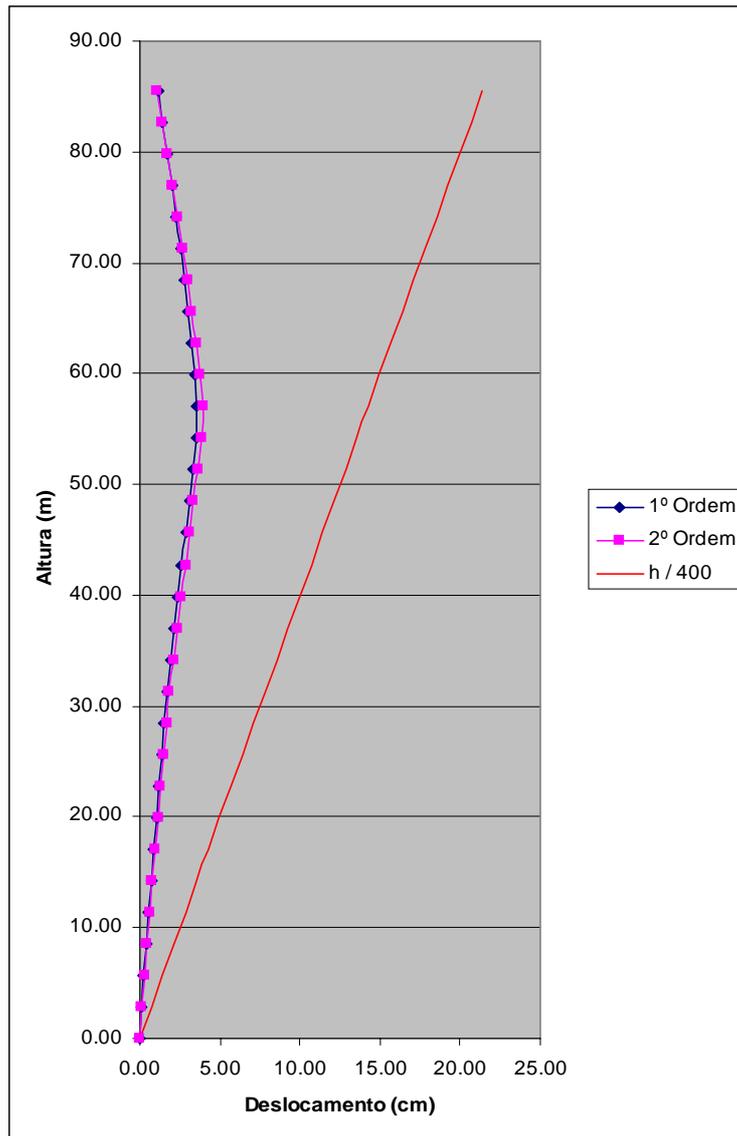


Figura IV.30 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos posicionados ao longo de três vãos

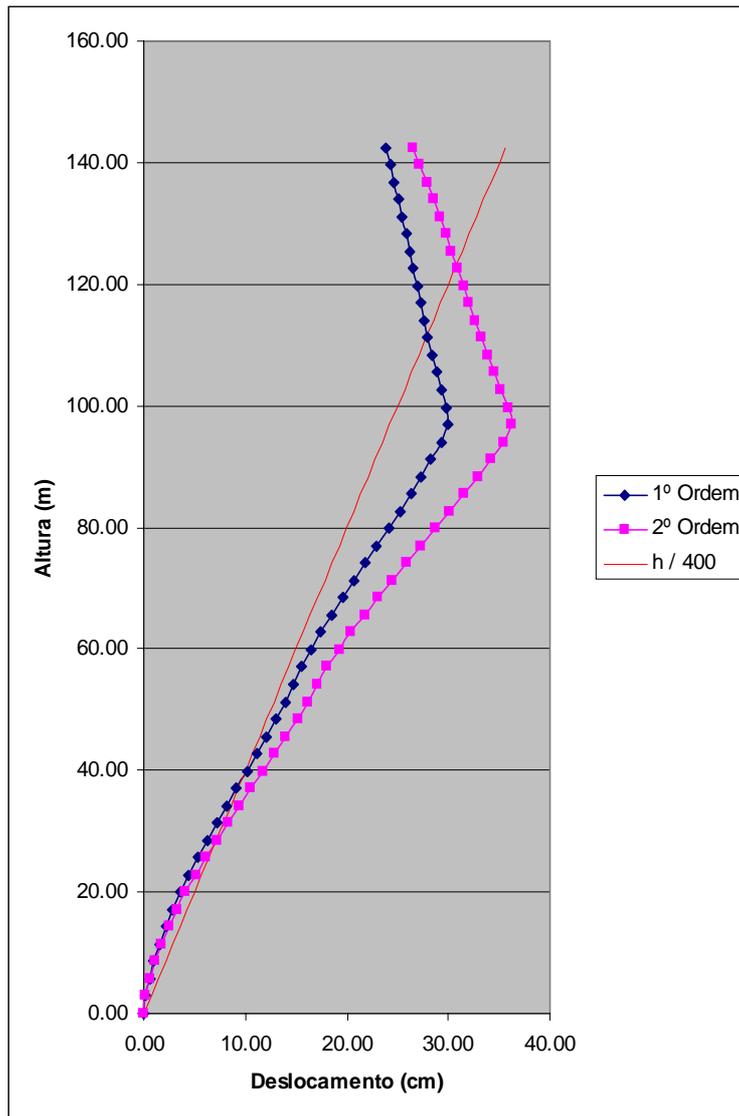


Figura IV.31 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos posicionados ao longo de três vãos

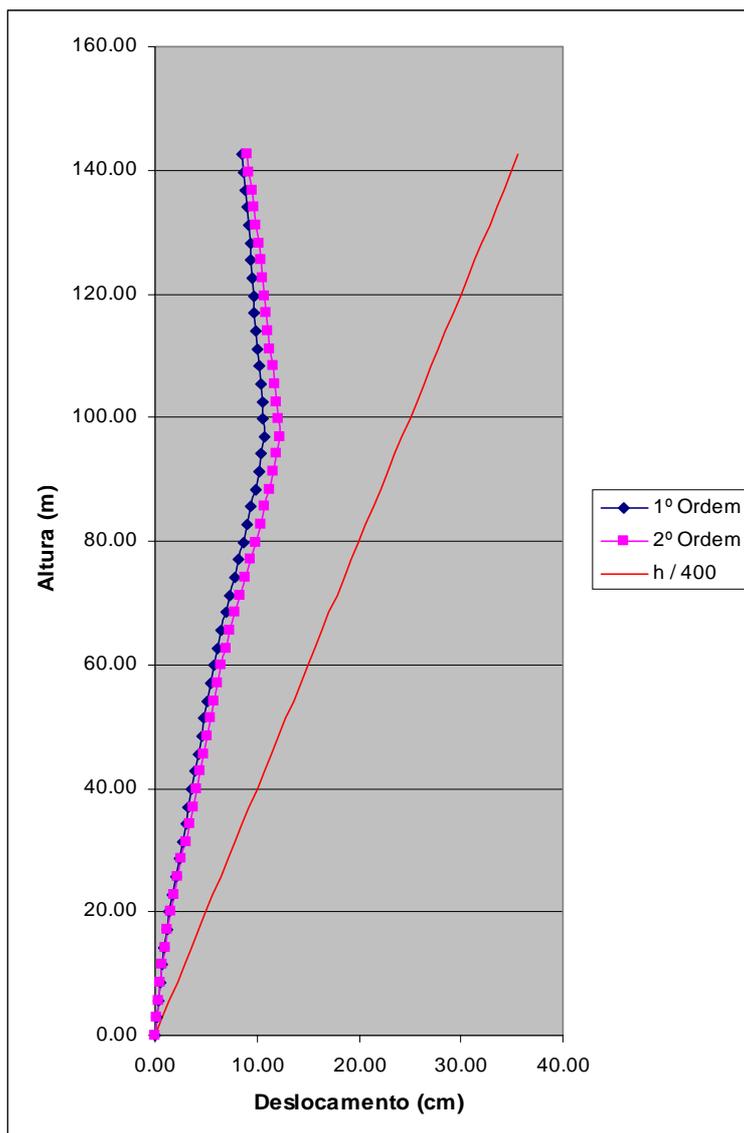


Figura IV.32 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos posicionados ao longo de três vãos

4.3.1.3. Contraventamentos posicionados em vãos adjacentes ao longo da altura da edificação

As estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por treliças posicionadas em vãos adjacentes ao longo da altura da edificação, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figuras IV.33 a IV.36):

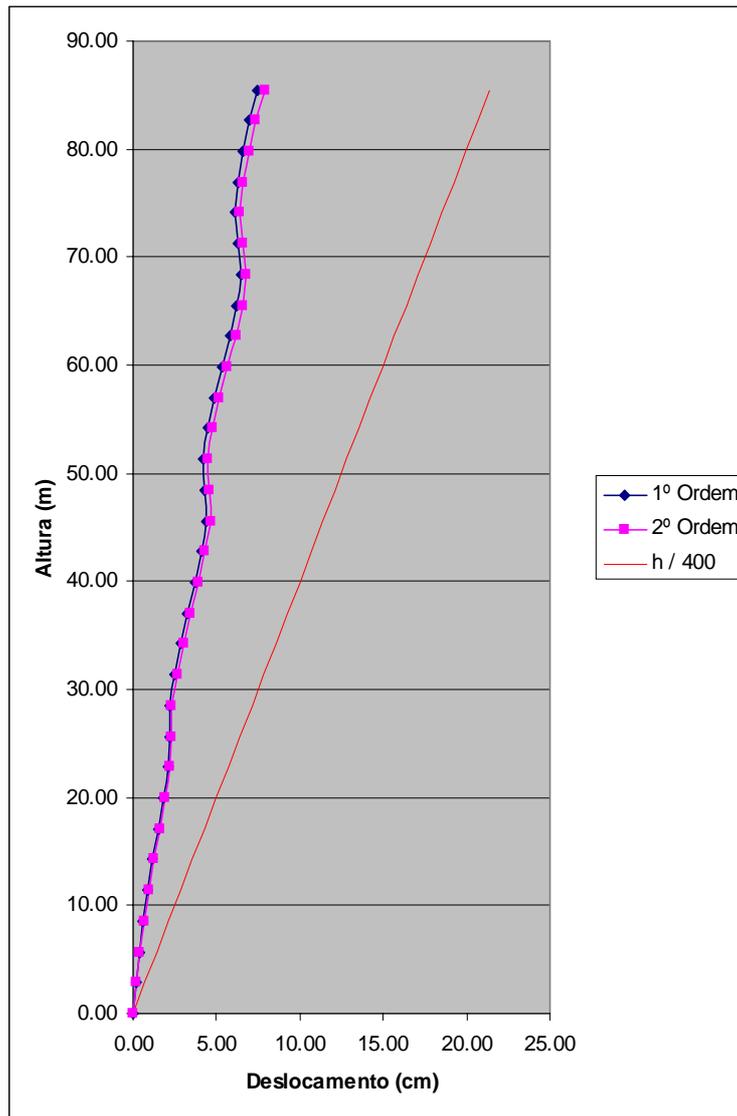


Figura IV.33 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos em vãos adjacentes

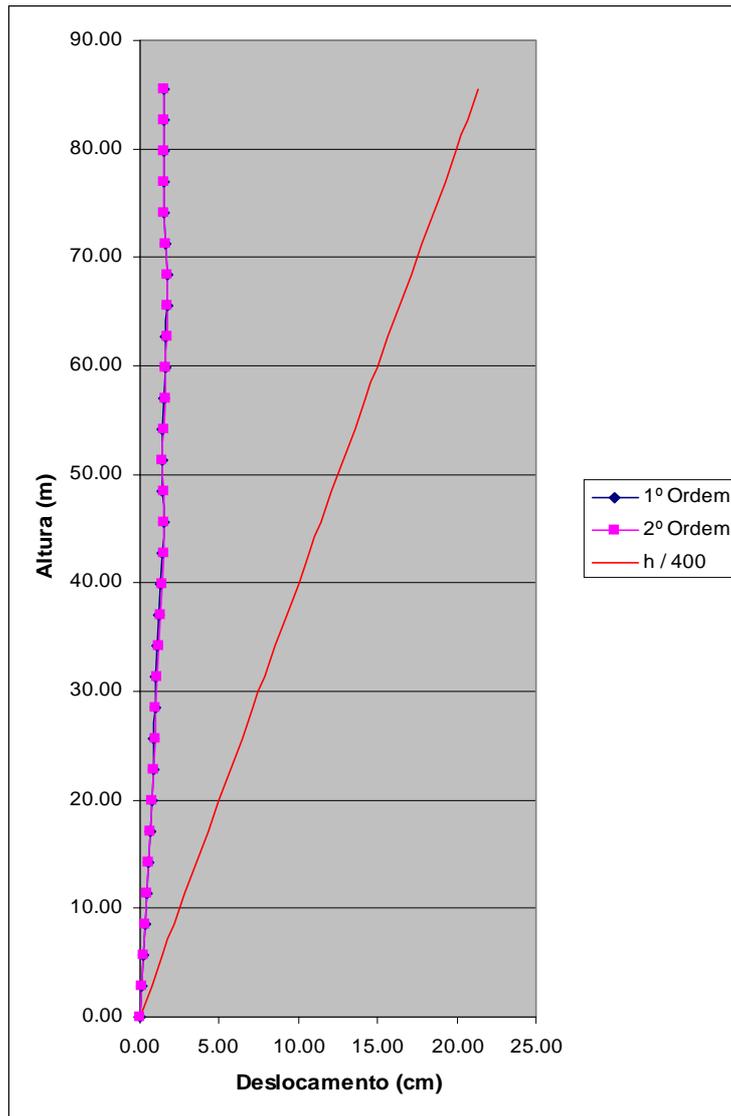


Figura IV.34 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos em vãos adjacentes

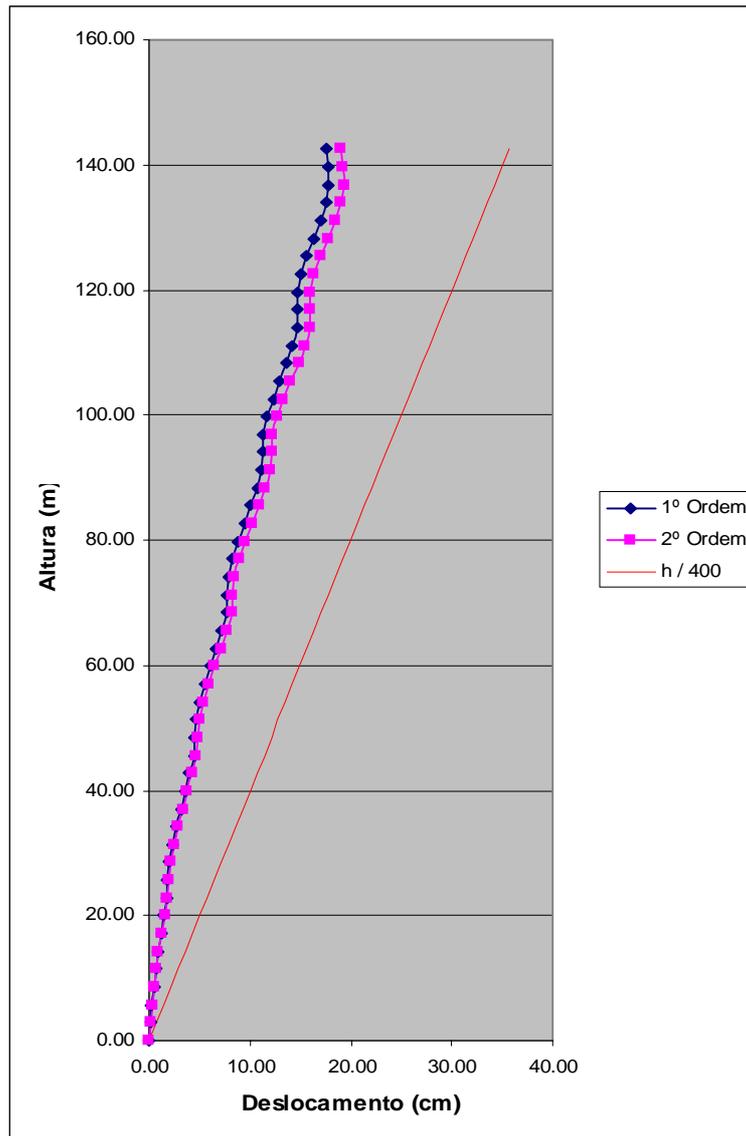


Figura IV.35 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos em vãos adjacentes

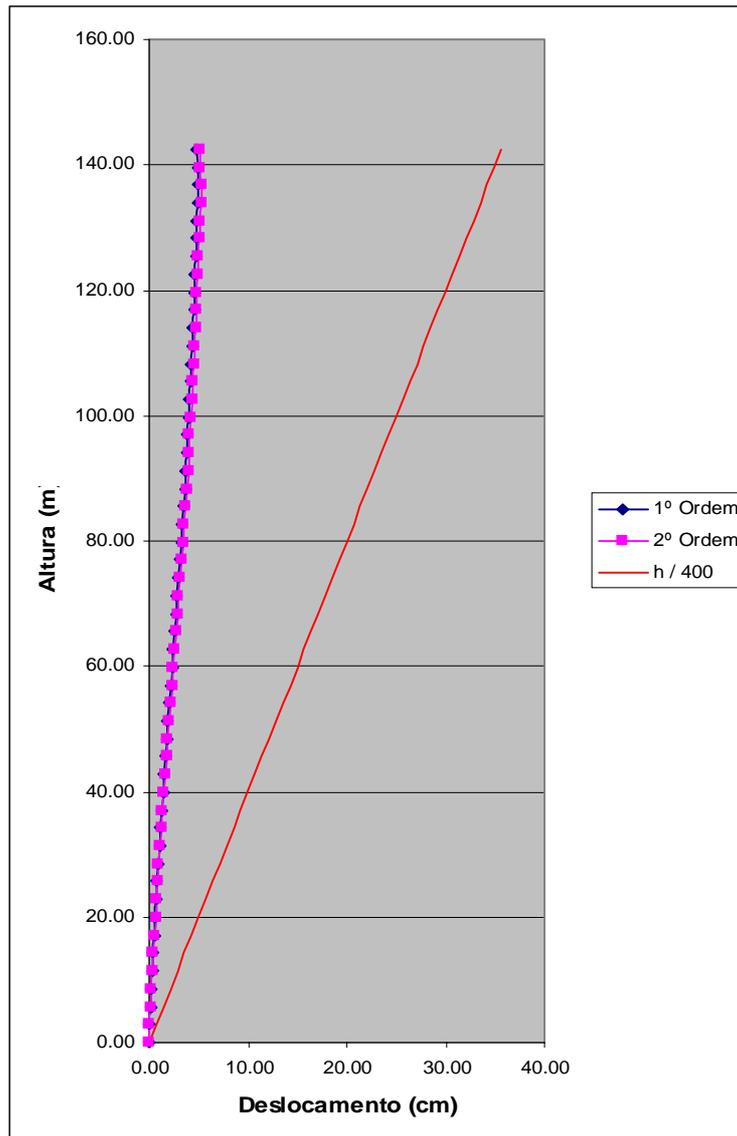


Figura IV.36 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos em vãos adjacentes

4.3.1.4. Análise comparativa dos deslocamentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos

As figuras IV.37 a IV.40 abaixo apresentam um comparativo quanto aos deslocamentos laterais entre as três formas de posicionamento de contraventamentos ao longo da altura da edificação abordadas neste trabalho.

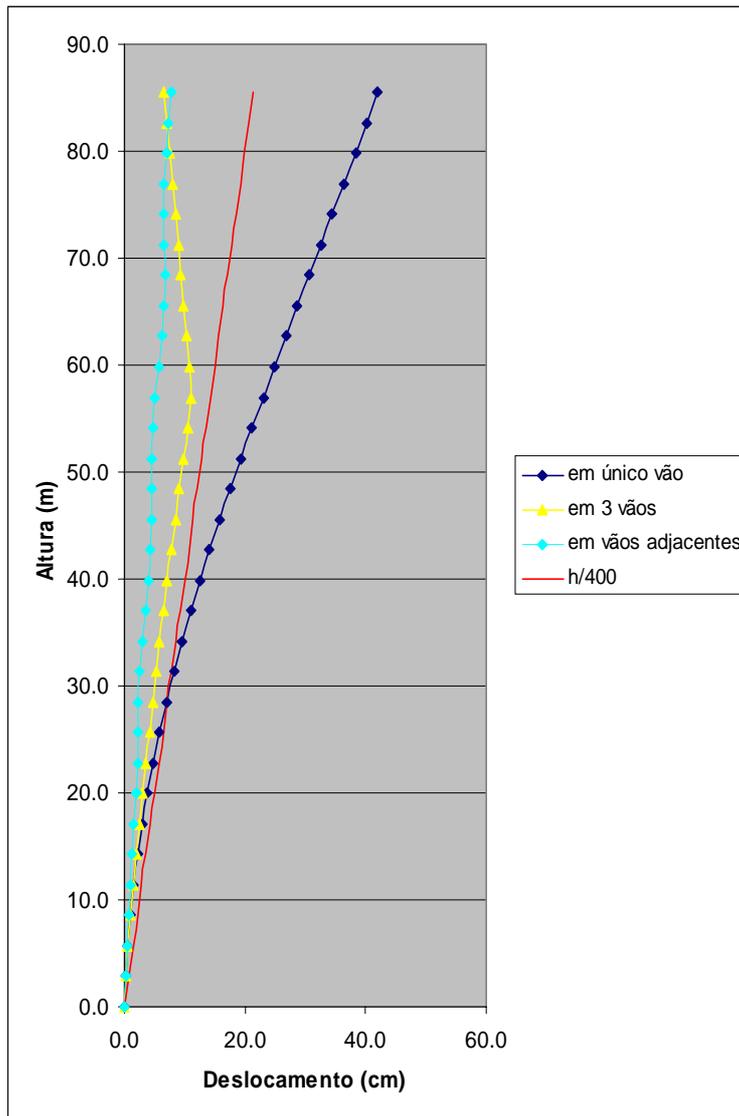


Figura IV.37 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 30 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos

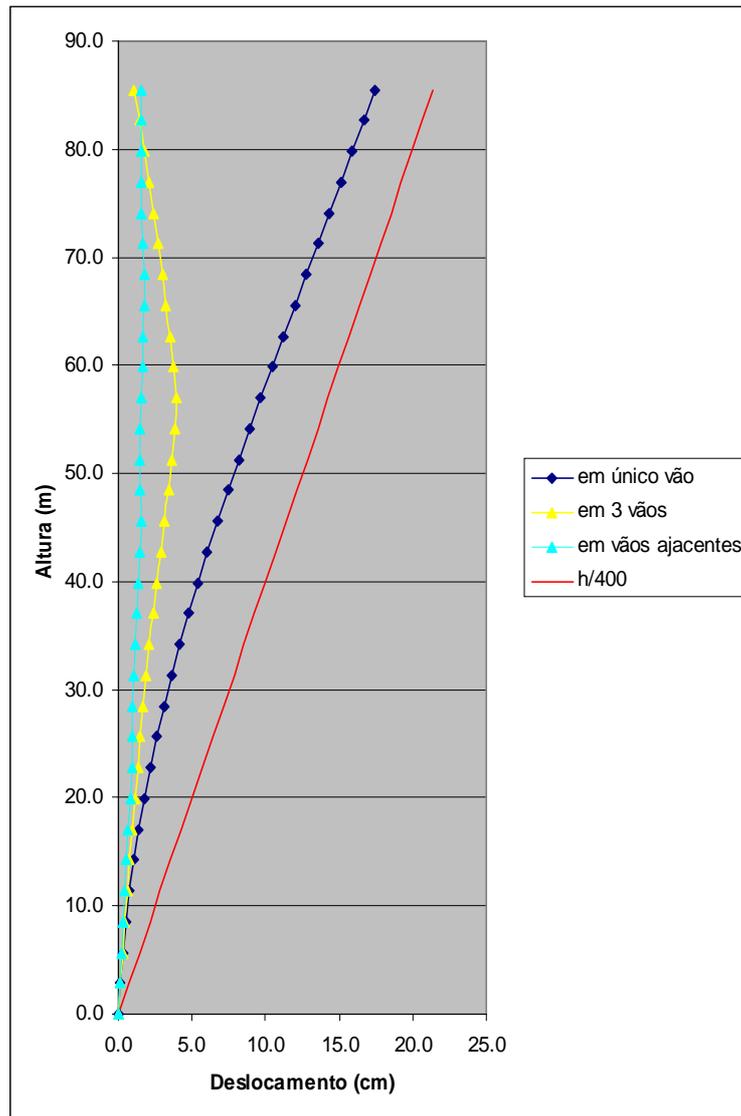


Figura IV.38 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 30 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos

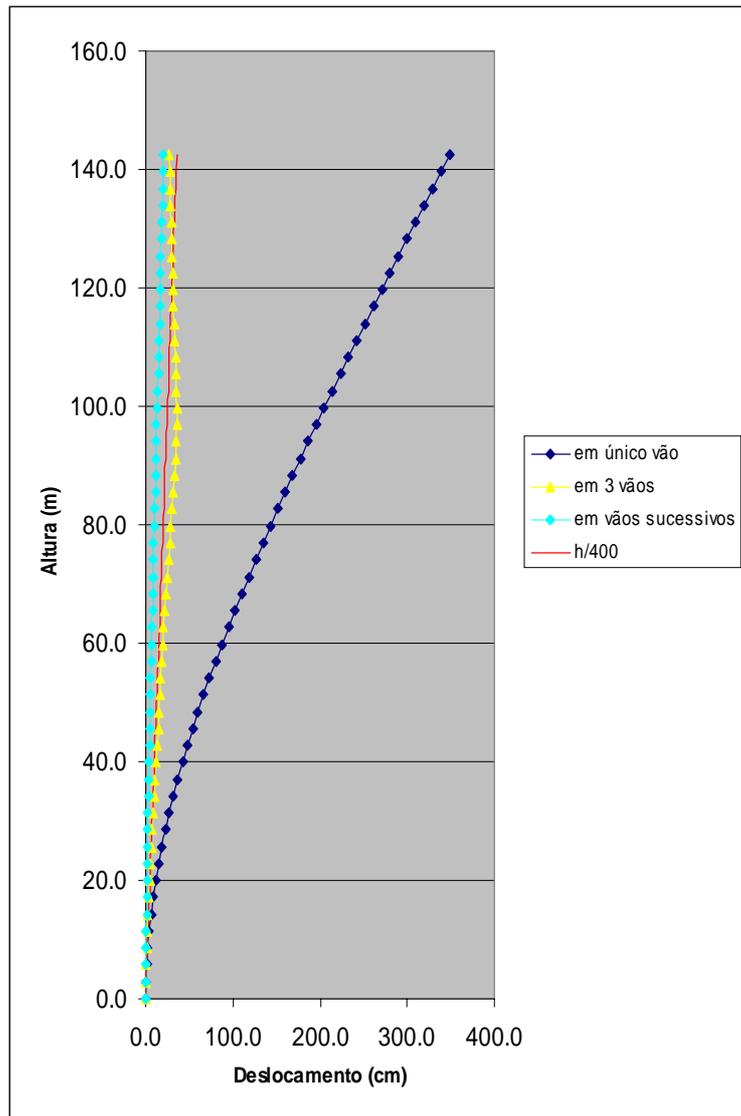


Figura IV.39 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos

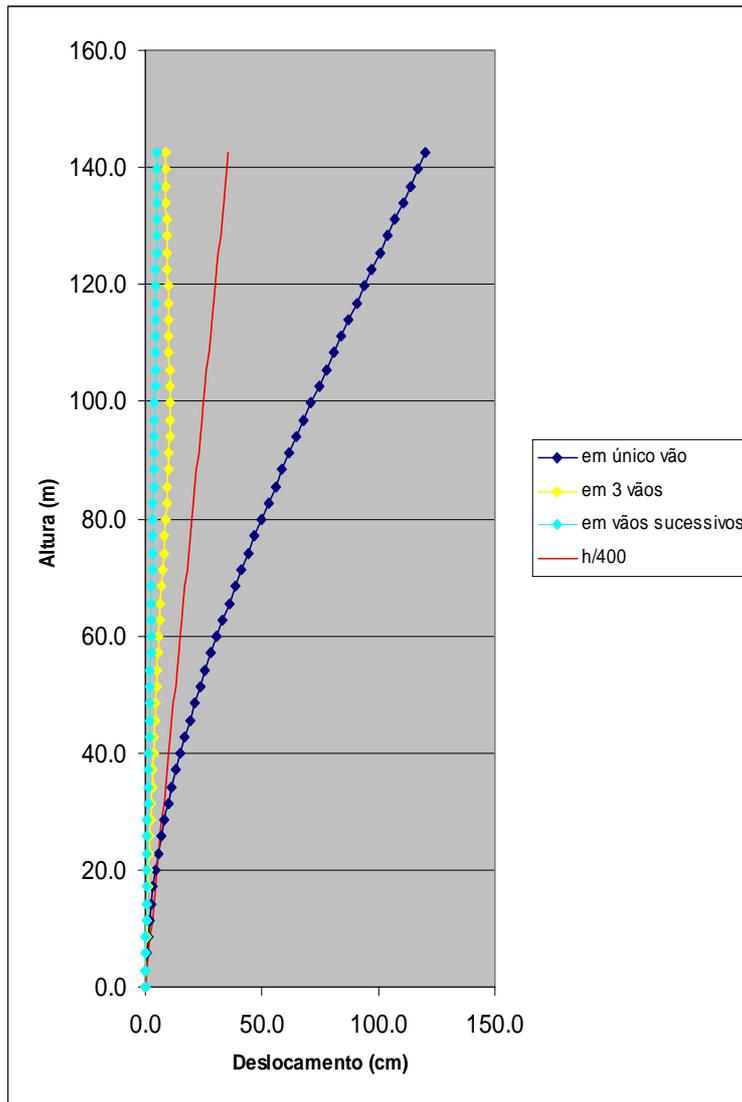


Figura IV.40 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos

Os quadros IV.9 e IV.10 abaixo mostram as relações entre o deslocamento máximo “d” no topo da estrutura e a altura “H” da edificação, para os três diferentes posicionamentos dos contraventamentos

Quadro IV.9 - Relação entre o deslocamento no topo e altura da edificação de 30 pavimentos

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
d / H	1/203	1/1315	1/1086

Quadro IV.10 - Relação entre o deslocamento no topo e a altura da edificação de 50 pavimentos

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
d / H	1/41	1/537	1/748

As amplificações para os deslocamentos, definidas como a relação entre os deslocamentos obtidos de uma análise não linear geométrica e os deslocamentos obtidos de uma análise linear foram as seguintes (quadros IV.11 e IV.12):

Quadro IV.11 - Amplificações de deslocamentos na direção Y para a edificação de 30 pavimentos

POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
1,267	1,048	1,056

Quadro IV.12 - Amplificações de deslocamentos na direção Y para a edificação de 50 pavimentos

POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
2,159	1,114	1,086

Analisando os resultados acima podemos perceber que a utilização de contraventamentos posicionados em um único vão é bem menos eficiente, no que diz respeito aos deslocamentos laterais, se comparada com as soluções em que os contraventamentos são posicionados em vários vãos. Os valores obtidos para os deslocamentos laterais relativos à base da edificação e entre pavimentos, quando da utilização do sistema de contraventamento posicionado ao longo de um único vão foram

inapropriados tanto para a edificação com 30 como para a de 50 pavimentos (quadros VI.14 e VI.15).

Apesar do contraventamento posicionado em três vãos ao longo da altura da edificação ter apresentado um comportamento bem melhor no impedimento dos deslocamentos laterais da estrutura relativos à base da edificação, esta solução não se mostrou satisfatória em nenhuma das edificações, quanto aos deslocamentos relativos entre pavimentos, especialmente para a edificação mais alta.

A edificação cujo posicionamento do contraventamento se deu ao longo da altura da edificação em vãos adjacentes, obteve excelentes resultados nas restrições aos deslocamentos laterais relativos à base da edificação, ficando a desejar na restrição aos deslocamentos entre pavimentos para a edificação com 50, onde os maiores deslocamentos entre pisos apresentaram-se cerca 1,5mm acima do que permite a Norma brasileira para um pé-direito de 2,85m.

Alguns motivos explicam o desempenho mais satisfatório para as edificações com contraventamentos posicionados em diferentes vãos da estrutura. O primeiro deles é que a força de compressão desenvolvida pelas treliças é agora repartida por uma maior quantidade de pilares, gerando uma menor deformação axial destes elementos. Outro motivo é que os contraventamentos dos pavimentos superiores geram reações de tração nos contraventamentos dos pavimentos inferiores aliviando as solicitações axiais nos pilares de sotavento, contribuindo também com a diminuição das suas deformações axiais (figura IV.41).

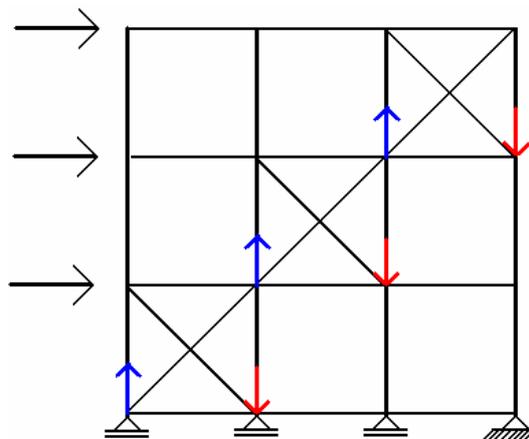


Figura IV.41 - Esquema de propagação do corte horizontal através dos pilares

Outro ponto bastante interessante é a forma da deformada apresentada pela estrutura com contraventamento posicionado ao longo de três vãos da estrutura (figura IV.31 e IV.32). Esta deformada pode ser explicada pelo encurtamento do pilar de sotavento do contraventamento intermediário, ocasionando uma rotação em sentido anti-horário na base do contraventamento superior. Devido à deformada pouco usual desta estrutura, os pequenos resultados obtidos, quanto ao deslocamento no topo da estrutura, bem como quanto às amplificações dos deslocamentos de primeira e segunda ordem, não são representativos do comportamento da estrutura.

4.3.2. VERIFICAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

Através da análise dinâmica das estruturas em questão obtivemos as seguintes frequências naturais correspondentes à translação segundo os eixos X e Y respectivamente:

Quadro IV.13 - Frequências naturais das estruturas de 30 pavimentos segundo translação nos eixos X e Y

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
f_1 (Hz)	0,1555	0,2584	0,2590
f_2 (Hz)	0,1364	0,2445	0,2500

Quadro IV.14 - Frequências naturais das estruturas de 50 pavimentos segundo translação nos eixos X e Y

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
f_1 (Hz)	0,0633	0,1314	0,1814
f_2 (Hz)	0,0498	0,1161	0,1552

Os deslocamentos laterais da estrutura, para as forças devidas ao vento, utilizando um período de recorrência de 10 anos, foram os seguintes:

Quadro IV.15 - Deslocamento da estrutura de 30 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Deslocamento em X (cm)	7,88	2,74	0,72
Deslocamento em Y (cm)	19,00	5,78	3,75

Quadro IV.16 - Deslocamento da estrutura de 50 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Deslocamento em X (cm)	54,76	4,49	2,89
Deslocamento em Y (cm)	160,52	18,68	7,08

De posse dos valores das frequências naturais das estruturas e dos seus respectivos deslocamentos, foi possível, com o auxílio da equação III.1, fornecida pela NBR-8800, calcular a amplitude máxima da aceleração (quadros IV.47 e IV.48).

Quadro IV.17 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 30 pavimentos

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0752	0,0730	0,0019
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,1396	0,1363	0,0926

Quadro IV.18 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 30 pavimentos

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0864	0,0306	0,0376
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,1572	0,0995	0,0674

Através da análise dos resultados apresentados, podemos observar que a estrutura cujo contraventamento é posicionado ao longo de um único vão em toda a altura da estrutura, não atende os critérios de conforto humano impostos pela NBR-8800 [17], que limita a amplitude máxima da aceleração em $0,1 \text{ m/s}^2$.

A edificação com 30 pavimentos cujo contraventamento foi posicionado ao longo de três vãos não atendeu aos critérios de conforto humano propostos pela NBR-8800 [17], o que não ocorreu com a estrutura de 50 pavimentos, onde este critério foi atendido. No entanto, vale lembrar que a medida da amplitude da aceleração foi calculada para o topo da edificação, e que, devido ao comportamento singular da deformada da estrutura, com pequenos deslocamentos no topo e grandes deslocamentos nos níveis intermediários, os pavimentos inferiores não atenderam aos limites de conforto humano impostos pela NBR-8800 [17].

4.3.3. CONSUMO DE AÇO

Os perfis obtidos para as estruturas com 30 e 50 pavimentos estão apresentados nos quadros IV.49 e IV.50 abaixo.

Quadro IV.19 - Perfis utilizados na edificação com 30 pavimentos

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Colunas - 1	CS 650x588	CS 550x368	CS 550x368
Colunas - 2	CS 650x437	CS 550x345	CS 550x345
Colunas - 3	CS 650x305	CS 550x228	CS 550x257
Colunas - 4	CS 650x305	CS 550x228	CS 550x228
Colunas - 5	CS 650x305	CS 550x228	CS 550x228
Contraventamento - 1	W 310x97	W 310x79	W 310x79
Contraventamento - 2	HP 310x93	W 250x73	W 310x79
Contraventamento - 3	W 250x73	HP 200x53	W 250x73
Contraventamento - 4	HP 250x62	HP 250x62	HP 250x62
Contraventamento - 5	W 200x46	HP 200x35	HP 200x53
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75	VS 550X75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51	VS 450X51

Quadro IV.20 - Perfis utilizados na edificação com 50 pavimentos

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Colunas - 1	CS 650x823*	CS 650x693*	CS 650x693*
Colunas - 2	CS 650x823*	CS 650x588	CS 650x588
Colunas - 3	CS 650x823*	CS 650x588	CS 650x409
Colunas - 4	CS 650x588	CS 650x395	CS 650x330
Colunas - 5	CS 650x305	CS 650x305	CS 650x305
Contraventamento - 1	CS 400x248	CS 400x248	CS 500x221
Contraventamento - 2	CS 400x248	CS 400x248	CS 500x172
Contraventamento - 3	CS 500x207	CS 500x207	CS 400x146
Contraventamento - 4	CS 500x172	CS 500x172	CS 350x119
Contraventamento - 5	CS 300x95	CS 300x95	CS 350x93
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75	VS 550X75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51	VS 450X51

* Não padronizado

Os respectivos consumos de aço obtidos para cada grupo de elementos estruturais estão apresentados a seguir.

Quadro IV.21 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 30 pavimentos (Ton)

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Colunas	760,13	547,94	557,22
Contraventamento	89,99	75,18	83,25
Vigas	692,20	692,20	692,20
Consumo total de aço (Ton)	1542,32	1315,3	1323,39

Quadro IV.22 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 50 pavimentos (Ton)

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Colunas	2198,05	1679,05	1519,78
Contraventamento	396,14	317,36	303,11
Vigas	1150,05	1150,05	1150,05
Consumo total de aço (Ton)	3744,24	3146,46	2972,94

Quadro IV.23 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 30 pavimentos

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Consumo de aço (kg/m ²)	59,43	50,67	51,42

Quadro IV.24 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 50 pavimentos

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Consumo de aço (kg/m ²)	86,68	72,85	68,82

Os gráficos das figuras IV.42 e IV.43 ilustram o consumo de aço por metro quadrado para as diferentes formas de associação de contraventamentos.

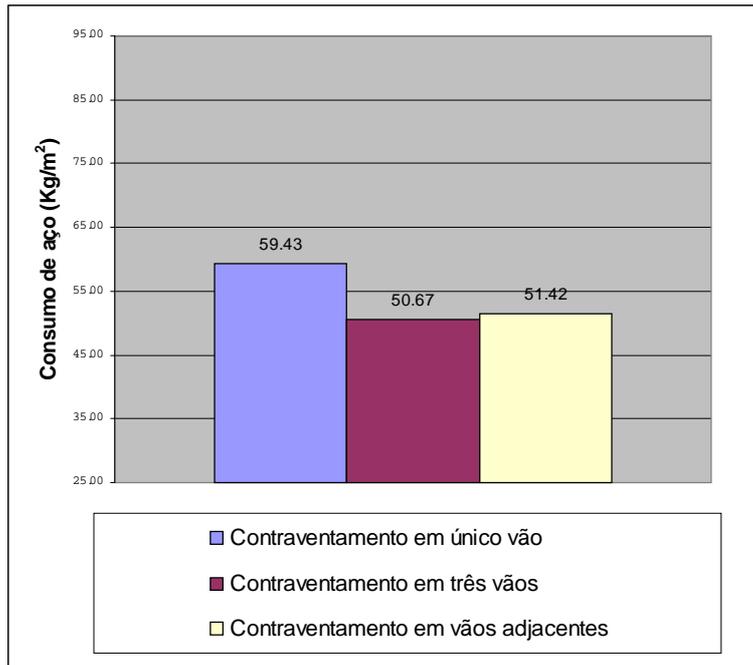


Figura IV.42 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 30 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos

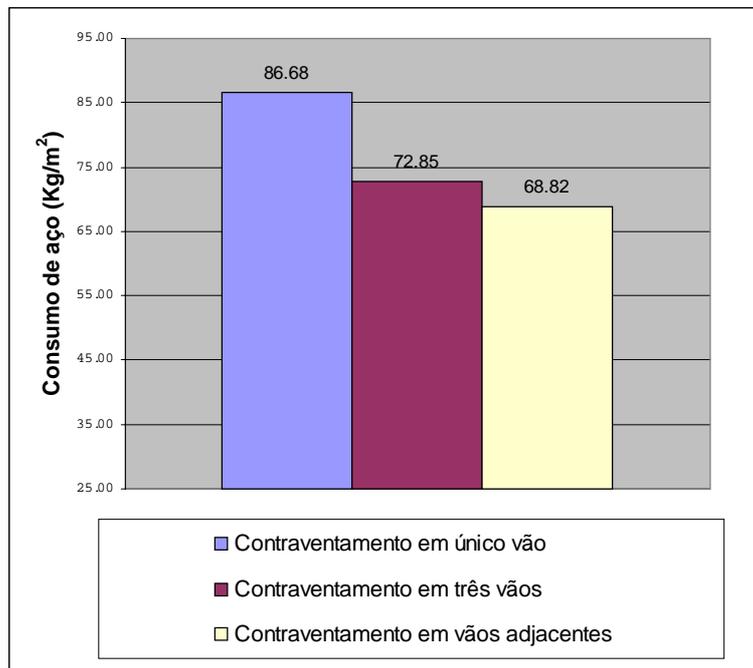


Figura IV.43 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos para os diferentes posicionamentos dos contraventamentos

Quanto ao consumo de aço, também é visível a vantagem apresentada pelas estruturas cujo contraventamento é posicionado em diferentes vãos ao longo da altura da

edificação. Esta vantagem é ainda mais significativa, na medida em que a edificação adquire altura. Fica claro que a opção por contraventar a estrutura em diferentes vãos pode ser bastante vantajosa para o projetista.

4.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS QUANTO À ASSOCIAÇÃO EM LINHA DOS CONTRAVENTAMENTOS

Como explicitado no item 3.1.1.4, foram analisadas três diferentes formas de associação de contraventamentos, a saber;

- dois contraventamentos juntos em cada fachada da edificação (figura III.7.a),
- dois contraventamentos posicionados separados um do outro (figura III.7.b),
- dois contraventamentos interligados por treliças horizontais (figura III.7.c).

A análise quanto a associação em linha foi feita para as edificações com 30 e 50 pavimentos, e os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

4.2.1. DESLOCAMENTOS LATERAIS

Os deslocamentos laterais, obtidos para as edificações com 30 e 50 pavimentos utilizando as diferentes associações de contraventamentos estão apresentados nas figuras IV.44 a IV.55 a seguir.

4.1.1.a. Dois contraventamentos juntos:

As estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por duas treliças juntas, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figuras IV.44 e IV.47):

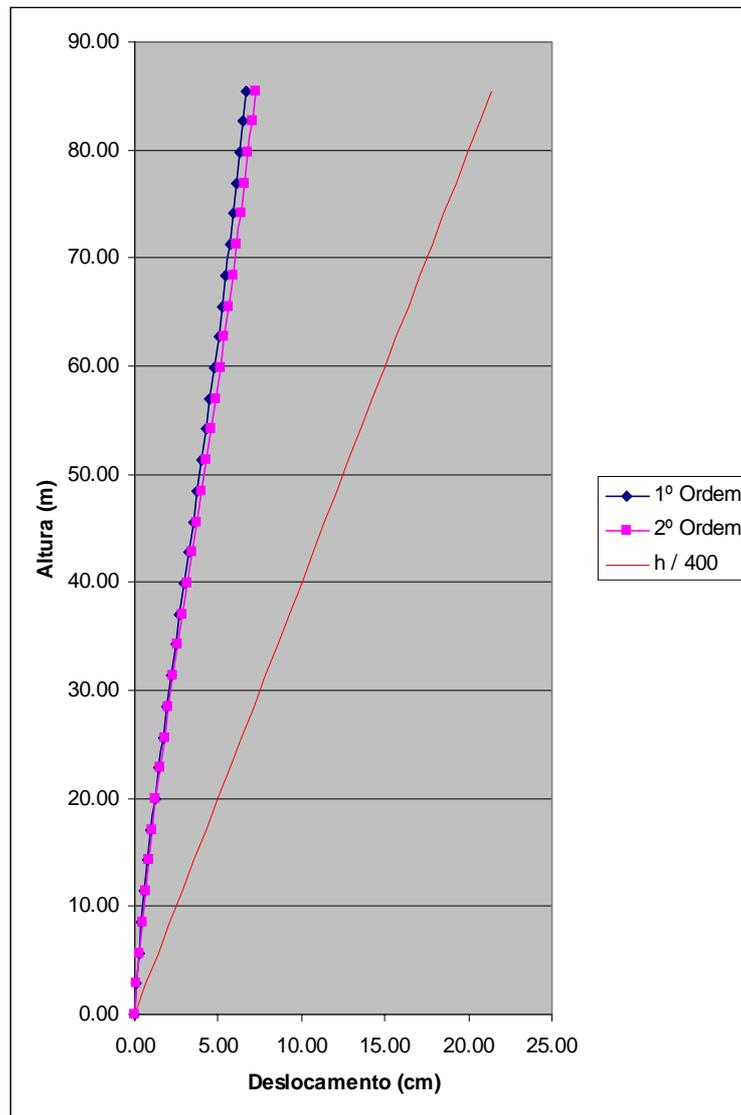


Figura IV.44 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos contraventada com duas treliças juntas

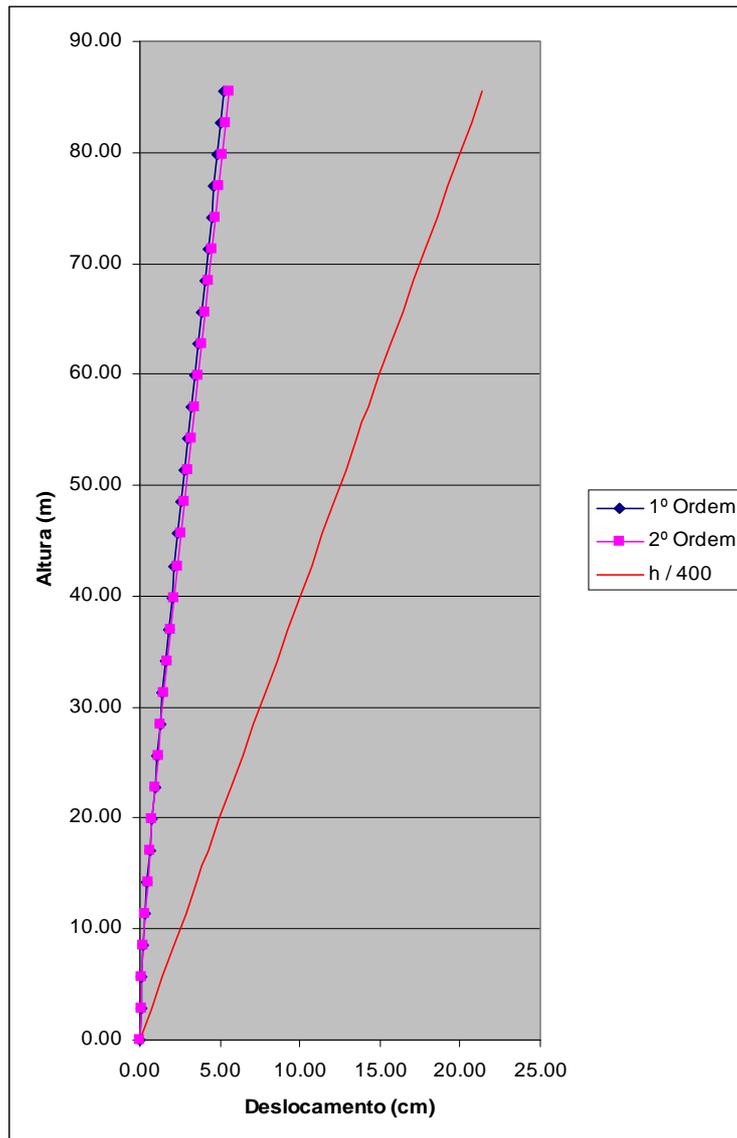


Figura IV.45 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos contraventada com duas treliças juntas

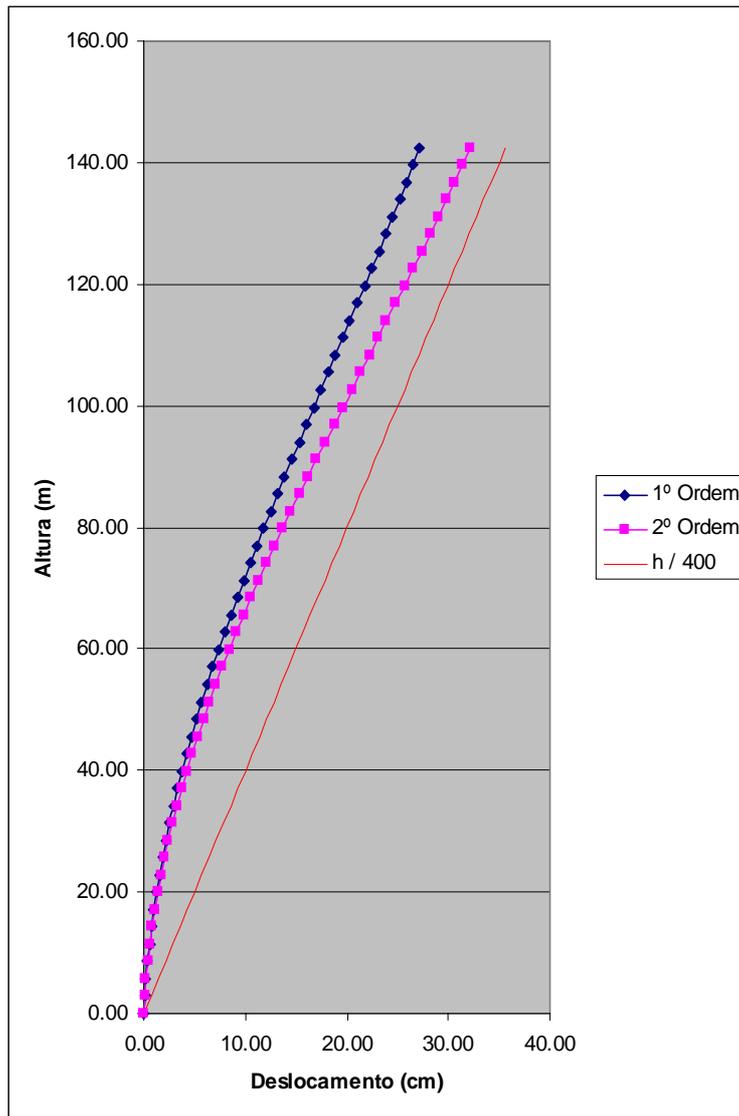


Figura IV.46 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos contraventada com duas treliças juntas

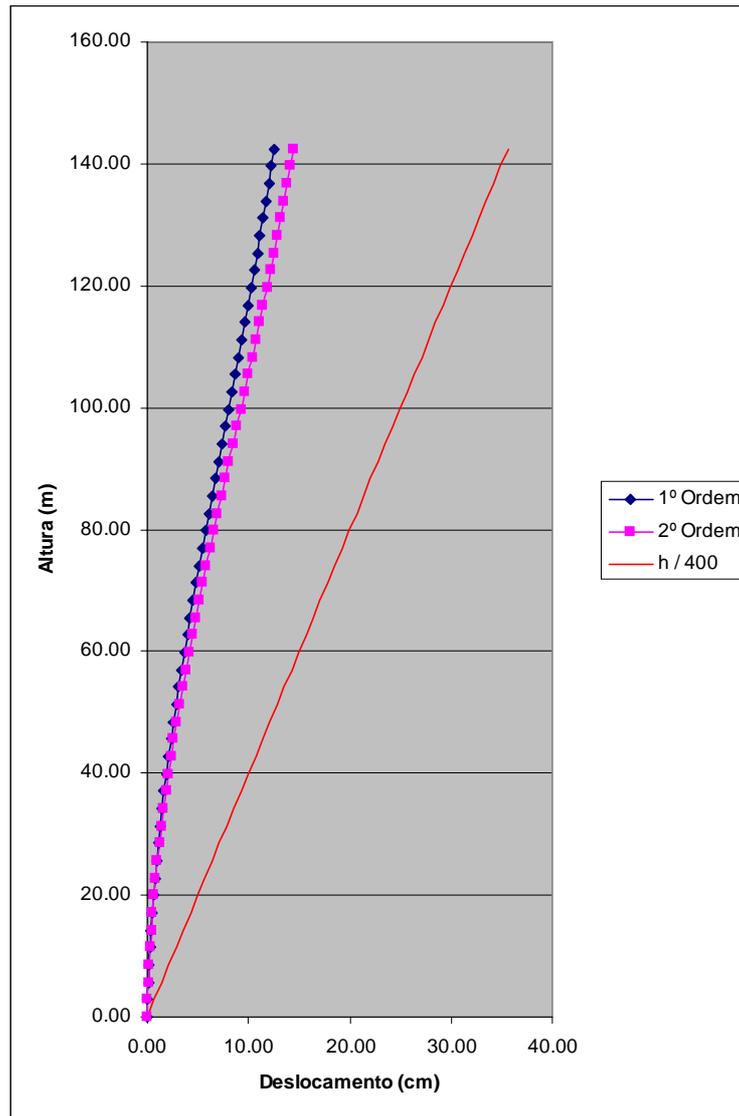


Figura IV.47 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos contraventada com duas treliças juntas

4.4.1.2. Dois contraventamentos separados:

As estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por duas treliças separadas posicionadas em cada fachada da edificação, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.48 a IV.51):

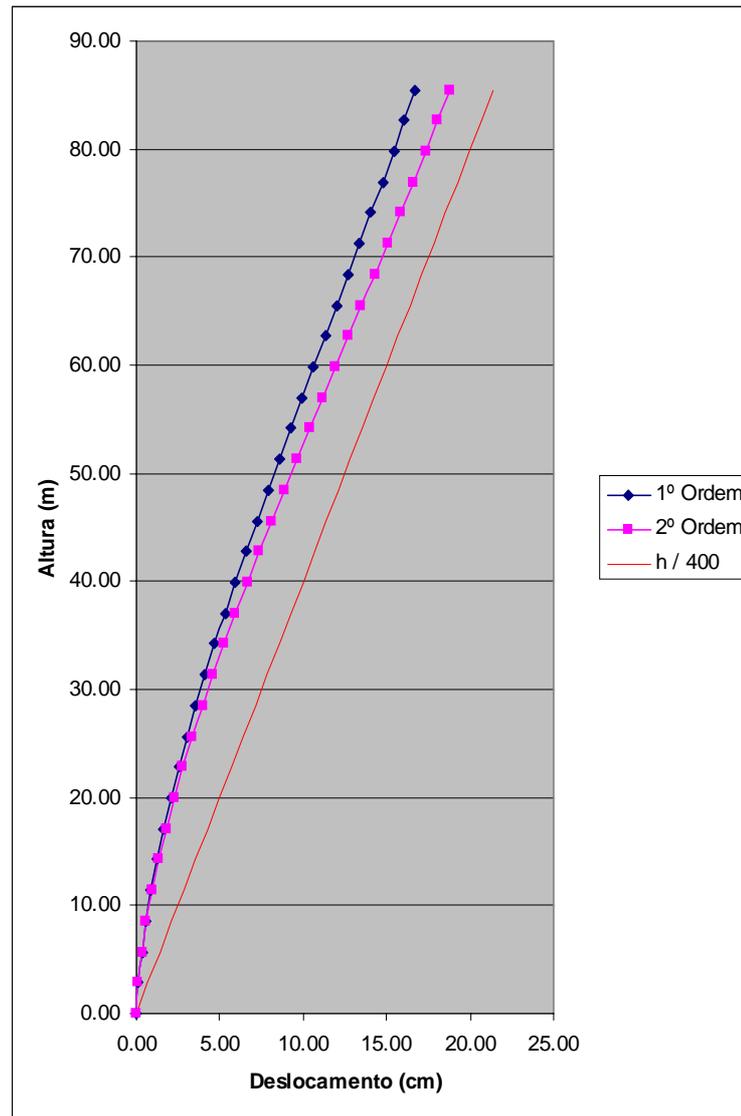


Figura IV.48 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos contraventada com duas treliças separadas

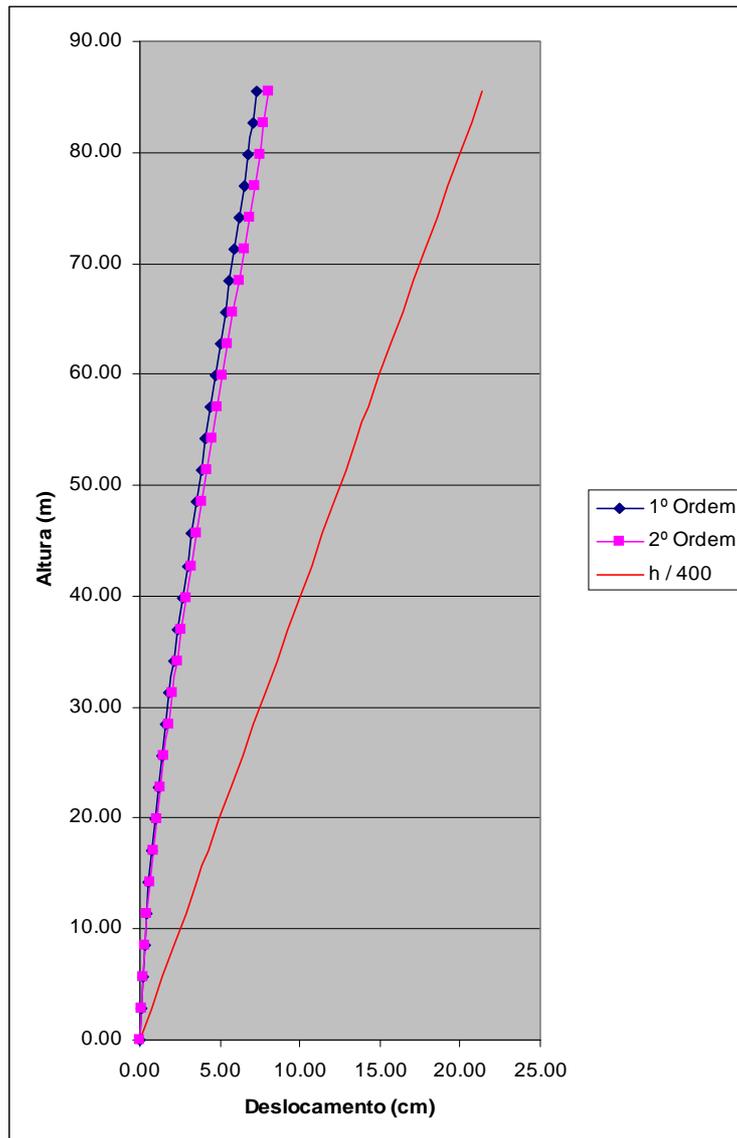


Figura IV.49 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos contraventada com duas treliças separadas

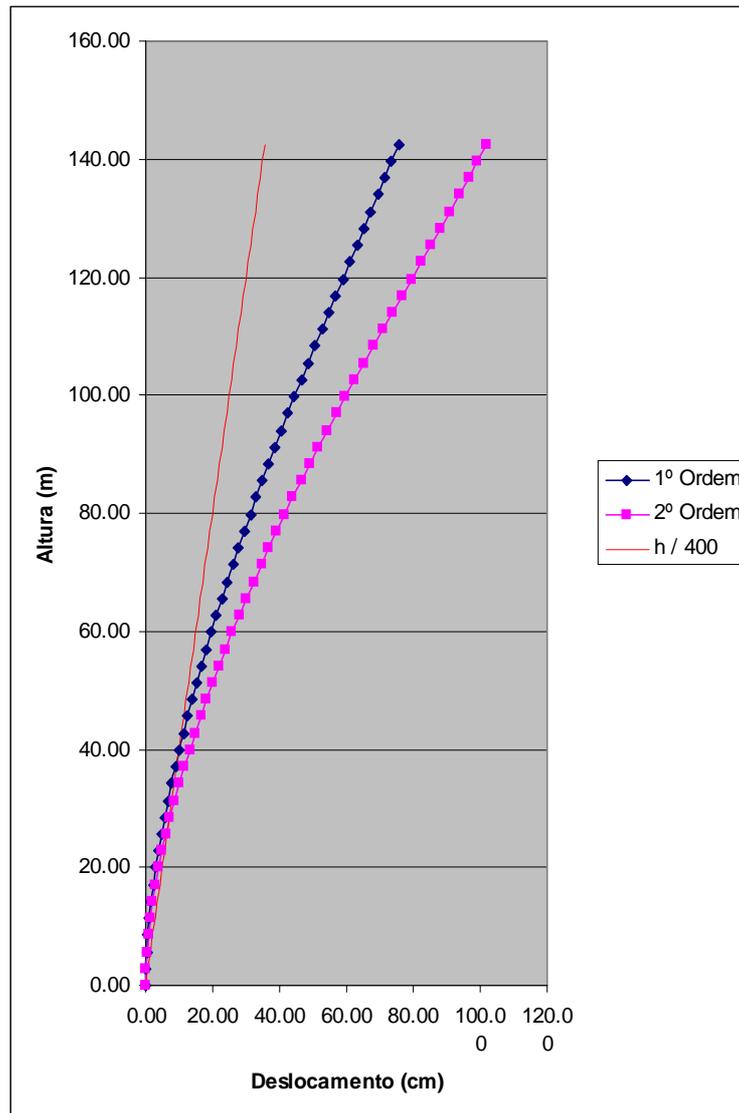


Figura IV.50 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos contraventada com duas treliças separadas

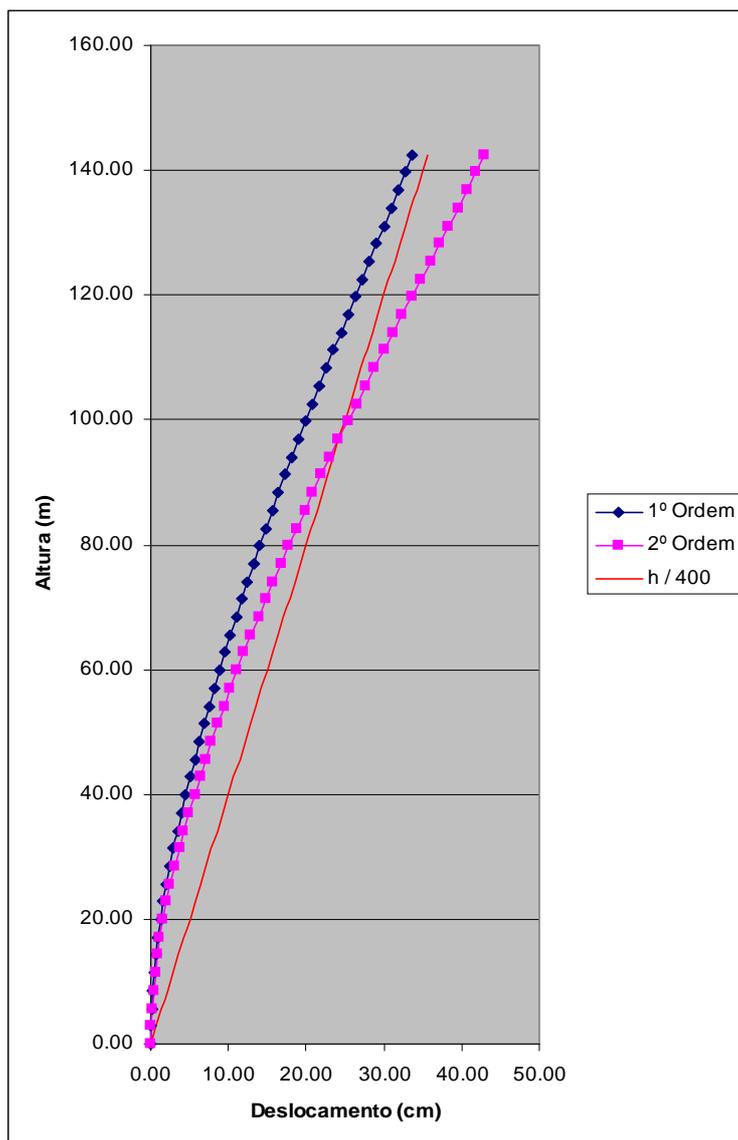


Figura IV.51 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos contraventada com duas treliças separadas

4.4.1.3. Dois contraventamentos interligados:

As estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por duas treliças interligadas entre si através de três treliças horizontais, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.52 a IV.55):

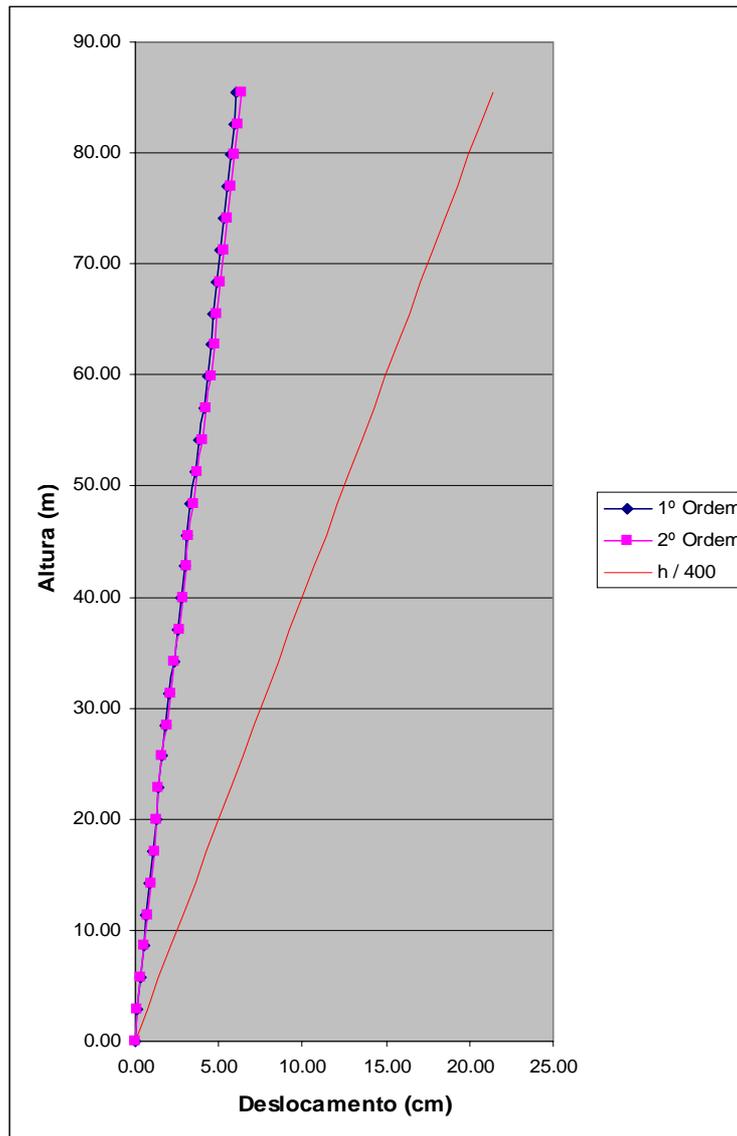


Figura IV.52 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos interligados

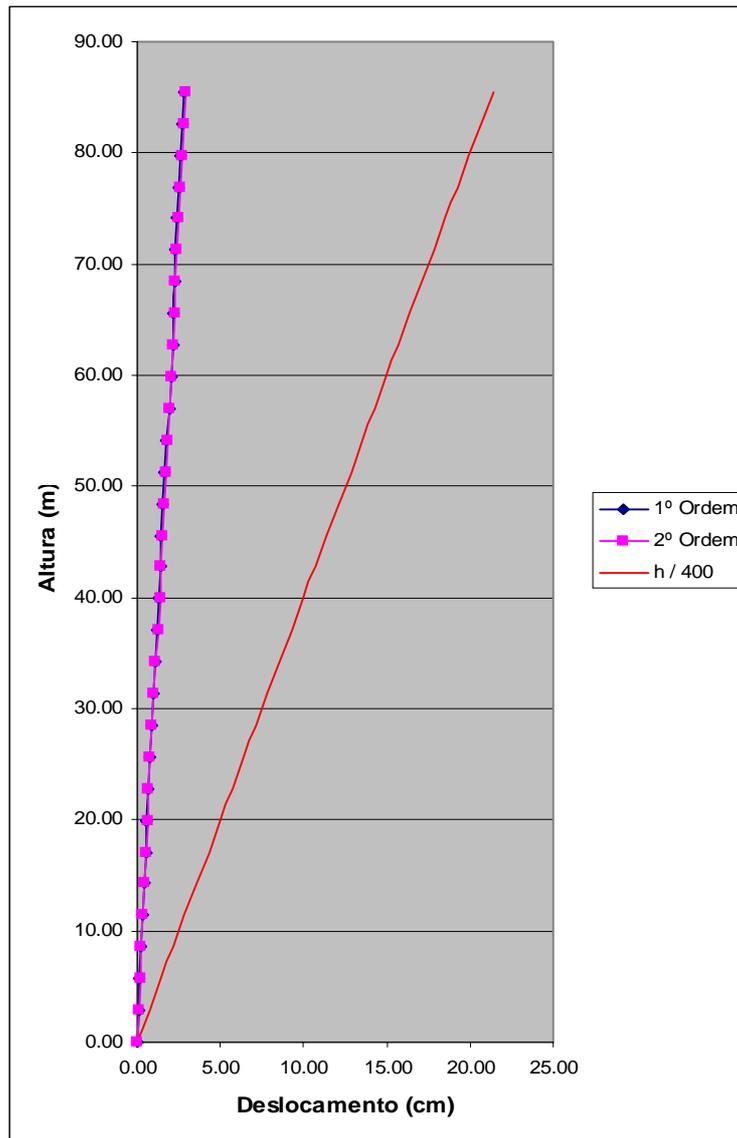


Figura IV.53 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos interligados

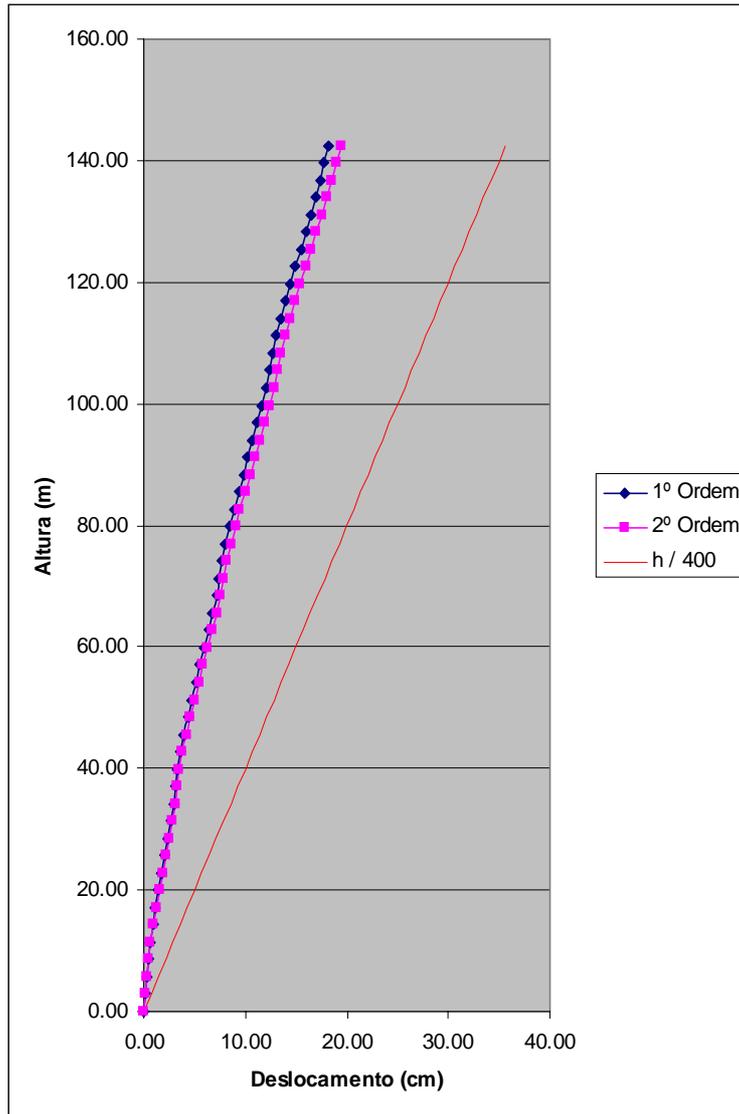


Figura IV.54 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos interligados

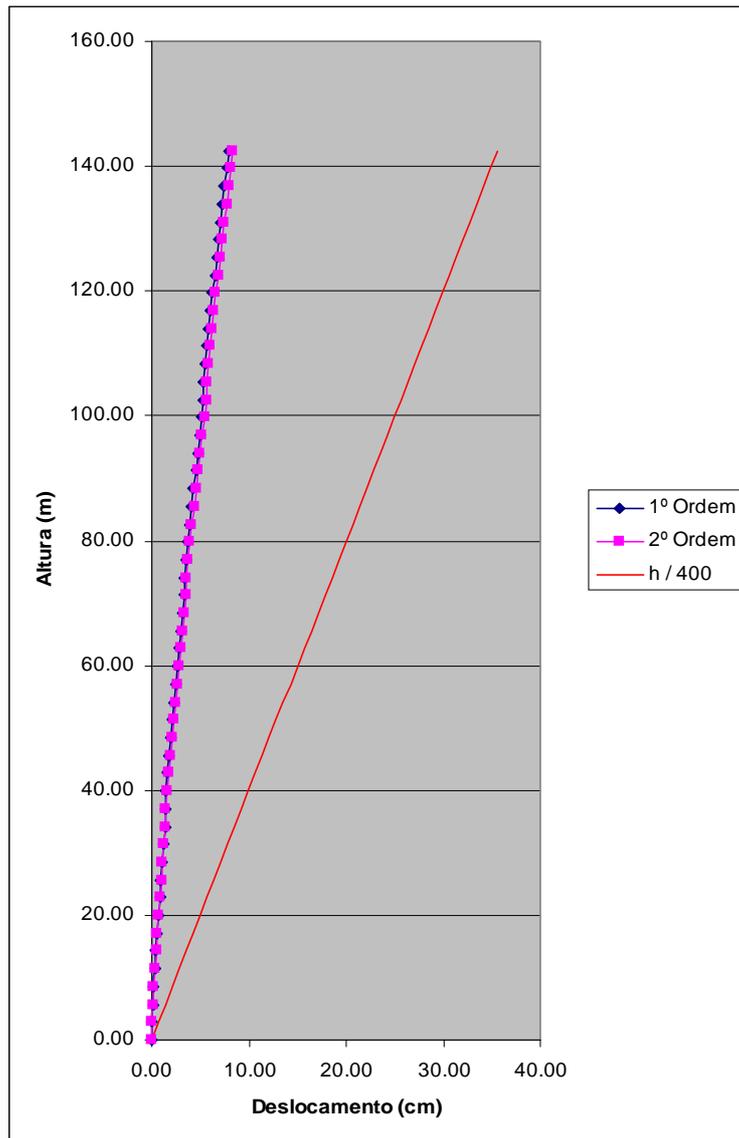


Figura IV.55 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos interligados

4.4.1.4. Análise comparativa dos deslocamentos para os diferentes tipos de associações entre contraventamentos

As figuras IV.56 e IV.57 abaixo apresentam um comparativo quanto aos deslocamentos laterais entre as três formas de associação de contraventamentos abordadas.

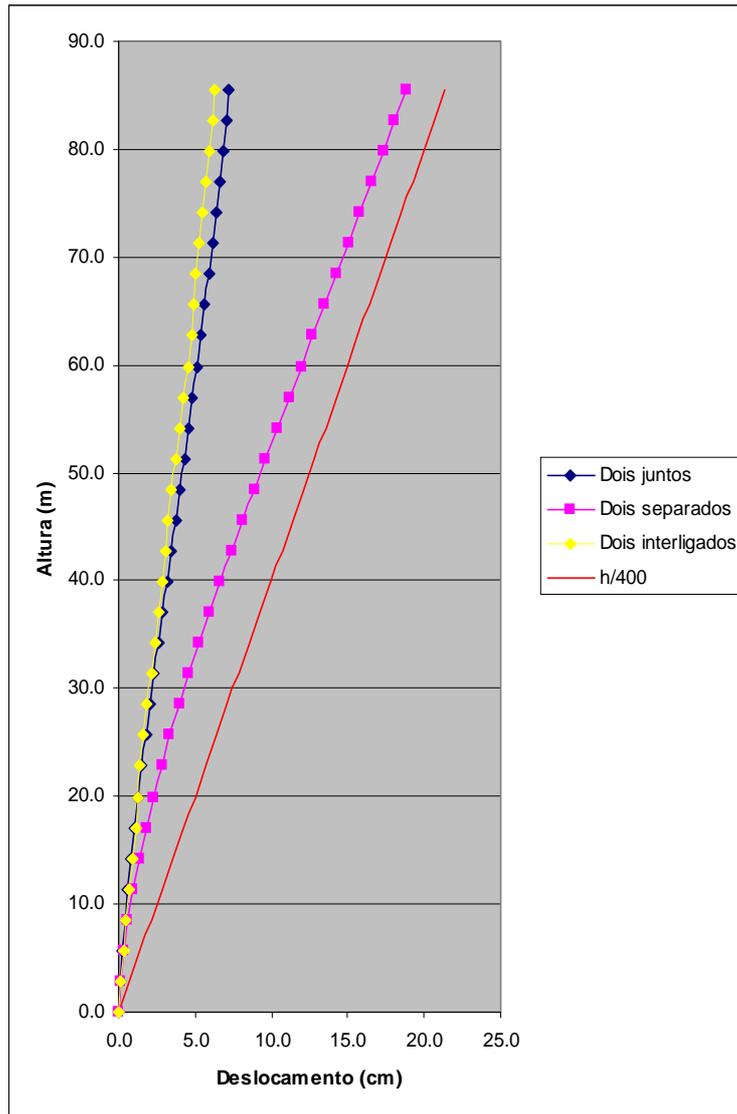


Figura IV.56 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 30 pavimentos para as três diferentes formas de associações dos contraventamentos

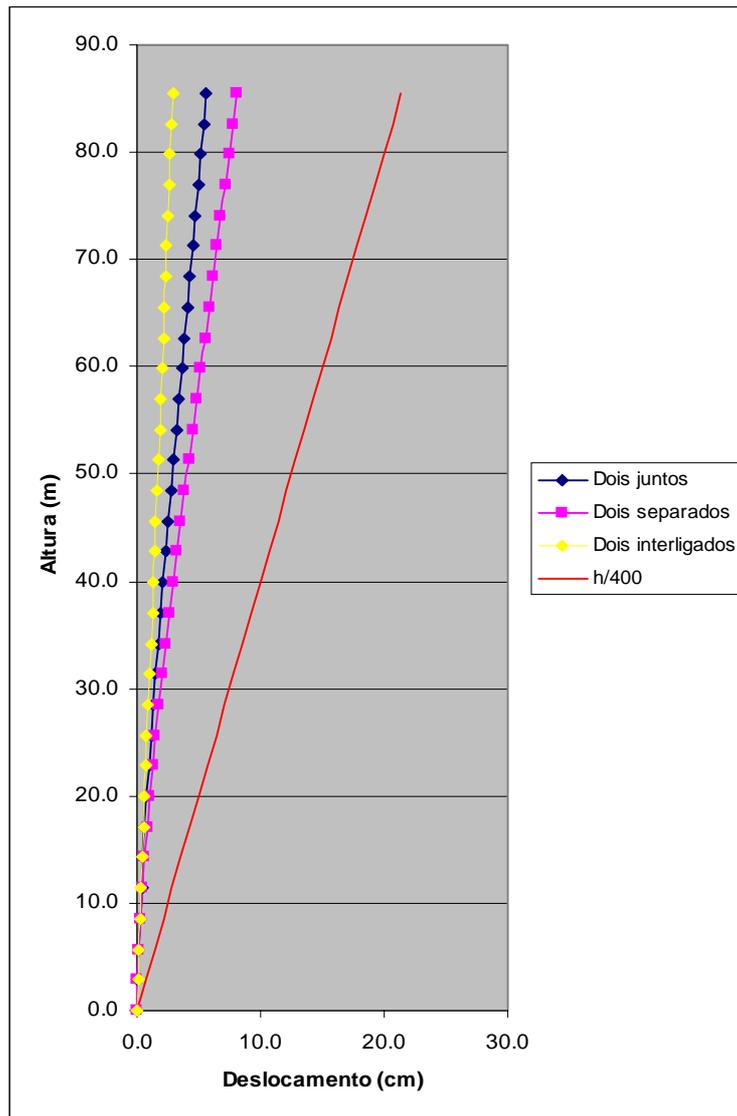


Figura IV.57 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 30 pavimentos para as três diferentes formas de associações dos contraventamentos

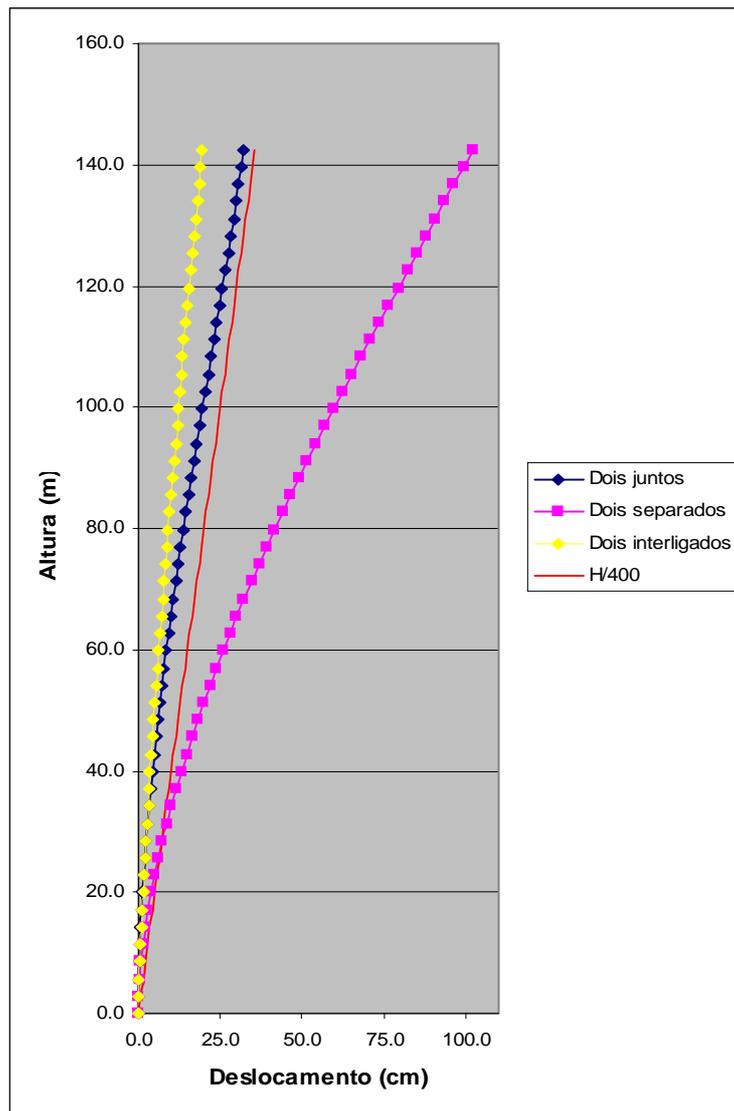


Figura IV.58 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos para as três diferentes formas de associações dos contraventamentos

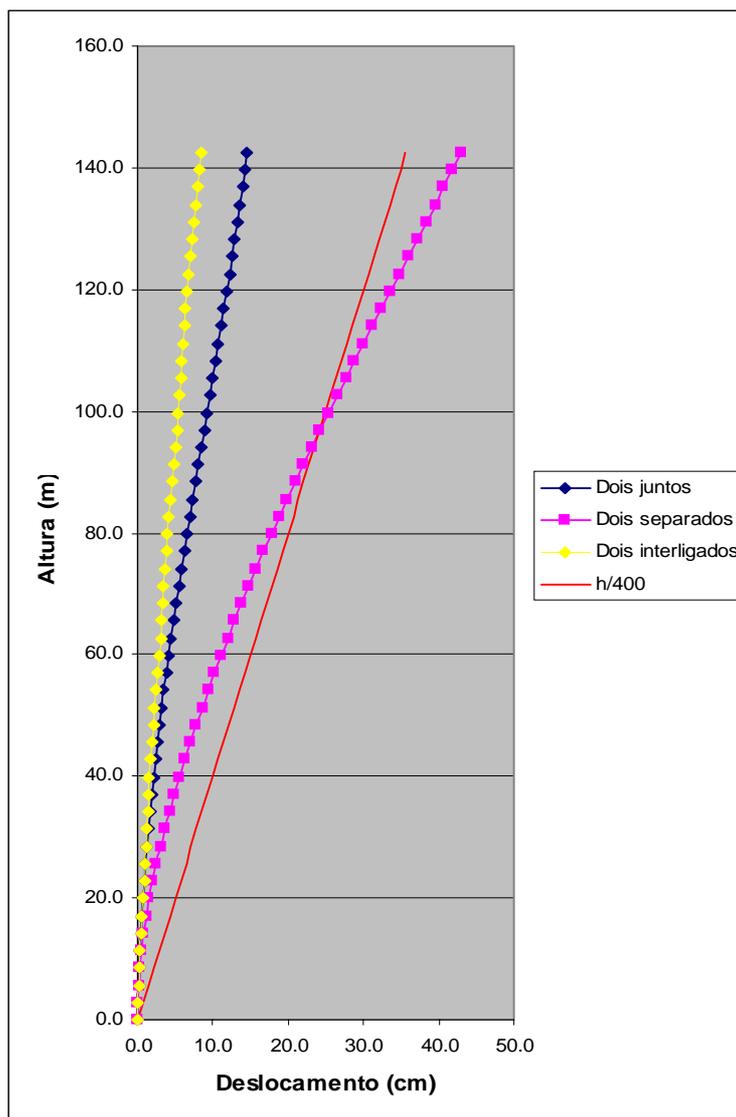


Figura IV.59 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos para as três diferentes formas de associações dos contraventamentos

O quadro IV.27 seguinte mostra a relação entre o deslocamento máximo “d” no topo da estrutura e a altura “H” da edificação, para as três diferentes associações de contraventamentos.

Quadro IV.25 - Relação entre o deslocamento no topo e a altura da edificação de 30 pavimentos

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contrav. juntos	Dois contrav. separados	Dois contrav. interligados
d / H	1/1182	1/454	1/1352

Quadro IV.26 - Relação entre o deslocamento no topo e a altura da edificação de 50 pavimentos

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contrav. juntos	Dois contrav. separados	Dois contrav. interligados
d / H	1/442	1/142	1/731

As ampliações para os deslocamentos, ou seja, a relação entre os deslocamentos obtidos de uma análise não linear geométrica e os deslocamentos obtidos de uma análise linear foram as seguintes:

Quadro IV.27 - Amplificações de deslocamentos para a edificação de 30 pavimentos

TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
Dois contrav. juntos	Dois contrav. separados	Dois contrav. interligados
1,081	1,125	1,043

Quadro IV.28 - Amplificações de deslocamentos para a edificação de 50 pavimentos

TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
Dois contrav. juntos	Dois contrav. separados	Dois contrav. interligados
1,189	1,279	1,065

Analisando os resultados anteriores percebe-se que a utilização de treliças isoladas, devido ao seu elevado índice de esbeltez, mostra-se pouco eficiente no combate aos esforços laterais, gerando, nesse sentido, grandes deslocamentos. As treliças de contraventamento utilizadas na edificação de 50 pavimentos, cuja esbeltez, ou seja, a relação entre a largura do contraventamento e sua altura, era superior a 17, quando utilizadas isoladamente mostraram-se totalmente inadequadas no que diz respeito ao impedimento dos deslocamentos laterais.

Estas mesmas treliças quando associadas lateralmente, formando um único treliçamento com o dobro da largura, obteve-se um alto ganho de rigidez lateral. Este

ganho de rigidez pode ser facilmente entendido devido ao comportamento destes contraventamentos como vigas em balanço. O momento de inércia de uma treliça (figura IV.60.a) pode ser estimado de maneira aproximada, através da seguinte expressão:

$$I_1 = 2 \cdot A_c \cdot (L/2)^2 = A_c \cdot L^2/2 \quad (\text{equação IV.1})$$

Onde,

A_c : é a área da seção transversal da coluna

L : é a largura da treliça

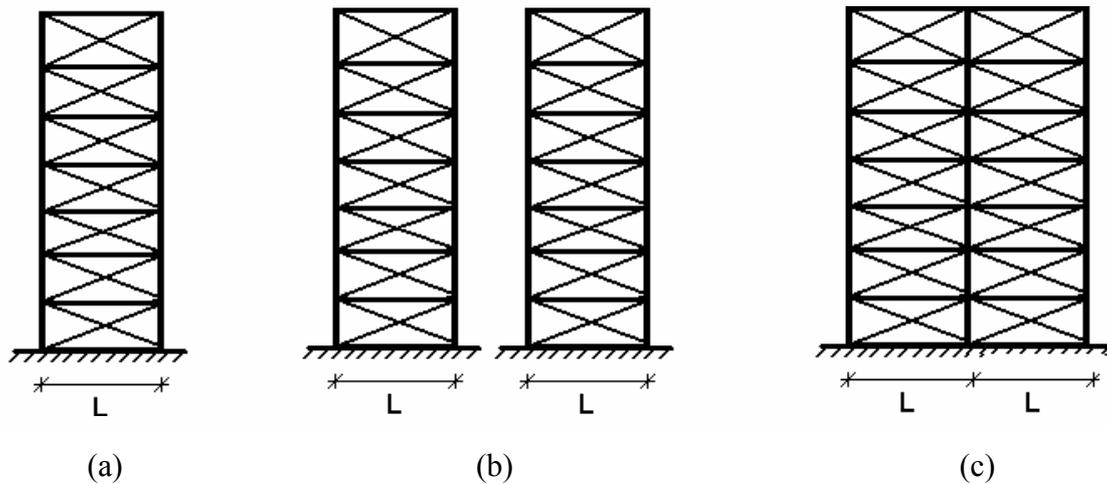


Figura IV.60 - Esquema de contraventamentos treliçados

No caso de se ter duas treliças trabalhando independentemente (figura IV.60.b), o momento de inércia do conjunto passa a ser o dobro, ou seja:

$$I_2 = 2 \cdot I_1 = A_c \cdot L^2 \quad (\text{equação IV.2})$$

No caso de se ter duas treliças unidas lateralmente (figura IV.60) o momento de inércia aproximado, desprezando-se a inércia da coluna central, pode ser obtido por:

$$I_3 = 2 \cdot A_c \cdot (2 \cdot L^2/2) = 2 \cdot A_c \cdot L^2 \quad (\text{equação IV.3})$$

Podemos assim verificar o sensível aumento na inércia à flexão do sistema de contraventamento, quando de união das treliças, de forma a se obter um único pano de contraventamento com o dobro da largura.

Embora tenha se obtido uma sensível diminuição dos deslocamentos laterais, com a utilização dos dois contraventamentos unidos lateralmente, nota-se que, para a

edificação com 50 pavimentos, os deslocamentos relativos entre pisos na direção “Y” (Apêndice III, quadro VI.23) extrapola em mais de 50% o limite imposto pela NBR-8800 [17], o que torna esta solução inapropriada.

No que diz respeito aos deslocamentos laterais relativos à base da edificação e aos deslocamentos relativos entre pisos, a associação de contraventamentos interligados por treliças horizontais mostrou-se de veras eficiente. As treliças horizontais proporcionaram uma considerável diminuição nos deslocamentos laterais da estrutura através da introdução de rotações em sentido contrário às rotações do núcleo treliçado (figura IV.61).

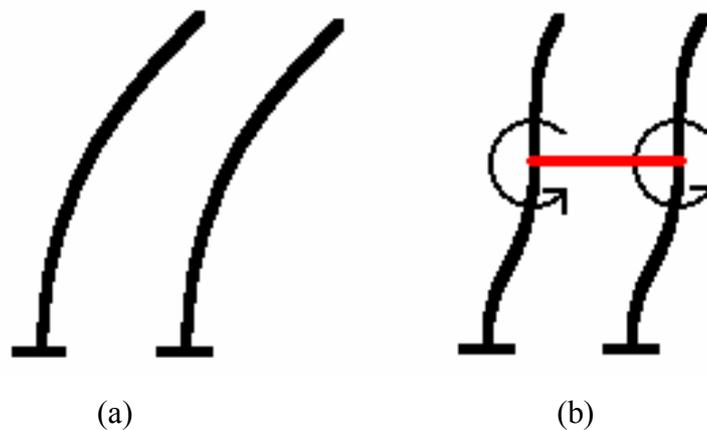


Figura IV.61 - Esquema da deformada de contraventamentos sem e com treliça horizontal

Os momentos fletores nos pilares quando da utilização das treliças horizontais podem ser visualizados através do gráfico da figura IV.62, a seguir.

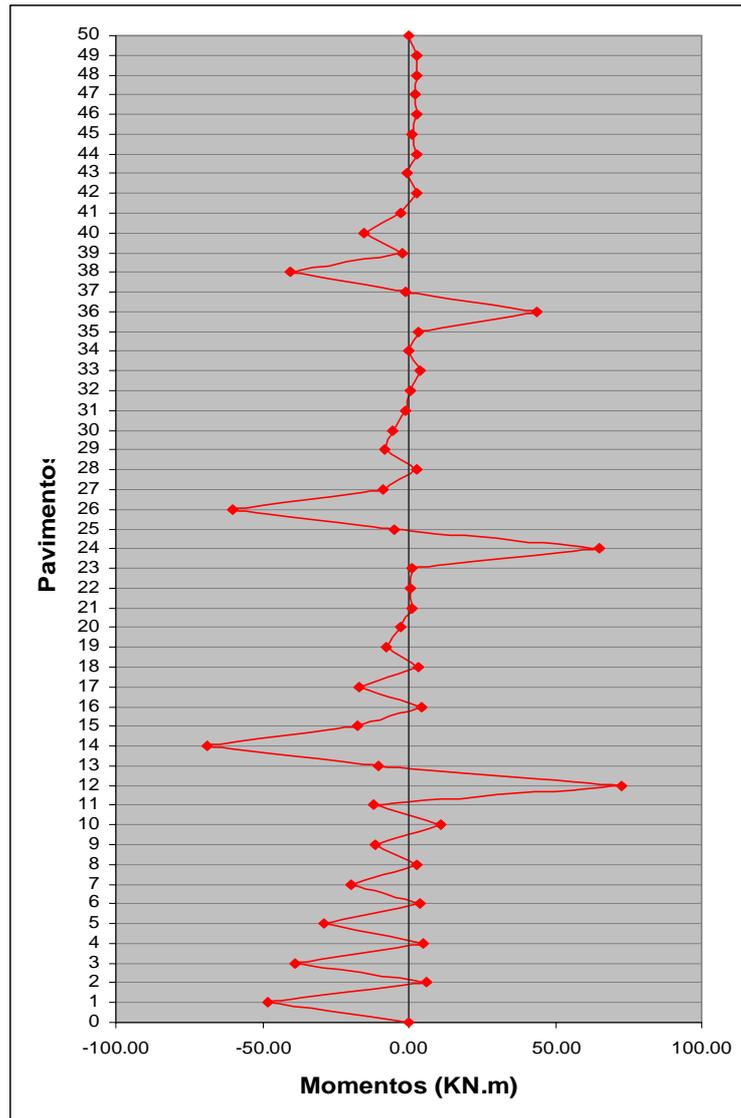


Figura IV.62 - Momentos fletores M_x não lineares geométricos, atuantes no pilar 23, na estrutura de 50 pavimentos, utilizando contraventamentos interligados

O melhor comportamento da estrutura com contraventamentos interligados, no que diz respeito às restrições aos deslocamentos pode também ser aferido através da relação entre deslocamento máximo no topo da estrutura e a altura da edificação (quadros IV.25 e IV.26), onde apresentou reduções nos deslocamentos laterais de até 80% ou mais daqueles produzidos pelos outros tipo de associação.

Quanto às ampliações dos deslocamentos (quadro IV.27 e IV.28), quando da análise da estrutura em teoria de segunda ordem, mostrou também o comportamento privilegiado do contraventamento interligado por treliças horizontais.

4.4.2. VERIFICAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

Através da análise dinâmica da estrutura obtivemos as seguintes frequências naturais, correspondentes à translação segundo os eixos X e Y respectivamente:

Quadro IV.29 - Frequência natural da estrutura de 30 pavimentos segundo translação nos eixos X e Y

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contrav. juntos	Dois contrav. separados	Dois contrav. interligados
f_1 (Hz)	0,2659	0,2217	0,3521
f_2 (Hz)	0,2421	0,1972	0,2976

Quadro IV.30 - Frequência natural da estrutura de 50 pavimentos segundo translação nos eixos X e Y

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contrav. juntos	Dois contrav. separados	Dois contrav. interligados
f_1 (Hz)	0,1132	0,1218	0,1988
f_2 (Hz)	0,0977	0,1097	0,1668

Os deslocamentos laterais da estrutura, obtidos para as forças devidas ao vento utilizando um período de recorrência de 10 anos, foram os seguintes:

Quadro IV.31 - Deslocamento da estrutura de 30 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contrav. juntos	Dois contrav. separados	Dois contrav. interligados
Deslocamento em X (cm)	2,53	3,65	1,81
Deslocamento em Y (cm)	3,06	8,50	2,64

Quadro IV.32 - Deslocamento da estrutura de 50 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contrav. juntos	Dois contrav. separados	Dois contrav. interligados
Deslocamento em X (cm)	5,93	19,11	3,79
Deslocamento Em Y(cm)	10,64	46,13	8,97

De posse dos valores das frequências naturais das estruturas e dos seus deslocamentos, foi possível, com o auxílio da equação III.1, fornecida pela NBR-8800, calcular a amplitude máxima da aceleração, resultando nos valores a seguir apresentados (quadro IV.33 e IV.34):

Quadro IV.33 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 30 pavimentos

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contrav. juntos	Dois contrav. separados	Dois contrav. interligados
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0706	0,0708	0,0891
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,0708	0,1317	0,0923

Quadro IV.34 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 50 pavimentos

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contrav. juntos	Dois contrav. separados	Dois contrav. interligados
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0299	0,1119	0,0591
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,0403	0,2206	0,0985

Através da análise dos resultados acima, podemos observar que a estrutura formada por treliças separadas, não atende os critérios estabelecidos pela NBR-8800 [17] no que diz respeito ao conforto dos usuários, apresentando valores superiores inclusive ao dobro do permitido para a amplitude máxima da aceleração. As outras formas de associação de contraventamentos analisadas apresentaram amplitudes máximas de aceleração compatíveis com o estabelecido pela NBR-8800[17].

4.4.3. CONSUMO DE AÇO

Os perfis obtidos para as estruturas de 30 pavimentos, estão apresentados no quadro IV.35 abaixo.

Quadro IV.35 - Perfis utilizados na edificação com 30 pavimentos

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contraventamentos juntos	Dois contraventamentos separados	Dois contraventamentos interligados
Colunas - 1	CS 550x368	CS 550x368	CS 550x368
Colunas - 2	CS 550x345	CS 550x345	CS 550x345
Colunas - 3	CS 550x228	CS 550x228	CS 550x228
Colunas - 4	CS 550x228	CS 550x228	CS 550x228
Colunas - 5	CS 550x228	CS 550x228	CS 550x228
Contraventamento - 1	HP 250x62	HP 250x62	HP 250x73
Contraventamento - 2	HP 250x62	HP 250x62	HP 250x62
Contraventamento - 3	HP 200x53	HP 200x53	HP 250x62
Contraventamento - 4	HP 200x46	HP 200x46	HP 200x53
Contraventamento - 5	HP 200x35	HP 200x35	HP 200x35
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75	VS 550X75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51	VS 450X51

Os perfis resultantes da análise, para as estruturas de 50 pavimentos de altura estão apresentados no quadro IV.36 a seguir.

Quadro IV.36 - Perfis utilizados na edificação com 30 pavimentos

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contraventamentos juntos	Dois contraventamentos Separados	Dois contraventamentos Interligados
Colunas - 1	CS 650x823*	CS 650x823*	CS 650x693*
Colunas - 2	CS 650x588	CS 650x823*	CS 650x496
Colunas - 3	CS 650x395	CS 650x525	CS 650x395
Colunas - 4	CS 650x305	CS 650x305	CS 650x305
Colunas - 5	CS 650x305	CS 650x305	CS 650x305

Contraventamento - 1	CS 500x194	CS 500x221	CS 500x194
Contraventamento - 2	CS 450x154	CS 450x154	CS 500x172
Contraventamento - 3	CS 350x119	CS 400x128	CS 400x165
Contraventamento - 4	CS 350x93	CS 300x95	CS 350x128
Contraventamento - 5	CS 250x52	CS 300x62	CS 250x52
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75	VS 550X75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51	VS 450X51

* Não padronizado

Os respectivos consumos de aço obtidos para cada grupo de elementos estruturais estão apresentados a seguir.

Quadro IV.37 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 30 pavimentos (Ton)

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contraventamentos Juntos	Dois contraventamentos separados	Dois contraventamentos interligados
Colunas	547,93	547,93	547,93
Contraventamento	125,60	125,60	161,69
Vigas	692,20	692,20	692,20
Consumo total de aço (Ton)	1365,73	1365,73	1401,82

Quadro IV.38 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 50 pavimentos (Ton)

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contraventamentos Juntos	Dois contraventamentos separados	Dois contraventamentos interligados
Colunas	1578,94	1817,64	1433,41
Contraventamento	493,53	539,14	641,29
Vigas	1150,05	1150,05	1150,05
Consumo total de aço (Ton)	3222,52	3506,83	3324,75

Quadro IV.39 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 30 pavimentos

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contraventamentos juntos	Dois contraventamentos separados	Dois contraventamentos interligados
Consumo de aço (kg/m ²)	52,62	52,62	54,00

Quadro IV.40 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 50 pavimentos

	TIPO DE ASSOCIAÇÃO		
	Dois contraventamentos juntos	Dois contraventamentos separados	Dois contraventamentos interligados
Consumo de aço (kg/m ²)	74,61	81,19	74,65

Os gráficos das figuras IV.63 e IV.64 ilustram um comparativo do consumo de aço por metro quadrado para as diferentes formas de associação de contraventamentos.

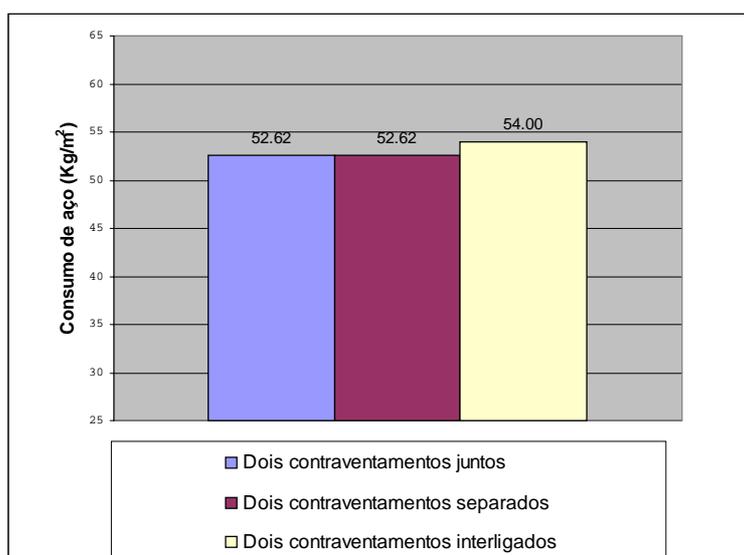


Figura IV.63 - Consumo comparativo de aço por metro quadrado da estrutura de 30 pavimentos utilizando diferentes associações de contraventamento

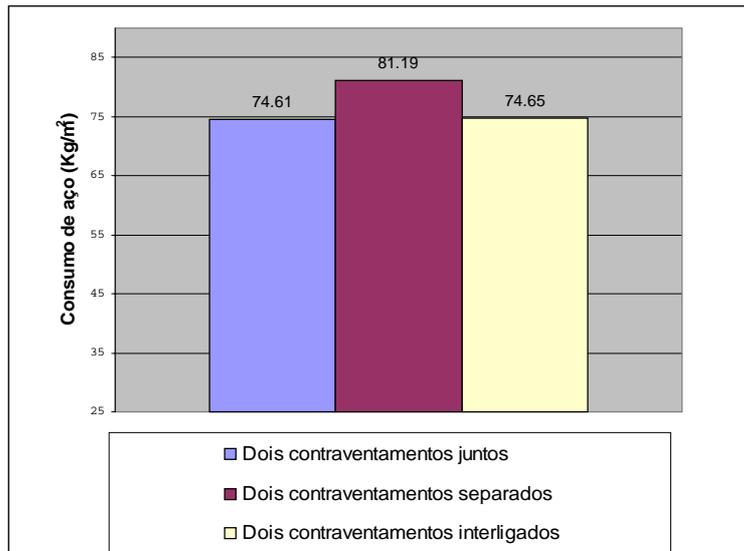


Figura IV.64 - Consumo comparativo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos utilizando diferentes associações de contraventamento

Pode-se perceber que o contraventamento formado por treliças separadas perde sua eficiência à medida que a edificação adquire altura, apresentando não apenas maiores deslocamentos laterais, mas também maiores consumos de aço estrutural, além, é claro, de desconforto aos usuários.

A estrutura cujo contraventamento é formado por duas treliças juntas foi a que apresentou o menor consumo de aço tanto para a edificação de 50 pavimentos quanto para a edificação de 30 pavimentos. No entanto, esta solução de contraventamento não atendeu aos critérios da NBR-8800 [17], no que trata de deslocamentos entre pavimentos, para a edificação com 50 andares, o que a torna inapropriada.

A estrutura com contraventamento formado por treliças interligadas, embora tenha apresentado um maior consumo de aço para a estrutura de 30 pavimentos, apresentou um consumo de aço bastante competitivo para a estrutura de 50 pavimentos, além do fato de atender a todos os requisitos impostos pela Norma brasileira analisados neste trabalho. Isto indica que os sistemas de resistência a cargas laterais formados por treliças interligadas é uma excelente solução para as edificações.

4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS QUANTO AO POSICIONAMENTO DOS CONTRAVENTAMENTOS EM RELAÇÃO AO CENTRO DE ROTAÇÃO DA EDIFICAÇÃO

Os resultados obtidos da análise de estrutura com 50 andares utilizando três diferentes posicionamentos para os contraventamentos em relação ao centro de rotação da edificação estão apresentados a seguir.

4.5.1. DESLOCAMENTOS LATERAIS

4.5.1.1. Estruturas com contraventamentos posicionados nas fachadas

A estrutura de 50 pavimentos, cujos contraventamentos foram posicionados nas fachadas da edificação apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.65 e IV.66):

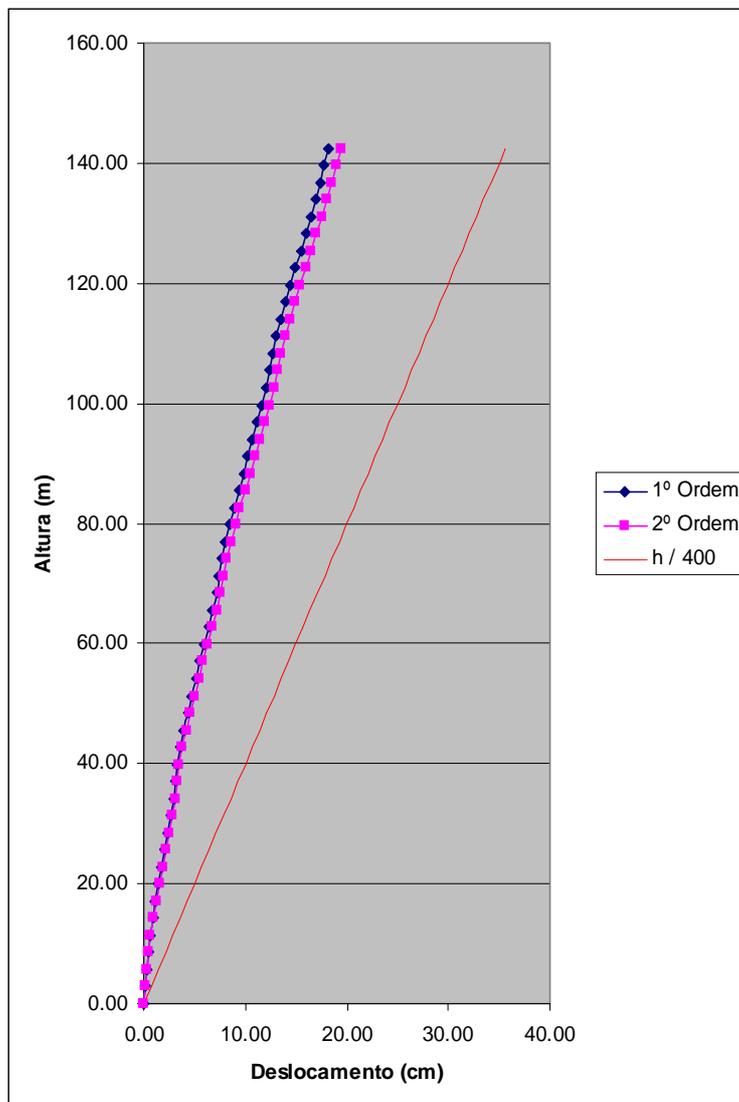


Figura IV.65 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura com todos os contraventamentos nas fachadas

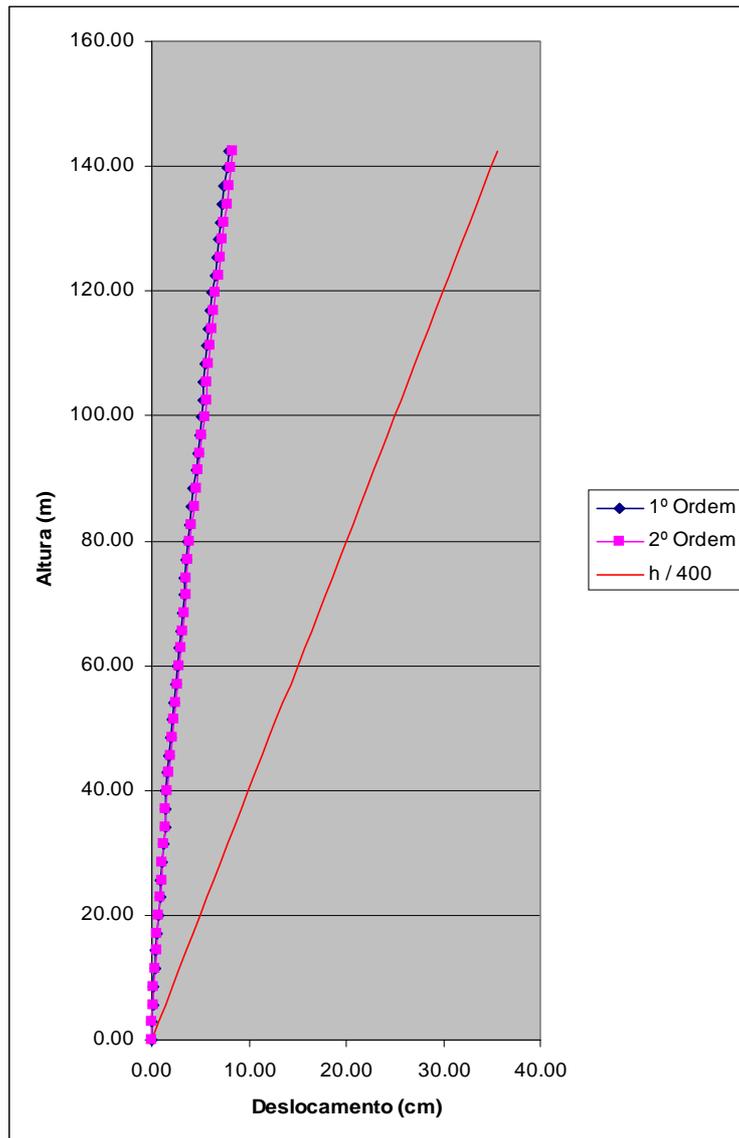


Figura IV.66 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura com todos os contraventamentos nas fachadas

4.5.1.2. Estrutura com contraventamentos na direção "Y" posicionados internamente e contraventamentos na direção "X" posicionados na fachada

Os deslocamentos das estruturas de 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram posicionados na fachada na direção "X" e internamente na direção "Y", estão apresentados nas figuras IV.67 e IV.68:

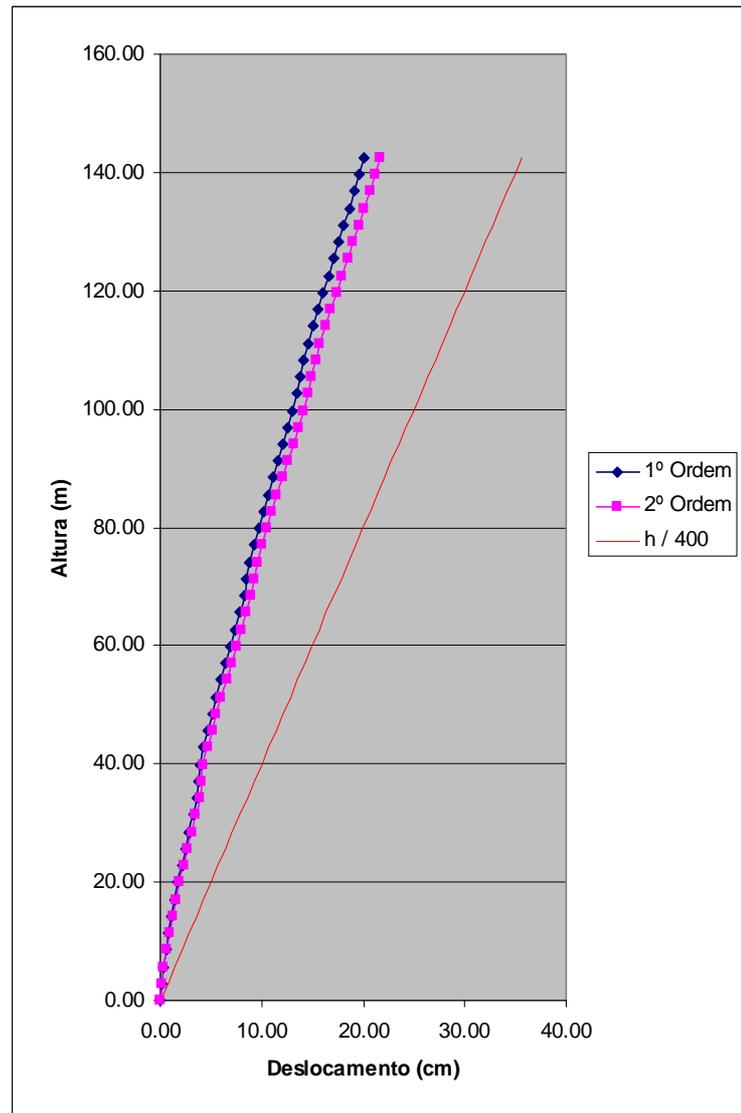


Figura IV.67 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos posicionados na fachada na direção "X" e internamente na direção "Y"

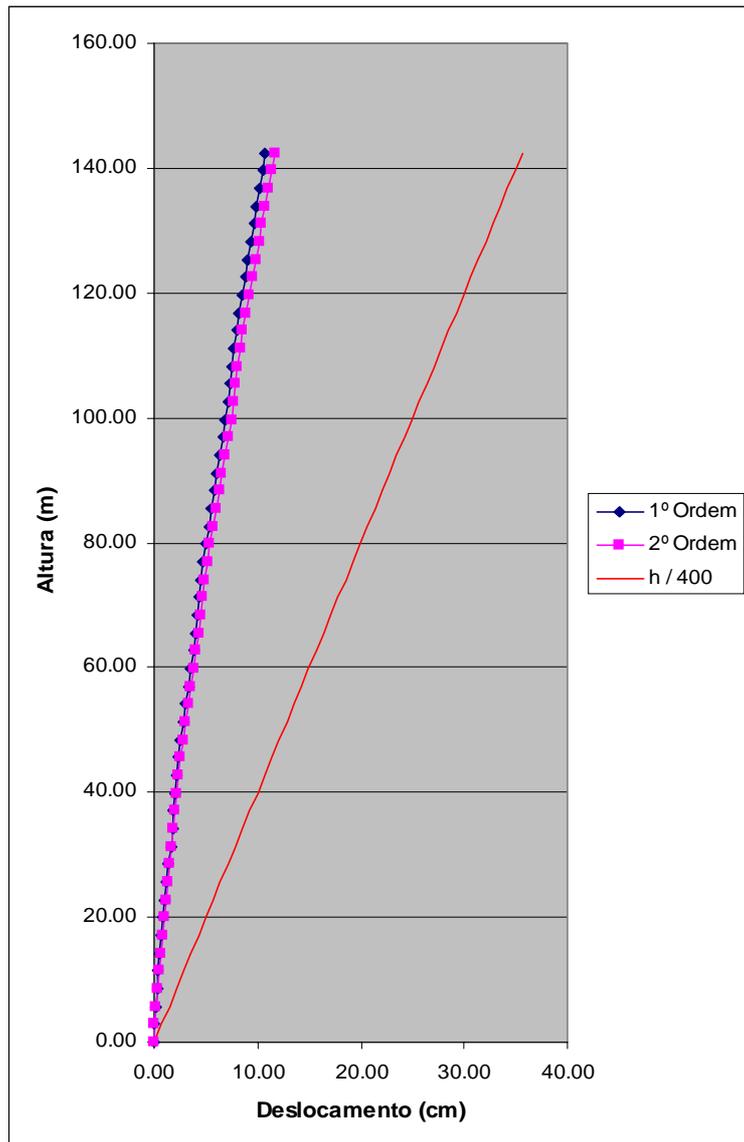


Figura IV.68 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos posicionados na fachada na direção "X" e internamente na direção "Y"

4.5.1.3. Estruturas com contraventamentos internos

Os deslocamentos das estruturas de 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento, tanto na direção "X" quanto na direção "Y" foram posicionadas internamente, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.69 e IV.70):

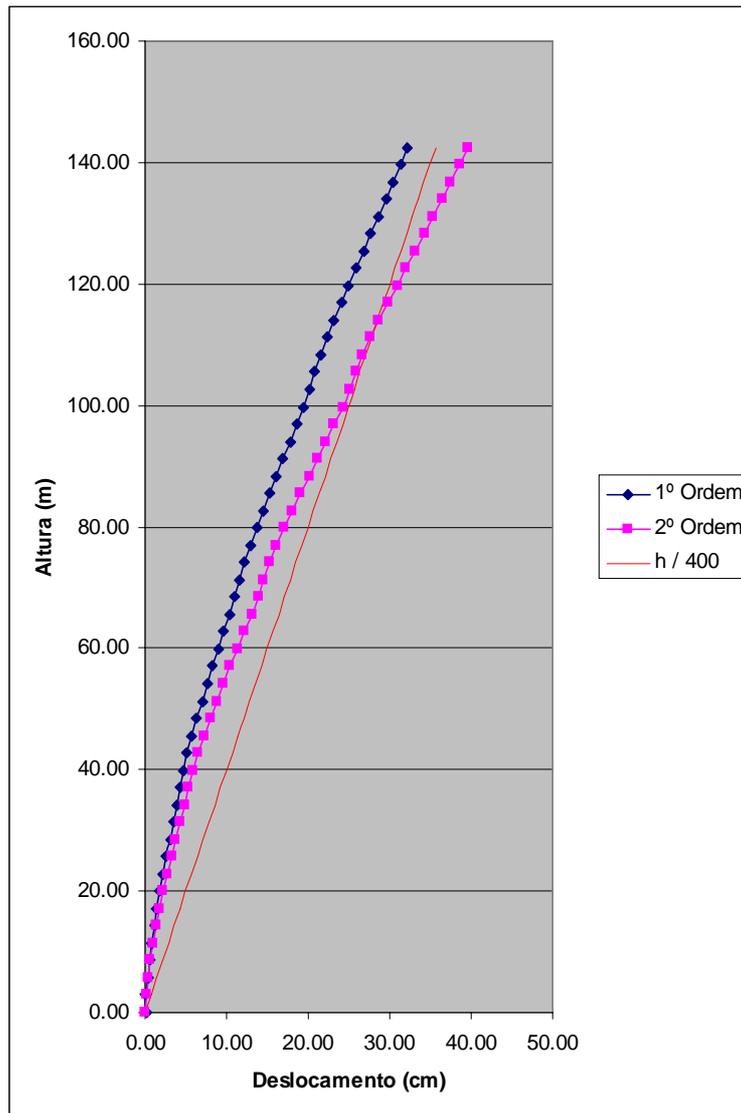


Figura IV.69 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com todos os contraventamentos internos

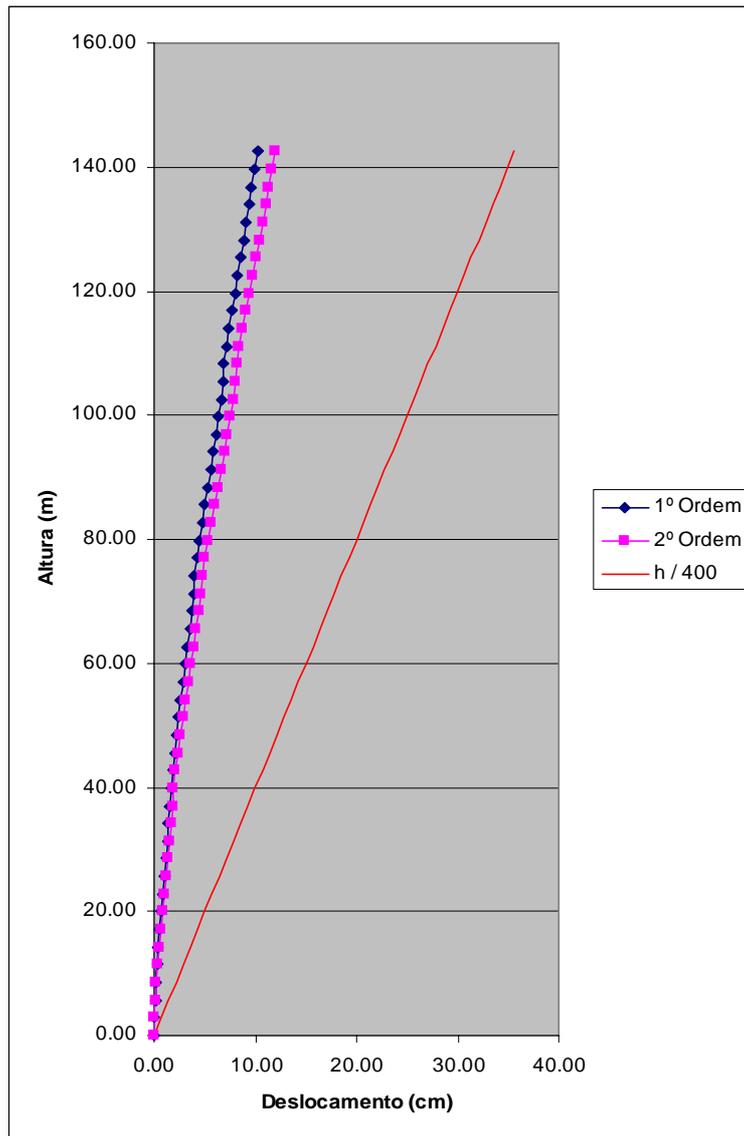


Figura IV.70 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com todos os contraventamentos internos

4.5.1.4. Análise comparativa dos deslocamentos para os diferentes posicionamentos em relação ao centro de rotação da edificação

As figuras IV.71 e IV.72 abaixo apresentam um comparativo quanto aos deslocamentos laterais entre as três situações do posicionamento do contraventamento em relação ao centro de rotação do edifício.

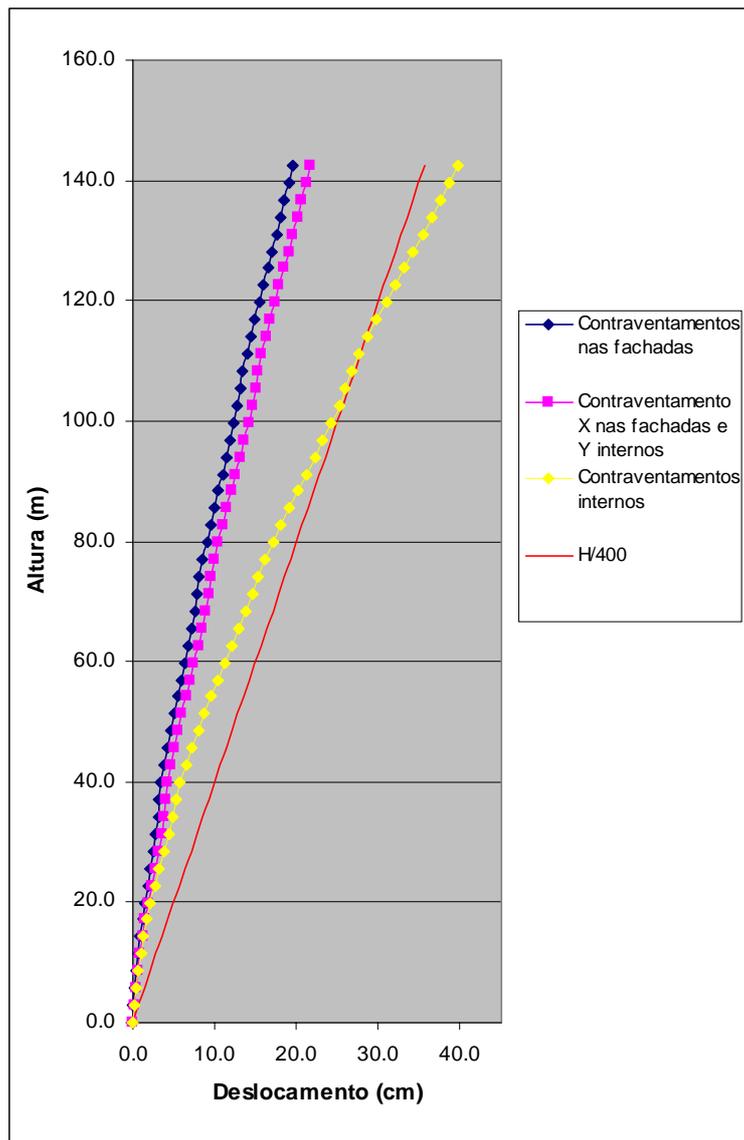


Figura IV.71 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para os diferentes posicionamentos de contraventamento em relação ao C.G. da estrutura

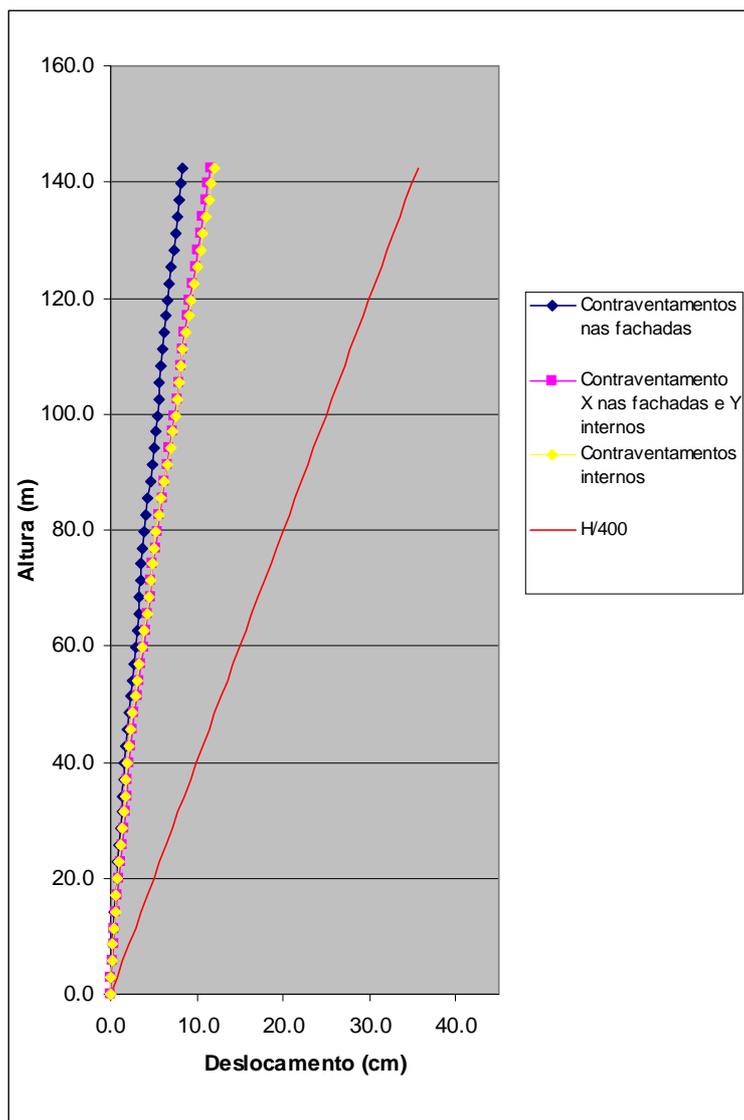


Figura IV.72 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para os diferentes posicionamentos de contraventamento em relação ao C.G. da estrutura

Os quadros IV.41 e IV.42 abaixo mostram a relação entre o deslocamento máximo "d" no topo da estrutura e a altura "H" da edificação, para os três diferentes posicionamentos dos contraventamentos em relação ao centro de rotação da estrutura.

Quadro IV.41 - Relação entre o deslocamento no topo de estrutura e a altura da edificação

	POSIÇÃO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamentos na fachada	Contraventamento em "X" na fachada e em "Y" interno	Contraventamentos internos
d / H	1/731	1/657	1/359

As amplificações para os deslocamentos, definidas como a relação entre os deslocamentos obtidos de uma análise não linear geométrica e os deslocamentos obtidos de uma análise linear foram as seguintes (quadro IV.42):

Quadro IV.42 - Amplificações de deslocamentos na direção Y

POSICIÓN DO CONTRAVENTAMENTO		
Contraventamentos na fachada	Contraventamento em "X" na fachada e em "Y" interno	Contraventamentos internos
1,065	1,080	1,233

Com base nos resultados mostrados acima se pode perceber que o posicionamento dos sistemas de contraventamento em relação ao centro de rotação da estrutura é de grande importância na absorção das cargas laterais. Mesmo em se tratando de uma estrutura simétrica, como no caso em estudo, as excentricidades da força do vento, originadas pelos efeitos de vizinhança ou pelo vento agindo obliquamente à face da edificação, originam esforços de torção que se tornam mais importantes à medida que a edificação adquire altura.

Como se sabe, o momento de torção será equilibrado por forças horizontais, desenvolvidas em cada treliça de contraventamento, diretamente proporcionais à rigidez e à distância de cada uma delas ao centro de rotação da estrutura.

A intensidade das forças horizontais que agem nos contraventamentos pode ser determinada através das clássicas expressões:

$$R_x = M \cdot y / \Sigma r^2 \quad (\text{equação IV.4})$$

$$R_y = M \cdot x / \Sigma r^2 \quad (\text{equação IV.5})$$

Podemos desta forma perceber que as forças horizontais devidas ao vento são absorvidas tanto pelos contraventamentos posicionados paralelamente ao sentido de atuação destas forças, quanto pelos perpendiculares ao sentido de atuação desta força. Este comportamento pode ser verificado através do quadro IV.41, onde a estrutura teve um substancial acréscimo nos deslocamentos laterais na direção "Y", devido à modificação dos contraventamentos posicionados na direção "X".

As ampliações dos deslocamentos de primeira e segunda ordem também são maiores à medida que as treliças se aproximam do centro de rotação da estrutura.

4.5.2. VERIFICAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

Através da análise dinâmica da estrutura obtivemos as seguintes frequências naturais, correspondentes à translação segundo os eixos X e Y respectivamente:

Quadro IV.43 - Frequência natural da estrutura segundo translação nos eixos X e Y

	POSIÇÃO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamentos na fachada	Contraventamento em "X" na fachada e em "Y" interno	Contraventamentos internos
f_1 (Hz)	0,1988	0,2141	0,1825
f_2 (Hz)	0,1668	0,2067	0,1164

Os deslocamentos laterais da estrutura, obtidos para as forças devidas ao vento com um período de recorrência de 10 anos, foram os seguintes:

Quadro IV.44 - Deslocamento da estrutura de 50 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	POSIÇÃO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamentos na fachada	Contraventamento em "X" na fachada e em "Y" interno	Contraventamentos internos
Deslocamento em X (cm)	3,79	5,29	5,44
Deslocamento em Y (cm)	8,97	9,99	18,24

De posse dos valores das frequências naturais das estruturas e dos seus deslocamentos, foi possível, com o auxílio da equação III.1, fornecida pela NBR-8800, calcular a amplitude máxima da aceleração, resultando nos seguintes valores:

Quadro IV.45 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 50 pavimentos

	POSIÇÃO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamentos na fachada	Contraventamento em "X" na fachada e em "Y" interno	Contraventamentos internos
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0591	0,0957	0,0715
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,0985	0,1684	0,0976

Quanto à verificação da amplitude máxima da aceleração, a estrutura com contraventamentos mais afastados do centro de rotação da estrutura obtiveram melhores resultados, atendendo ao limite imposto pela NBR-8800 [17].

4.5.3. CONSUMO DE AÇO

Os perfis obtidos para as estruturas com diferentes posições do contraventamento em relação ao centro de rotação, estão apresentados no quadro IV.46 abaixo.

Quadro IV.46 - Perfis utilizados na edificação com 50 pavimentos

	POSIÇÃO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento na fachada	Contraventamento em "X" na fachada e em "Y" interno	Contraventamentos internos
Colunas - 1	CS 650x693*	CS 650x693*	CS 650x823*
Colunas - 2	CS 650x496	CS 650x496	CS 650x588
Colunas - 3	CS 650x395	CS 650x395	CS 650x395
Colunas - 4	CS 650x305	CS 650x305	CS 650x305
Colunas - 5	CS 650x305	CS 650x305	CS 650x305
Contraventamento - 1	CS 500x194	CS 500x207	CS 550x279
Contraventamento - 2	CS 500x172	CS 400x185	CS 550x250
Contraventamento - 3	CS 400x165	CS 400x146	CS 500x221
Contraventamento - 4	CS 350x128	CS 350x135	CS 500x207
Contraventamento - 5	CS 250x52	CS 300x76	CS 300x76
Vigas principais	VS 550X75	VS 550X75	VS 550X75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450X51	VS 450X51

* Não padronizado

Os respectivos consumos de aço obtidos para cada grupo de elementos estruturais estão apresentados a seguir.

Quadro IV.47 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 50 pavimentos (Ton)

	POSIÇÃO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento na fachada	Contraventamento em "X" na fachada e em "Y" interno	Contraventamentos internos
Colunas	1433,41	1433,41	1578,94
Contraventamento	641,29	673,57	900,86
Vigas	1150,05	1150,05	1150,05
Consumo total de aço (Ton)	3225,21	3259,49	3635,74

Quadro IV.48 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 50 pavimentos

	POSIÇÃO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento na fachada	Contraventamento em "X" na fachada e em "Y" interno	Contraventamentos internos
Consumo de aço/m ²	74,65	75,45	84,16

O gráfico da figuras IV.73 ilustra o consumo de aço para as diferentes posições de contraventamento por metro quadrado de estrutura.

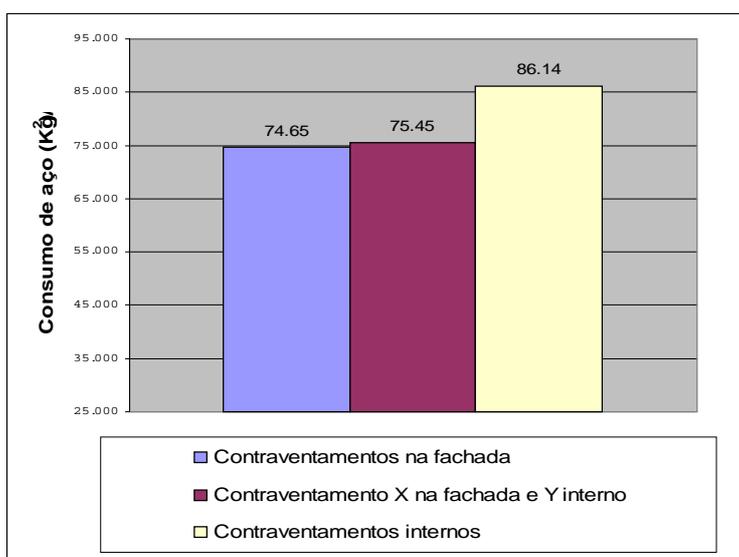


Figura IV.73 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos para as diferentes posições de contraventamentos em relação ao C.G da estrutura.

Como se pode verificar o consumo de aço também cresce à medida que as treliças de contraventamento se aproximam do centro de rotação da estrutura (que coincide com o centro de rotação do sistema de contraventamento). O maior consumo de aço se deve aos maiores esforços impostos às treliças de contraventamento necessários para absorver a torção no edifício.

4.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS QUANTO À ESBELTEZ DO CONTRAVENTAMENTO

A análise da esbeltez do sistema de contraventamento foi realizada para a estrutura 50 pavimentos, e os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

4.6.1. DESLOCAMENTOS LATERAIS

4.6.1.1. Contraventamento em único vão

A estrutura de 50 pavimentos, cujo sistema de contraventamento foi formado por treliçamentos ao longo de um único vão da estrutura em toda a sua altura, apresentou os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.74 e IV.75):

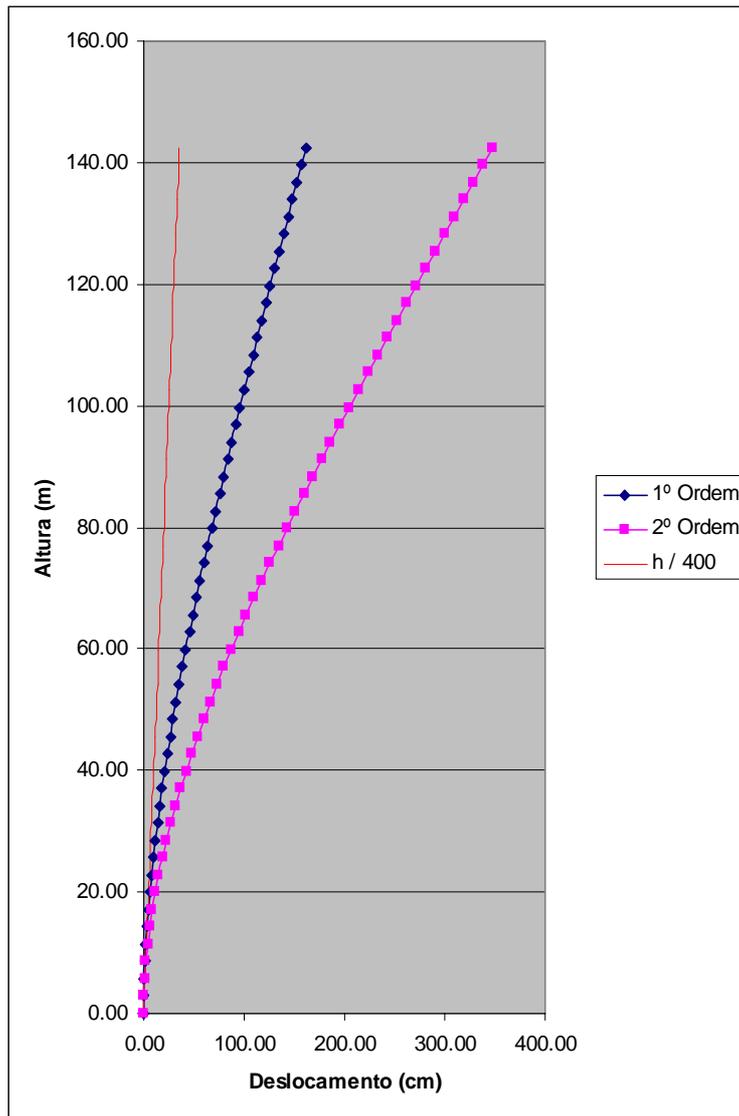


Figura IV.74 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos com um vão de largura

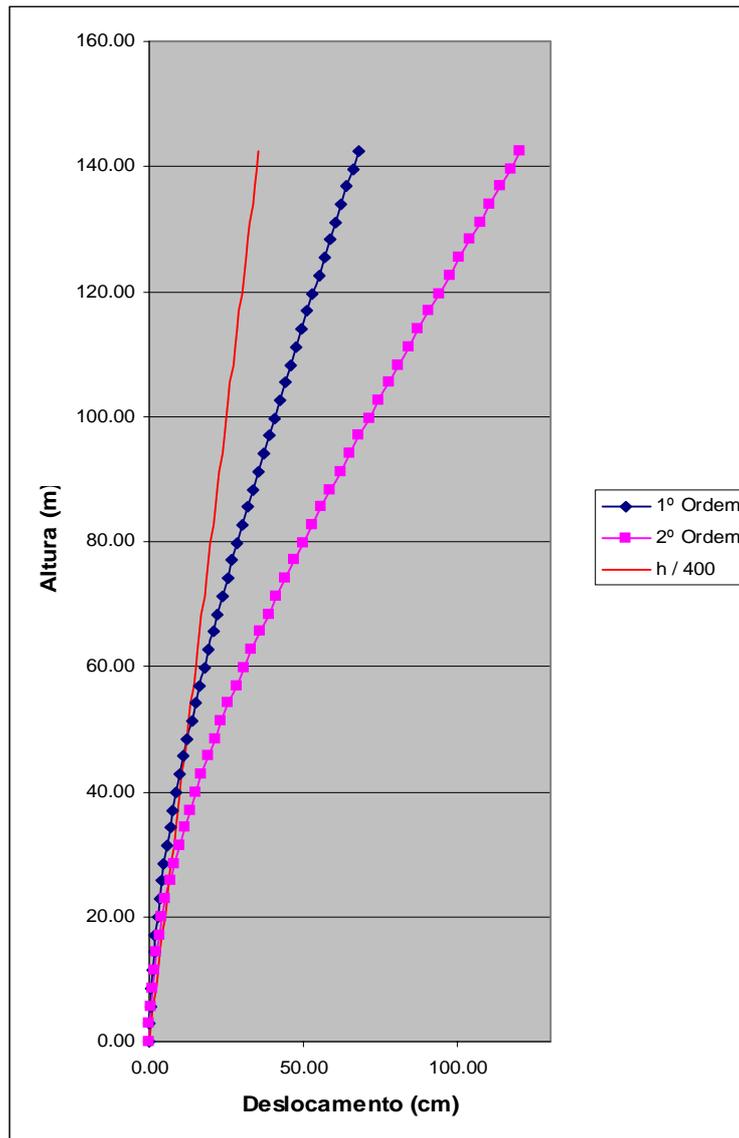


Figura IV.75 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos com um vão de largura

4.6.1.2. Contraventamento com dois vãos de largura

As estruturas de 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por treliças com dois vãos de largura, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.76 e IV.77):

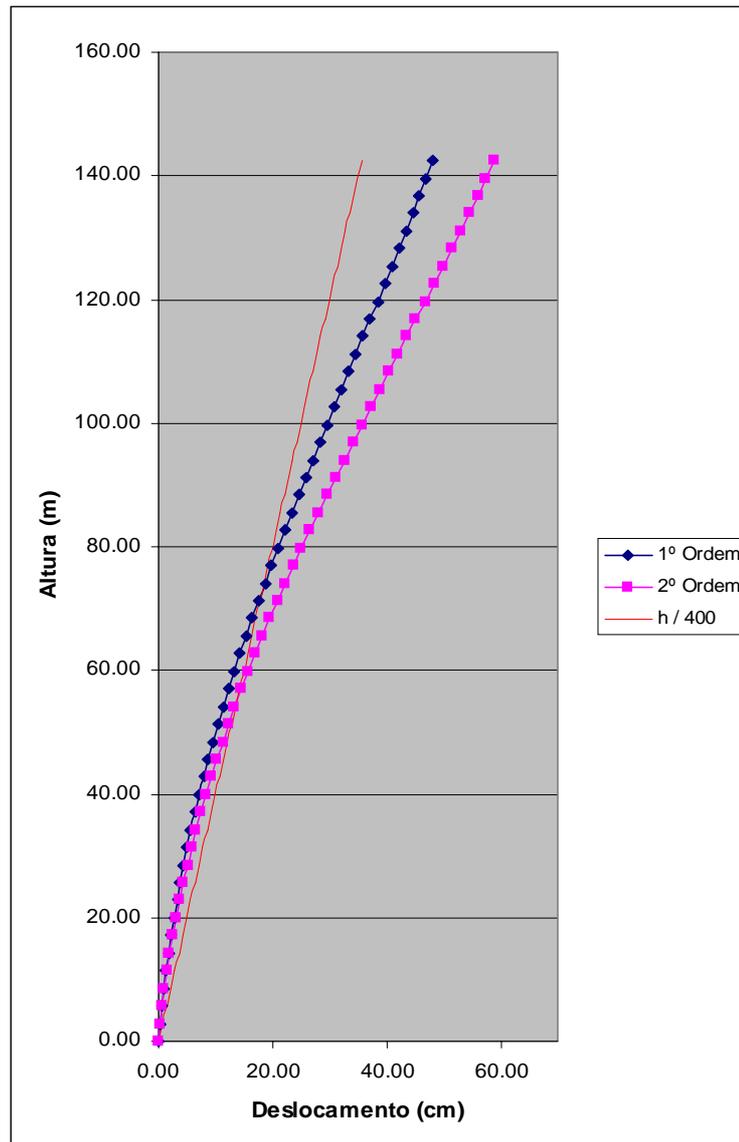


Figura IV.76 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com dois vãos de largura

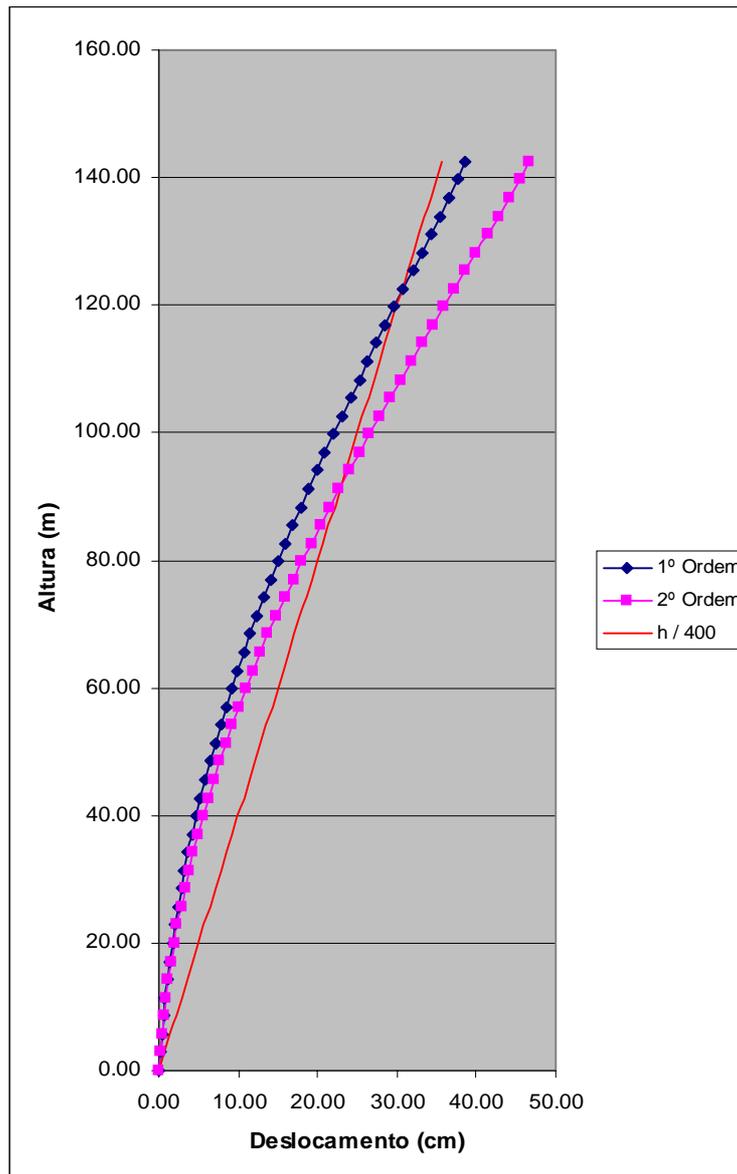


Figura IV.77 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com dois vãos de largura

4.6.1.3. Contraventamento com três vãos de largura

As estruturas de 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por uma treliça com largura de três vãos, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.78 e IV.79):

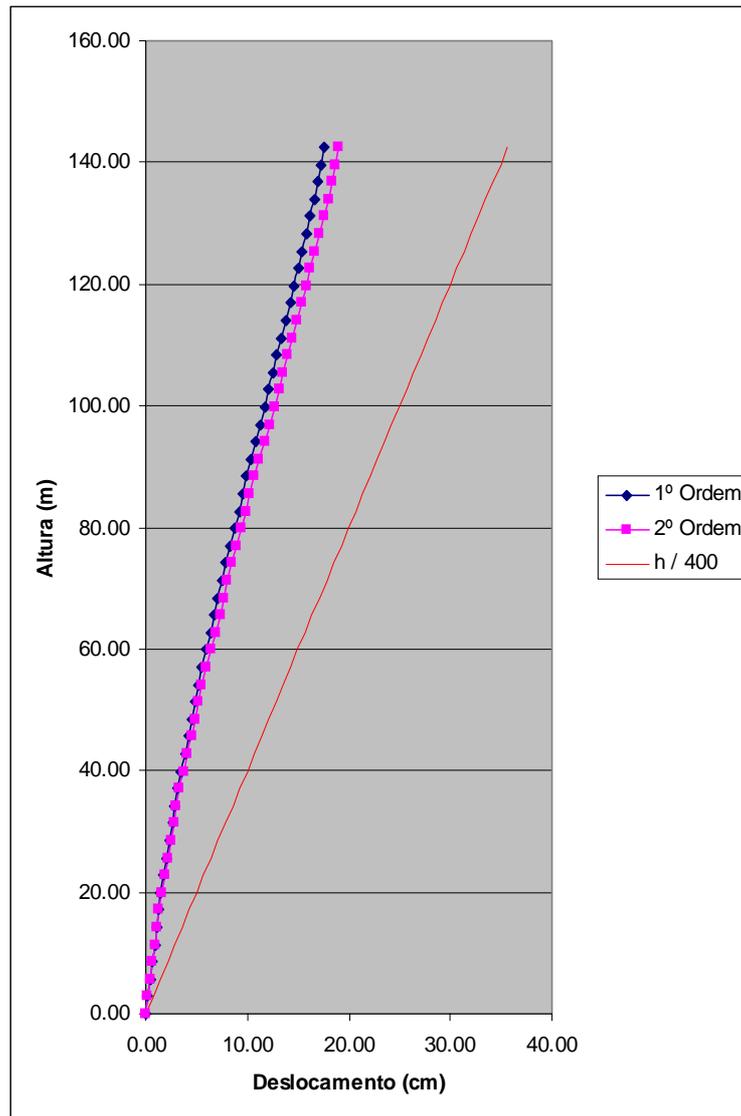


Figura IV.78 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com três vãos de largura

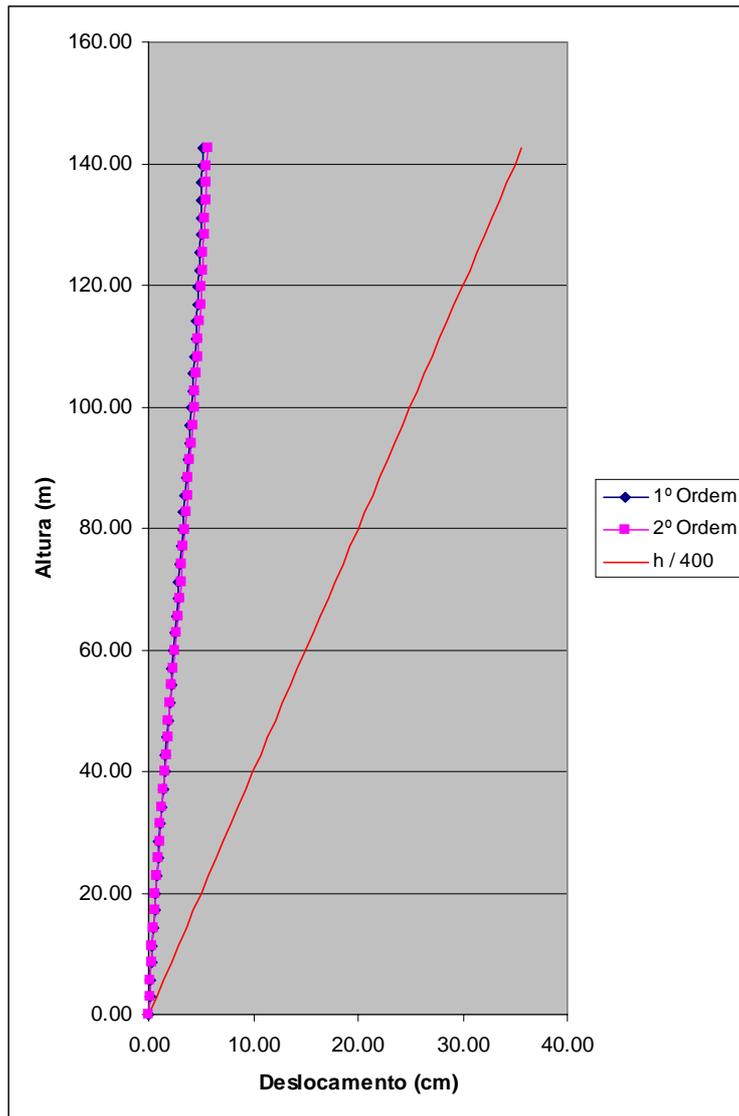


Figura IV.79 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com três vãos de largura

4.6.1.4. Análise comparativa dos deslocamentos para os contraventamentos com diferentes valores de esbeltez

As figuras IV.80 e IV.81 abaixo apresentam um comparativo dos deslocamentos laterais entre os contraventamentos com diferentes valores de esbeltez.

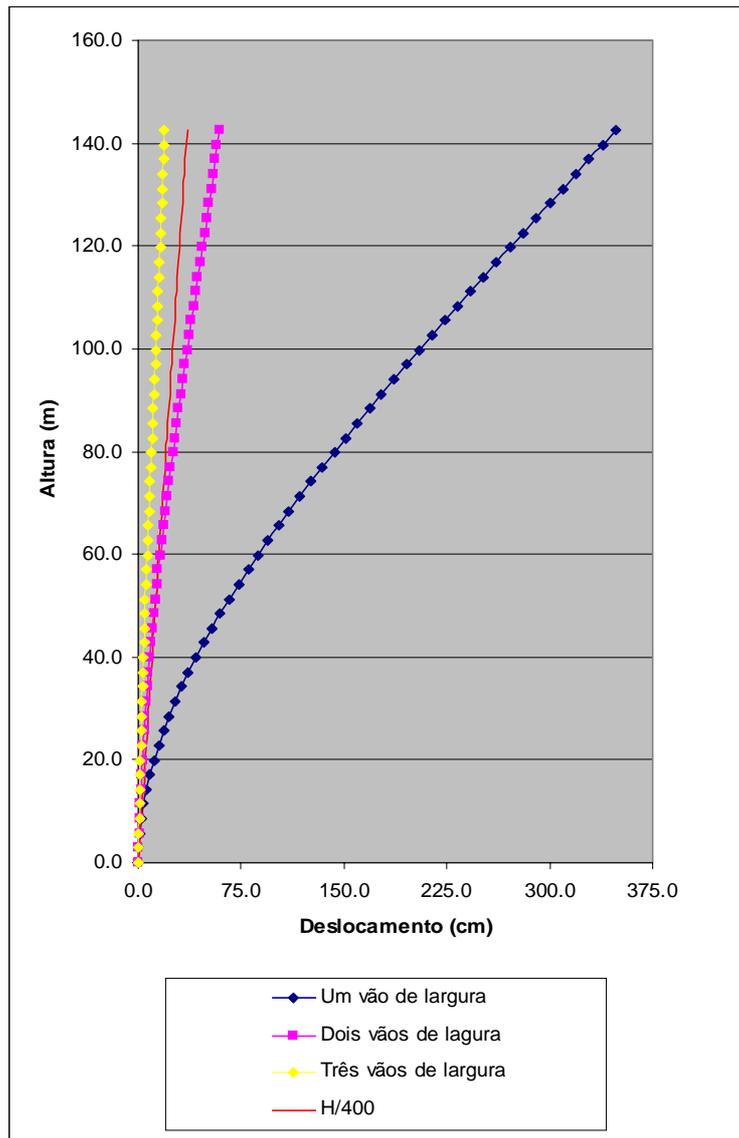


Figura IV.80 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes valores de esbeltez

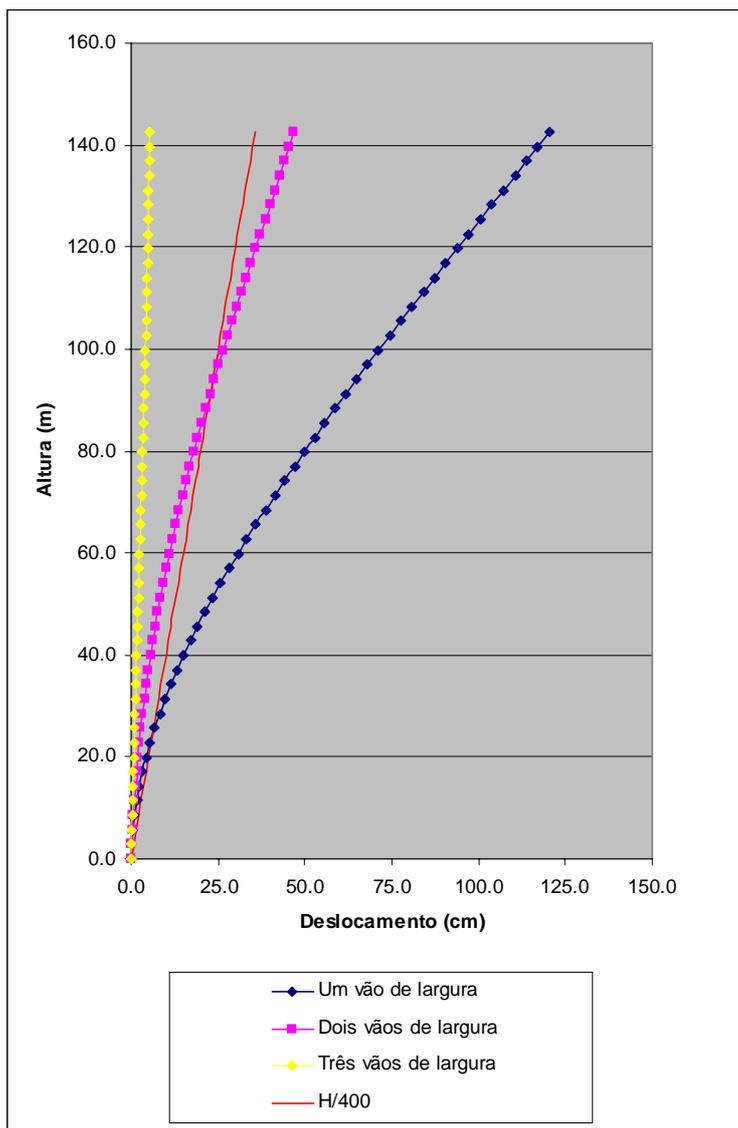


Figura IV.81 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes valores de esbeltez

O quadro IV.49 abaixo, mostra a relação entre o deslocamento máximo "d" no topo da estrutura e a altura "H" da edificação, para os três contraventamentos com diferentes valores de esbeltez.

Quadro IV.49 - Relação entre o deslocamento no topo e a altura da edificação de 50 pavimentos

	LARGURA do CONTRAVENTAMENTO		
	1 vão de largura	2 vãos de largura	3 vãos de largura
d / H	1/41	1/241	1/750

As ampliações para os deslocamentos obtidos de uma análise não linear geométrica e os deslocamentos obtidos de uma análise linear foram as seguintes:

Quadro IV.50 - Amplificações de deslocamentos na direção Y para a edificação de 50 pavimentos

LARGURA do CONTRAVENTAMENTO		
1 vão de largura	2 vãos de largura	3 vãos de largura
2,159	1,224	1,084

Analisando os resultados acima apresentados pode-se perceber que a relação entre a largura da treliça e a sua altura, é um importante parâmetro indicador da resistência à flexão do sistema de contraventamento.

Pode-se perceber que à medida que os contraventamentos adquirem largura os deslocamentos laterais das estruturas diminuem de forma significativa, o que pode ser explicado pelo ganho de rigidez lateral obtido pelo aumento da inércia à flexão das treliças, como explicaremos a seguir.

Como já comentado, os contraventamentos treliçados possuem uma característica de deformação muito semelhante à de uma viga em balanço, com uma predominância de deformações por flexão. Como se sabe a deformação por flexão em uma viga é função inversa do momento de inércia de sua seção transversal. Dessa forma, utilizando-se o clássico Teorema dos Eixos Paralelos, podemos estimar de forma aproximada a inércia do contraventamento da figura IV.82 através da seguinte expressão:

$$I = 2 \cdot [I' + (L/2)^2 \cdot A] \quad (\text{equação IV.6})$$

Onde:

- I: é o momento de inércia do contraventamento
- I': é o momento de inércia do pilar em relação ao centróide da sua seção
- L: é a largura do contraventamento
- A: é a área da seção transversal do pilar

A primeira parcela da equação, referente ao momento de inércia em relação ao centróide do pilar, torna-se desprezível, frente ao produto da área da seção do pilar pelo quadrado da distância entre eles. O que resulta em:

$$I = A \cdot L^2 / 2 \quad (\text{equação IV.7})$$

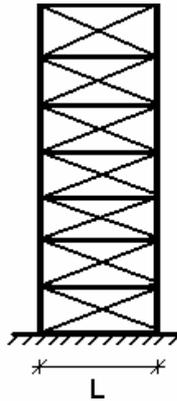


Figura IV.82 - Contraventamento em “X”: momento de inércia do contraventamento

Isto mostra que a inércia das treliças de contraventamento cresce com o quadrado da distância entre os seus pilares. Como os deslocamentos são inversamente proporcionais à inércia à flexão da treliça, podemos dizer que os deslocamentos diminuem de maneira inversa ao quadrado da distância dos pilares dos contraventamentos.

Dessa forma, desprezando-se as deformações por corte das treliças e a inércia dos demais pilares da estrutura, os deslocamentos laterais obtidos em uma análise de primeira ordem para estrutura contraventada com um vão de largura, são aproximadamente quatro vezes maior que os deslocamentos da estrutura contraventada com treliças de dois vãos de largura, que por sua vez produzirá deslocamentos 2,5 vezes superior aos contraventamentos com três vãos de largura. Através dos quadros VI.29, VI.30 e VI.31 pode-se perceber que a ordem de grandeza destas relações foram obedecidas.

4.6.2. VERIFICAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

Através da análise dinâmica obtivemos as seguintes frequências naturais para as estruturas, correspondentes às translações segundo os eixos X e Y respectivamente:

Quadro IV.51 - Freqüência natural da estrutura de 50 pavimentos segundo translação nos eixos X e Y

	LAGURA do CONTRAVENTAMENTO		
	1 vão de largura	2 vãos de largura	3 vãos de largura
f_1 (Hz)	0,0633	0,1401	0,2119
f_2 (Hz)	0,0498	0,1115	0,1821

Os deslocamentos laterais da estrutura, obtidos para as forças devidas ao vento com um período de recorrência de 10 anos, foram os seguintes:

Quadro IV.52 - Deslocamento da estrutura de 50 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	LARGURA do CONTRAVENTAMENTO		
	1 vão de largura	2 vãos de largura	3 vãos de largura
Deslocamento em X (cm)	54,76	46,73	5,60
Deslocamento em Y (cm)	160,52	58,91	19,00

De posse dos valores das freqüências naturais das estruturas e do seu deslocamento lateral, foi possível calcular a amplitude máxima da aceleração, resultando nos seguintes valores:

Quadro IV.53 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 50 pavimentos

	LARGURA DO CONTRAVENTAMENTO		
	1 vão de largura	2 vãos de largura	3 vãos de largura
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0864	0,1129	0,0973
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,1572	0,1718	0,0618

Através da análise dos resultados acima, podemos observar que apenas a estrutura que utiliza contraventamentos com largura de três vãos de largura atendeu aos critérios estabelecidos pela NBR-8800 [17] no que diz respeito ao conforto dos usuários, apresentando valores inferiores $0,1 \text{ m/s}^2$ para a amplitude máxima da aceleração. Os demais contraventamentos analisados apresentaram amplitudes máximas de aceleração incompatíveis com o preconizado pela NBR-8800[17].

4.6.3. CONSUMO DE AÇO

Os perfis obtidos para as estruturas com diferentes valores de esbeltez estão apresentados no quadro IV.54 e IV.109 abaixo.

Quadro IV.54 - Perfis utilizados na edificação com 50 pavimentos

	LARGURA DO CONTRAVENTAMENTO		
	1 vão de largura	2 vãos de largura	3 vãos de largura
Colunas - 1	CS 650x823*	CS 650X823*	CS 650x693*
Colunas - 2	CS 650x823*	CS 650X588	CS 650x525
Colunas - 3	CS 650x823*	CS 650X409	CS 650x395
Colunas - 4	CS 650x588	CS 650X305	CS 650x305
Colunas - 5	CS 650x305	CS 650X305	CS 650x305
Contraventamento - 1	CS 400x248	CS 400X146	CS 500x194
Contraventamento - 2	CS 400x248	CS 400X137	CS 500x172
Contraventamento - 3	CS 500x207	CS 500X172	CS 450x154
Contraventamento - 4	CS 500x172	CS 400X106	CS 350x112
Contraventamento - 5	CS 300x95	CS 300X62	CS 300x76
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75	VS 550X75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51	VS 450X51

* Não padronizado

O quadro IV.55 apresenta os respectivos consumos de aço obtidos para cada grupo de elementos estruturais.

Quadro IV.55 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 50 pavimentos (Ton)

	LARGURA DO CONTRAVENTAMENTO		
	1 vão de largura	2 vãos de largura	3 vãos de largura
Colunas	2198,05	1587,97	1452,59
Contraventamento	396,14	254,49	290,85
Vigas	1150,05	1150,05	1150,05
Consumo total de aço (Ton)	3744,69	2992,97	2894,18

Quadro IV.56 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 50 pavimentos

	LARGURA DO CONTRAVENTAMENTO		
	1 vão de largura	2 vãos de largura	3 vãos de largura
Consumo de aço (kg/m ²)	86,68	69,28	67,00

O gráfico da figura IV.83 ilustra o consumo de aço por metro quadrado para os contraventamentos com diferentes valores de esbeltez.

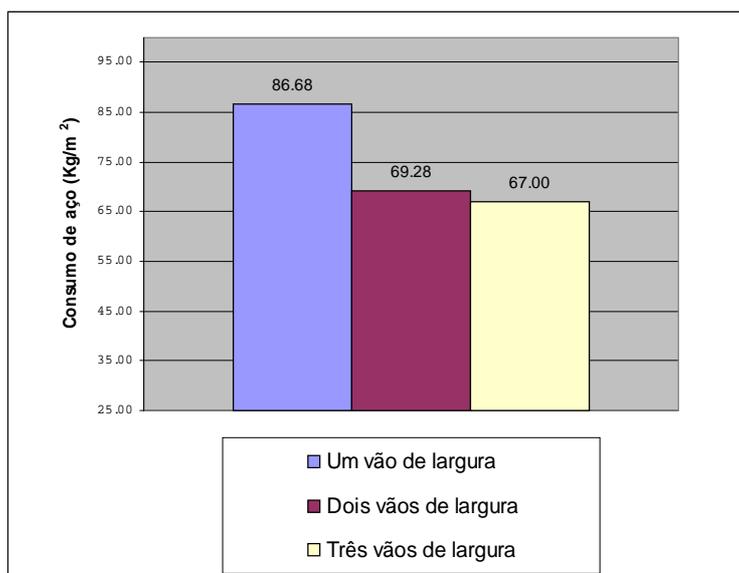


Figura IV.83 - Consumo de aço por metro quadrado para a estrutura de 50 pavimentos utilizando contraventamentos com diferentes valores de esbeltez

Percebe-se que o consumo de material diminui à medida que as estruturas aumentam as larguras dos seus contraventamento. Na verdade, quanto maior a esbeltez do contraventamentos, maiores são as forças desenvolvidas pelas colunas para resistir ao corte externo, fazendo com que aumente sobremaneira o consumo de aço.

4.7. ANÁLISE COMPARATIVA QUANTO AO TAMANHO DOS MÓDULOS DOS CONTRAVENTAMENTOS

Como explicitado no item 3.1.1.7, foram analisados dois tipos de contraventamentos de mesma largura, mas com diferentes tamanhos para os seus módulos. Esta análise foi feita para as edificações com 30 e de 50 pavimentos, e os resultados obtidos são apresentados a seguir.

4.7.1. DESLOCAMENTOS LATERAIS

4.7.1.1. Contraventamentos com módulos pequenos:

As estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por treliças com pequenos módulos, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.84 a IV.87):

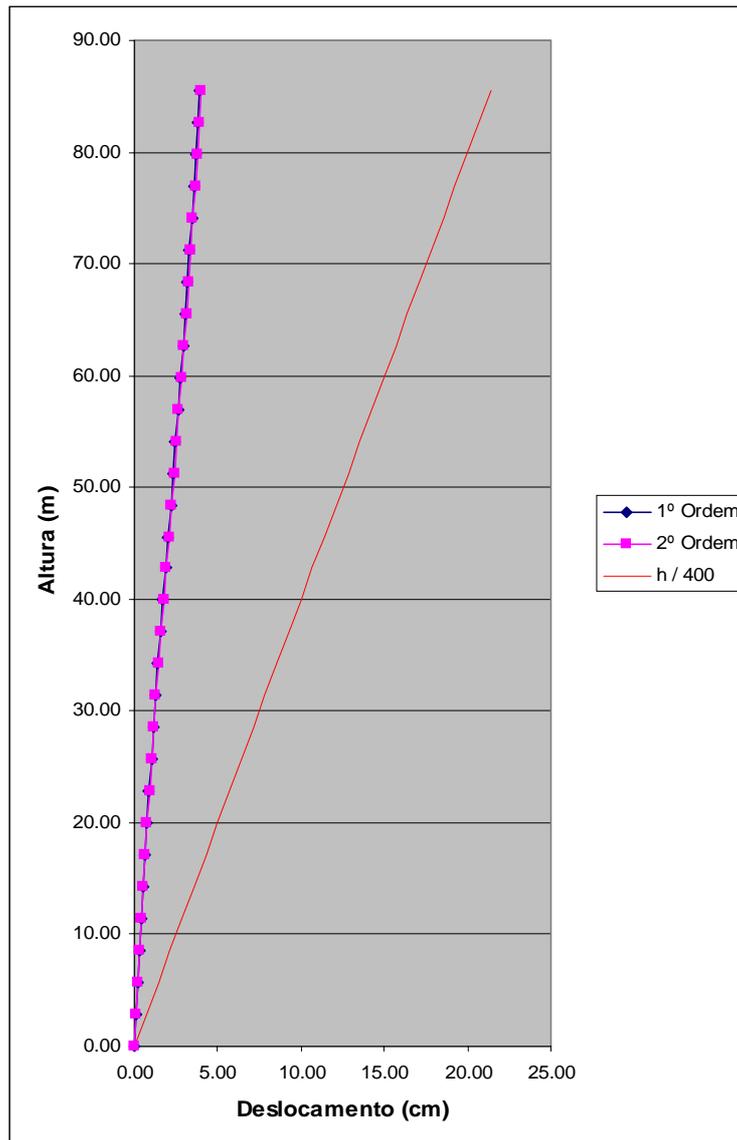


Figura IV.84 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos com pequenos módulos

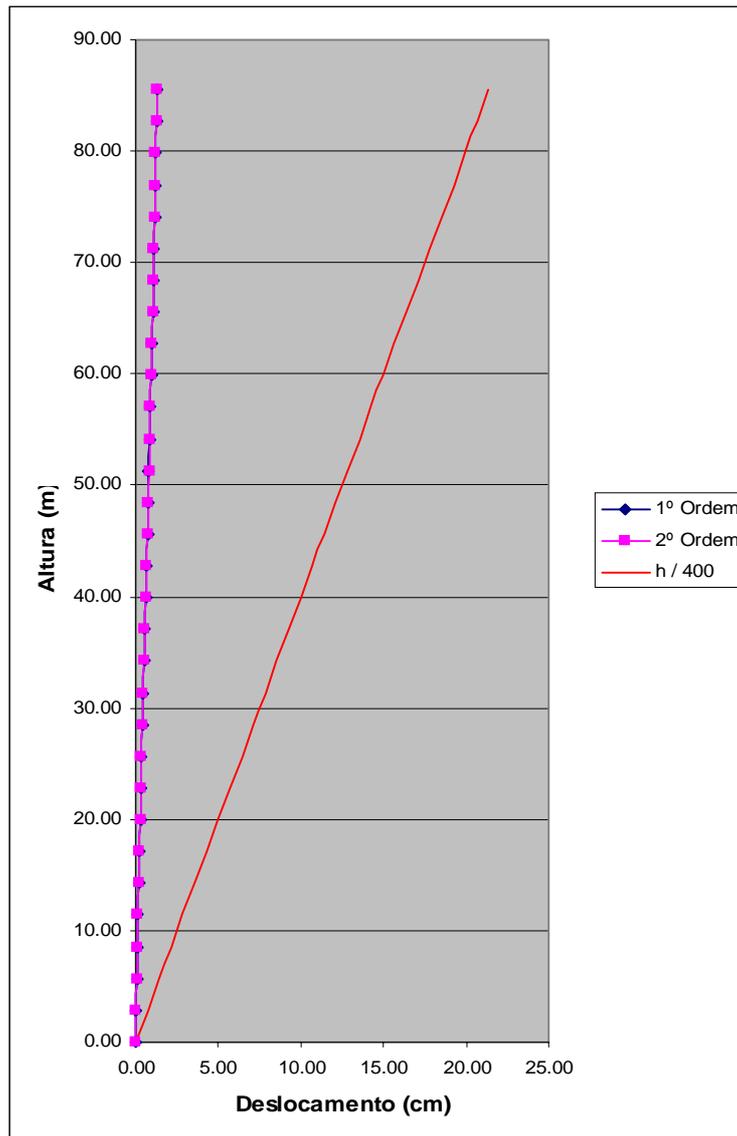


Figura IV.85 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos com pequenos módulos

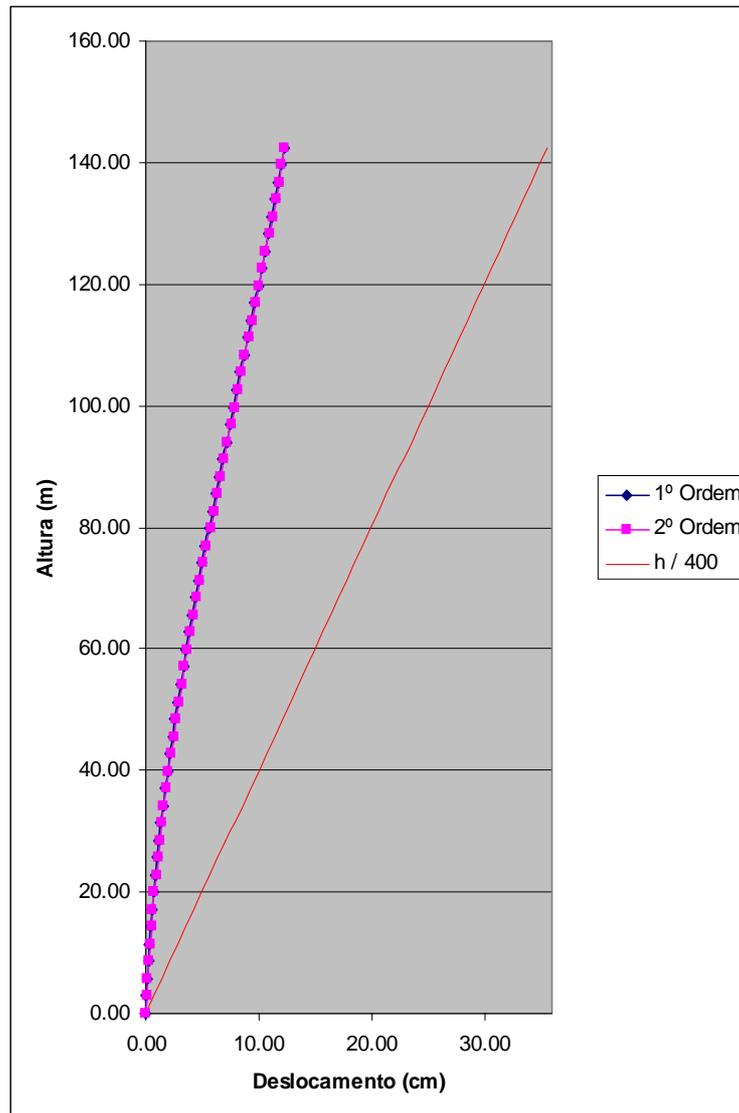


Figura IV.86 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com módulos pequenos

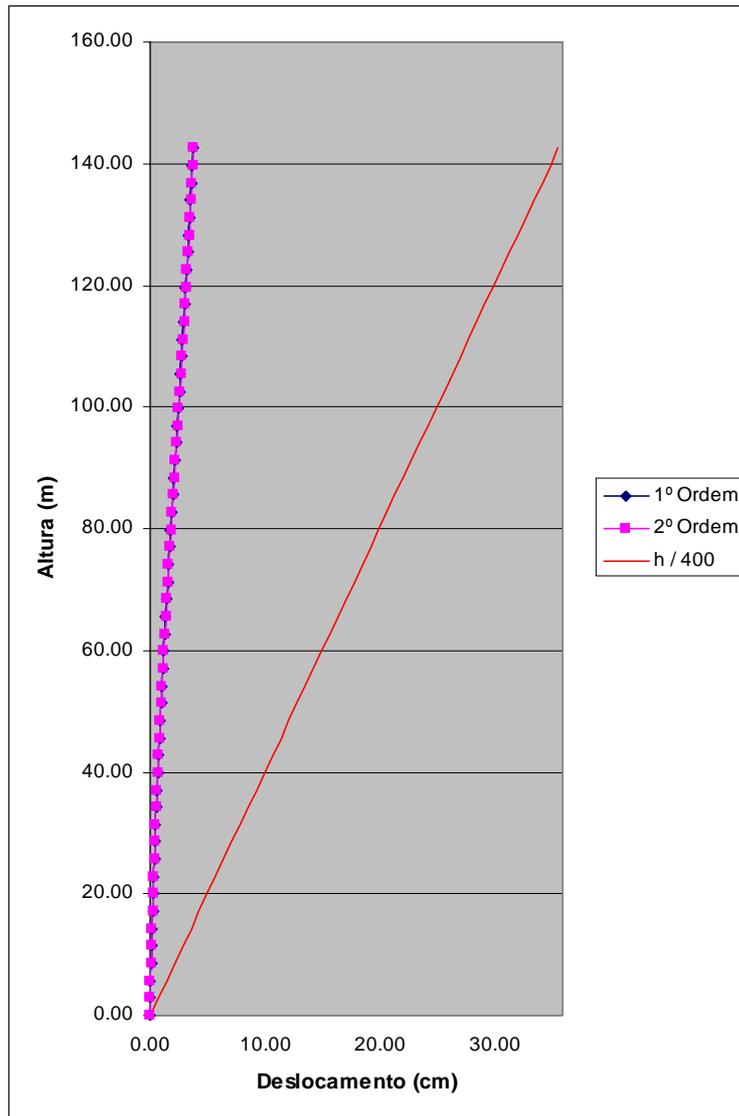


Figura IV.87 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com módulos pequenos

4.7.1.2. Contraventamentos com grandes módulos

As estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por treliças com grandes módulos, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figuras IV.88 a IV.90):

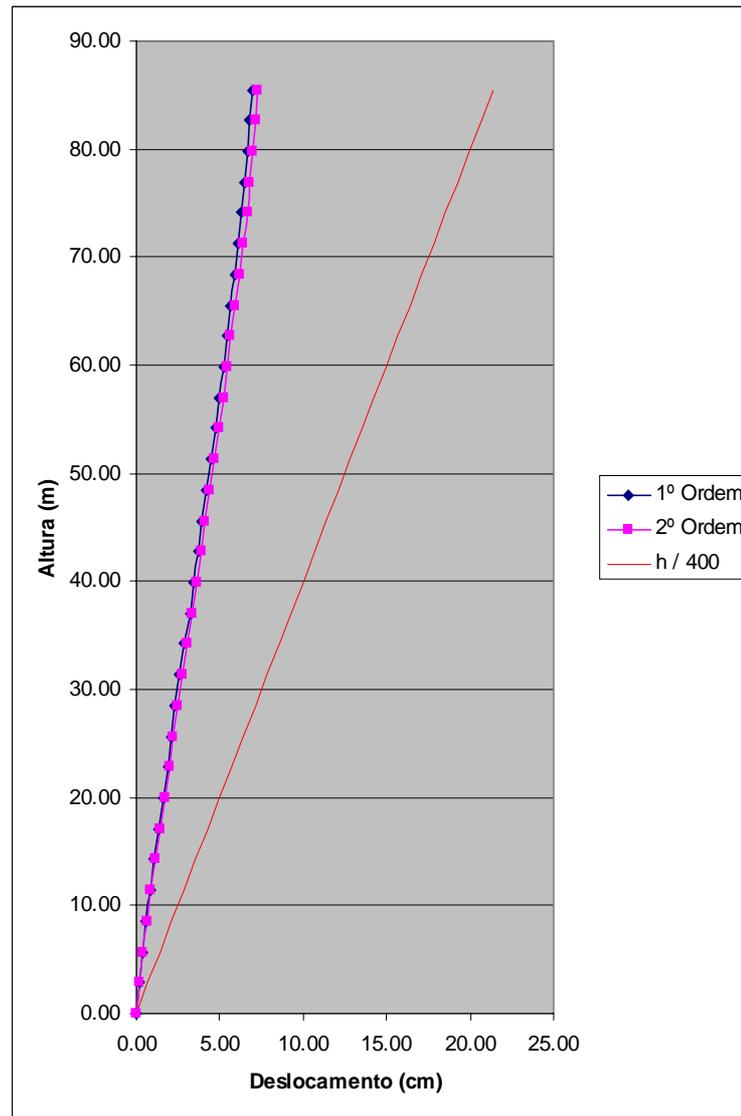


Figura IV.88 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos com grandes módulos

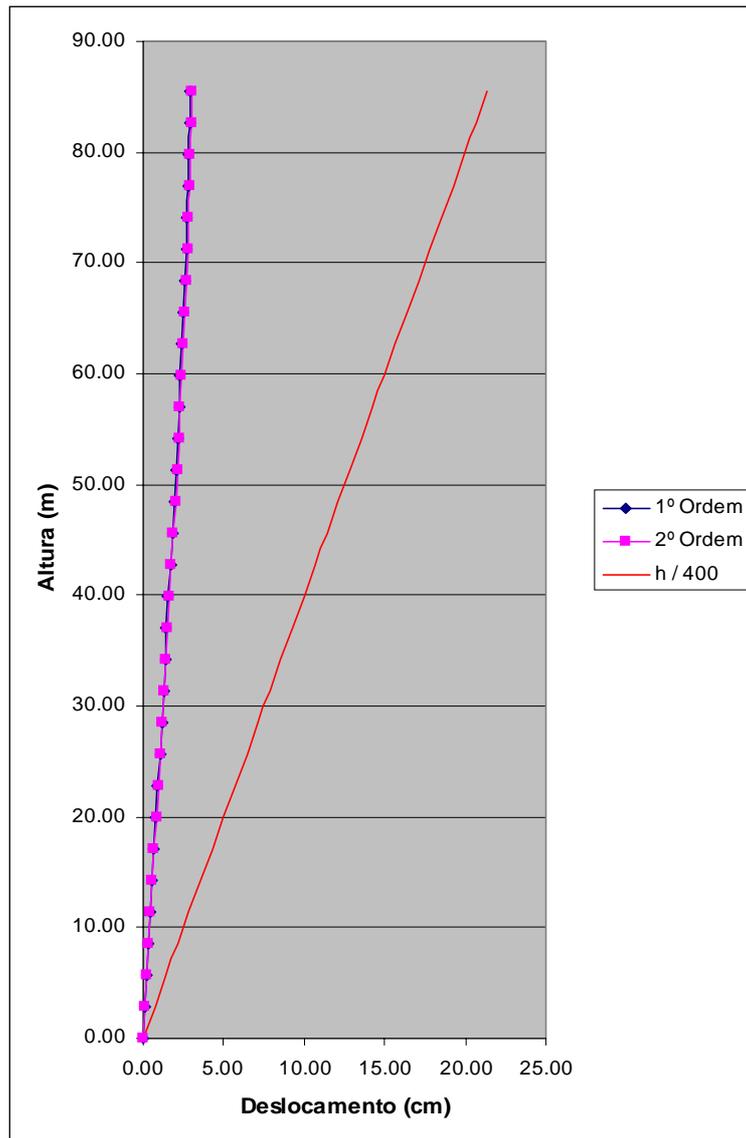


Figura IV.89 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos com grandes módulos

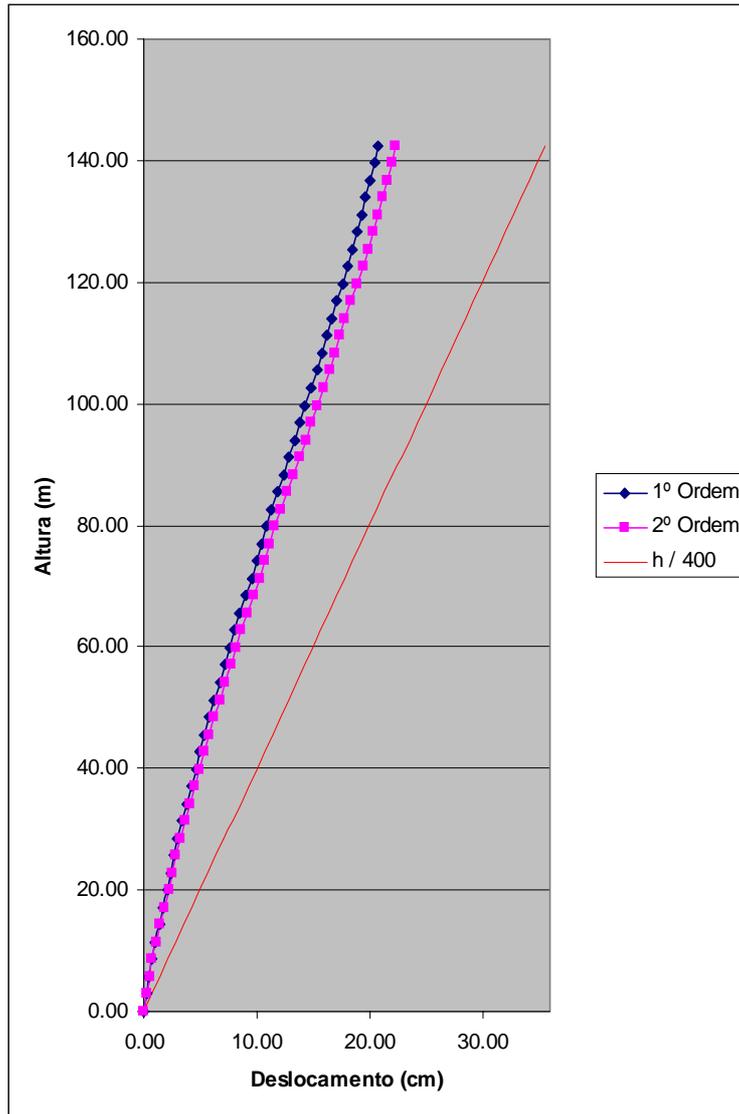


Figura IV.90 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com grandes módulos

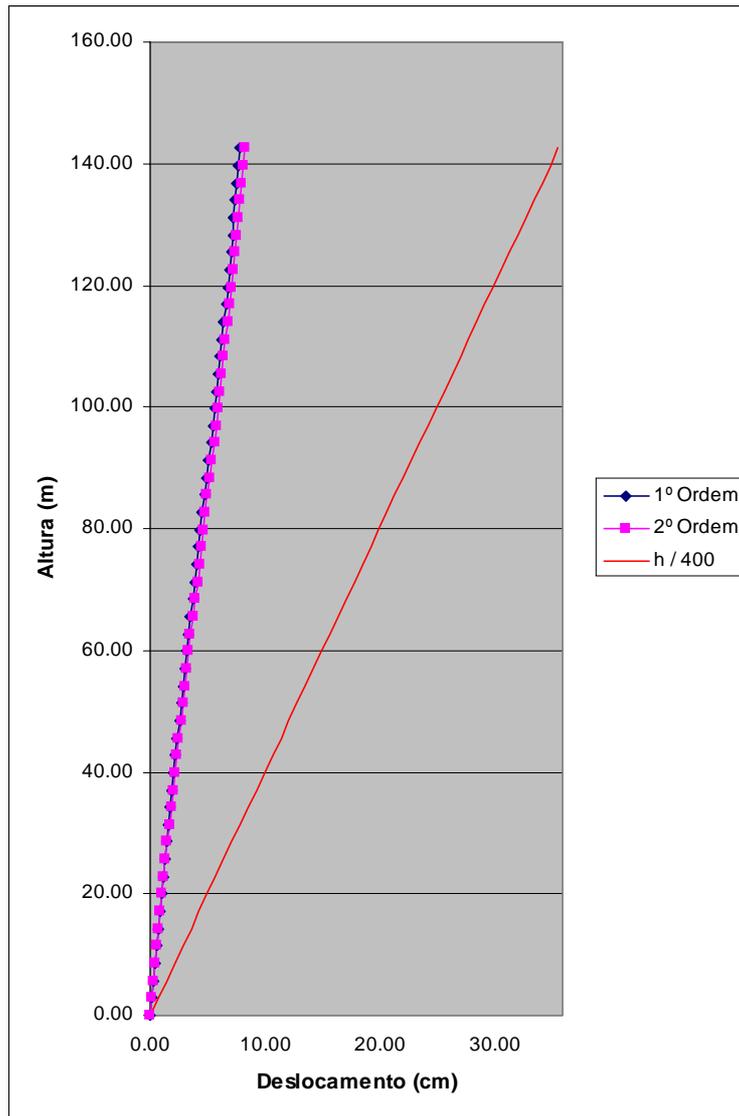


Figura IV.91 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com grandes módulos

4.7.1.3. Análise comparativa entre os deslocamentos para os contraventamentos com módulos de diferentes tamanhos.

As figuras IV.92 a IV.94 abaixo apresentam um comparativo quanto aos deslocamentos laterais para os contraventamentos que utilizam pequenos módulos e grandes módulos.

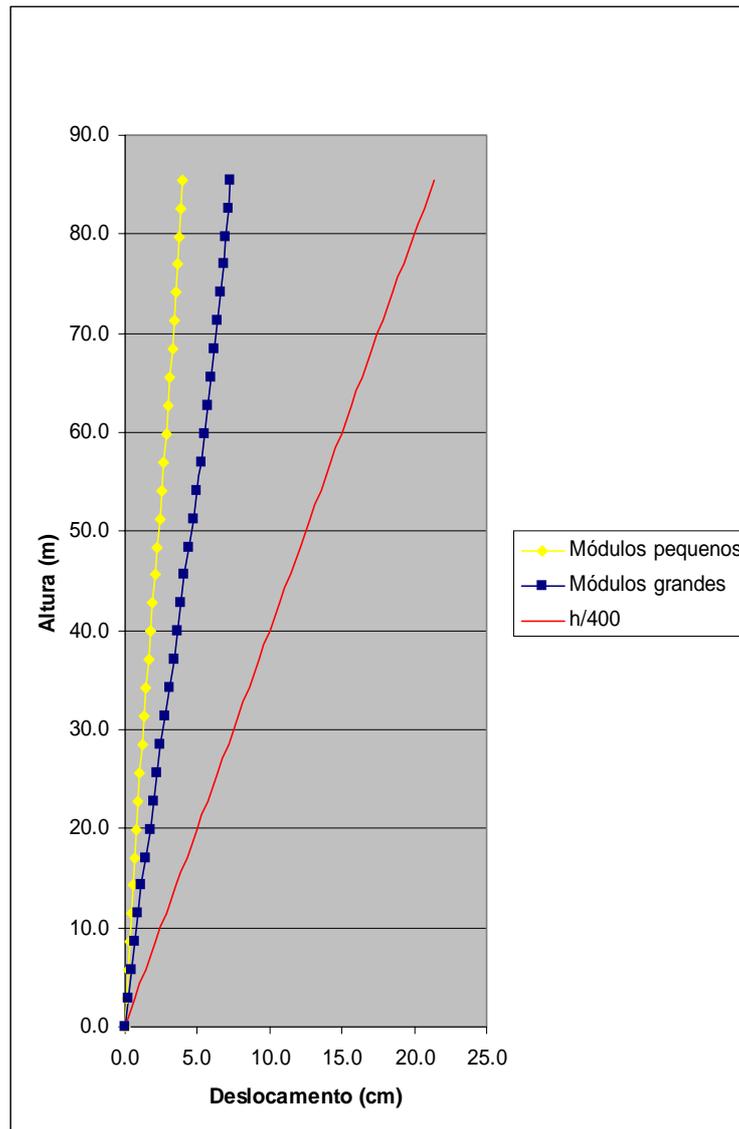


Figura IV.92 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 30 pavimentos para os diferentes tamanhos dos módulos

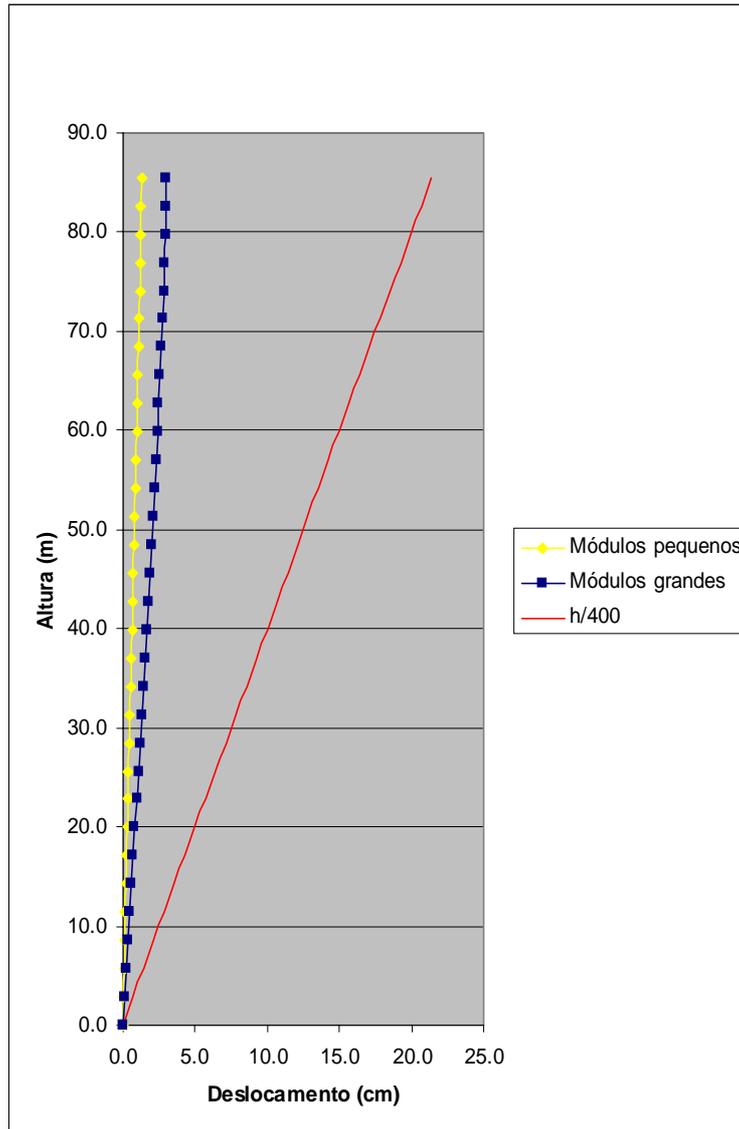


Figura IV.93 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 30 pavimentos para os diferentes tamanhos dos módulos

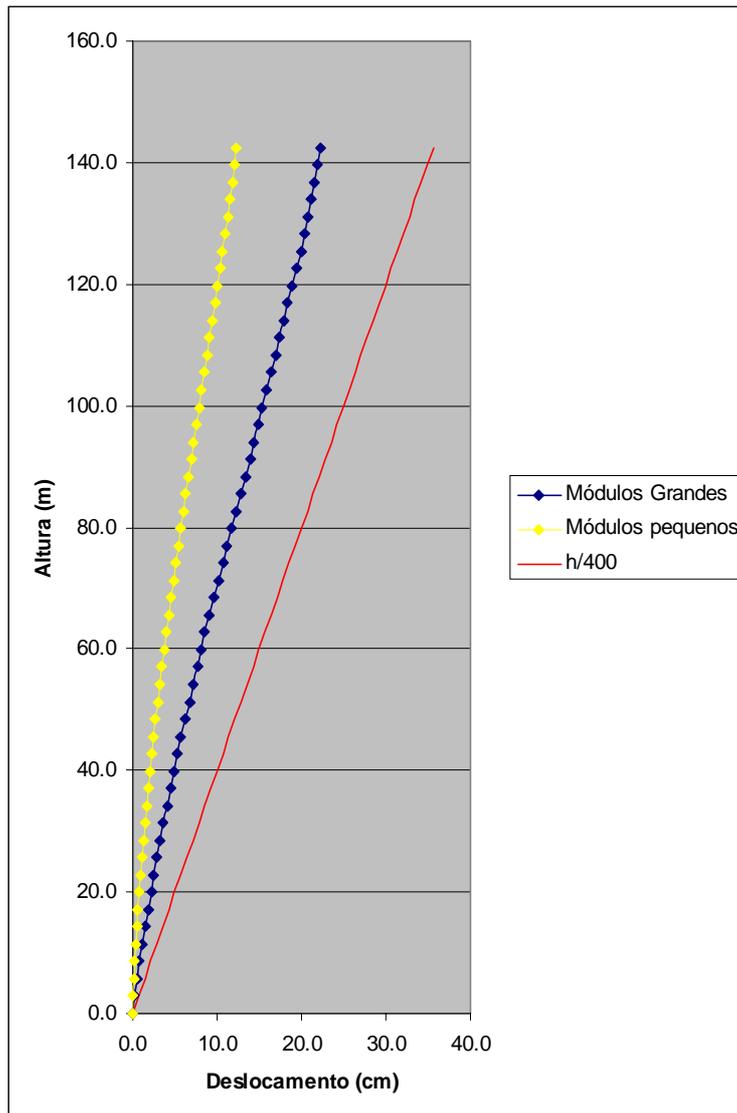


Figura IV.94 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes tamanhos dos módulos

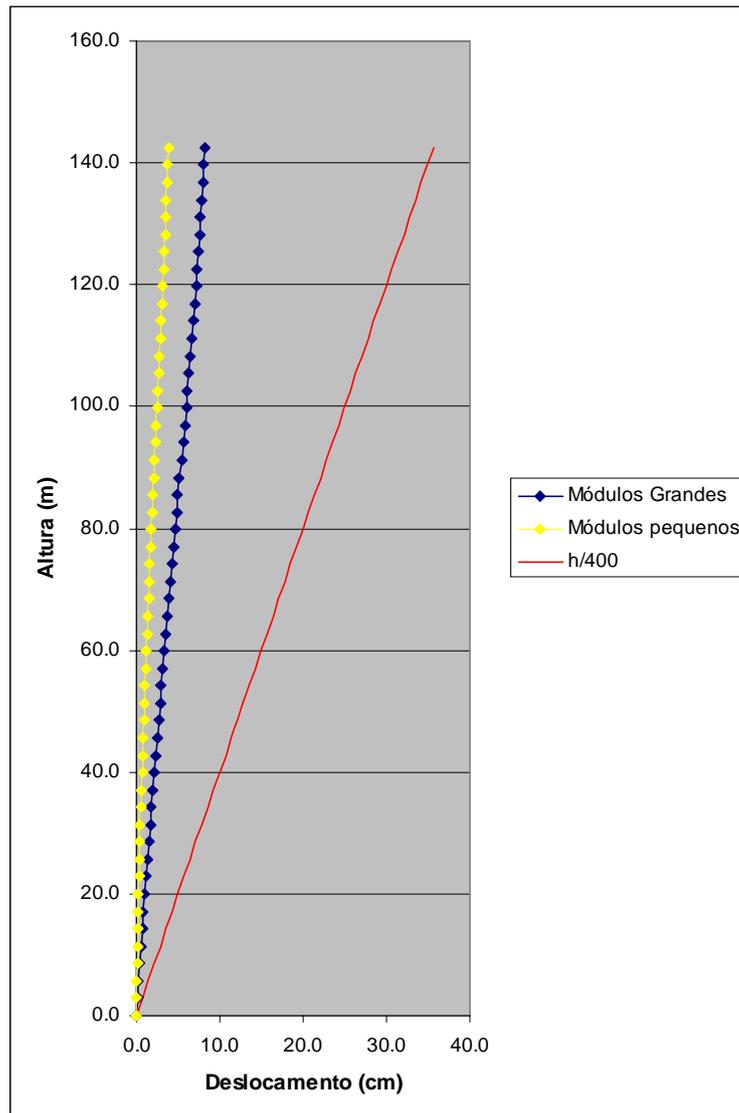


Figura IV.95 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos para os diferentes tamanhos dos módulos

O quadro IV.57 abaixo, mostra a relação entre o deslocamento máximo “d” no topo da estrutura e a altura “H” da edificação, para os contraventamentos com diferentes tamanhos de módulos.

Quadro IV.57 - Relação entre o deslocamento no topo e a altura da edificação de 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
d / H	1/2153	1/1156

Quadro IV.58 - Relação entre deslocamento no topo e a altura da edificação de 50 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
d / H	1/1172	1/638

As amplificações para os deslocamentos obtidos de uma análise não linear geométrica e os deslocamentos obtidos de uma análise linear foram as seguintes:

Quadro IV.59 - Amplificações de deslocamentos na direção Y para a edificação de 30 pavimentos

TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
Módulos pequenos	Módulos grandes
1,027	1,049

Quadro IV.60 - Amplificações de deslocamentos na direção Y para a edificação de 50 pavimentos

TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
Módulos pequenos	Módulos grandes
1,001	1,076

Observa-se através das figuras IV.92 a IV.95 que o tamanho dos módulos das treliças possuem relativa influência nos deslocamentos laterais da estrutura. No entanto, os acréscimos nos deslocamentos laterais das estruturas com contraventamento em grandes módulos, não foram tão significativos, de modo que ambas as estruturas atenderam aos limites impostos pela NBR-8800 no que diz respeito aos deslocamentos máximos entre pisos consecutivos e relativos à base da estrutura. Cumpre acrescentar que para a estrutura de 50 pavimentos contraventada com treliças de grandes módulos, o deslocamento relativo entre pisos (quadro IV.35) ficou no limite permitido pela norma

brasileira, o que pode ser explicado pela pequena quantidade de diagonais da estrutura, elemento estrutural este responsável pela absorção do corte horizontal.

Nota-se também que as estruturas em análise, devido à grande largura dos seus contraventamentos, originou deformadas com uma característica predominante de corte, principalmente naquelas com 30 pavimentos.

Os efeitos de segunda ordem das estruturas analisadas foram relativamente pequenos, levando-se em consideração o porte destas edificações, o que pode também ser explicado pela pouca flexibilidade das treliças adotadas.

4.7.2. VERIFICAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

Da análise dinâmica da estrutura resultou nas seguintes frequências naturais, correspondentes às translações segundo os eixos X e Y respectivamente:

Quadro IV.61 - Frequência natural da estrutura de 30 pavimentos segundo translação nos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
f_1 (Hz)	0,5747	0,3048
f_2 (Hz)	0,4444	0,2762

Quadro IV.62 - Frequência natural da estrutura de 50 pavimentos segundo translação nos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
f_1 (Hz)	0,4545	0,2293
f_2 (Hz)	0,2475	0,1919

Os deslocamentos laterais da estrutura, obtidos para as forças devidas ao vento com um período de recorrência de 10 anos, foram os seguintes:

Quadro IV.63 - Deslocamento da estrutura de 30 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
Deslocamento em X (cm)	0,58	1,36
Deslocamento em Y(cm)	1,80	3,30

Quadro IV.64 - Deslocamento da estrutura de 50 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
Deslocamento em X (cm)	1,75	3,74
Deslocamento em Y(cm)	5,68	10,30

De posse dos valores das frequências naturais das estruturas e dos seus deslocamentos, obtivemos os seguintes valores para a amplitude máxima da aceleração.

Quadro IV.65 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0763	0,0499
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,1400	0,0995

Quadro IV.66 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0689	0,0779
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,1377	0,1498

Quanto ao conforto dos usuários, as estruturas de 30 pavimentos, contraventadas com treliças de grandes módulos apresentaram um melhor comportamento. As estruturas com 50 pavimentos não atenderam ao limite normativo de $0,1 \text{ m/s}^2$ para a amplitude da aceleração para ambos os contraventamentos.

4.7.3. CONSUMO DE AÇO

Os perfis obtidos para as estruturas de 30 pavimentos, estão apresentados no quadro IV.67 abaixo.

Quadro IV.67 - Perfis utilizados na edificação com 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
Colunas - 1	CS 550x358	CS 550x358
Colunas - 2	CS 550x290	CS 550x290
Colunas - 3	CS 550x228	CS 550x228
Colunas - 4	CS 550x228	CS 550x228
Colunas - 5	CS 550x228	CS 550x228
Contraventamento - 1	W 200x46	HP 310x79
Contraventamento - 2	W 200x46	HP 310x79
Contraventamento - 3	W 200x35	W 250x73
Contraventamento - 4	W 200x35	HP 250x62
Contraventamento - 5	W 200x35	W 200x46
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51

Os perfis obtidos para as estruturas de 50 pavimentos de altura estão apresentados no quadro IV.68 a seguir.

Quadro IV.68 - Perfis utilizados na edificação com 50 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
Colunas - 1	CS 650x693	CS 650x693
Colunas - 2	CS 650x496	CS 650x496
Colunas - 3	CS 650x395	CS 650x395
Colunas - 4	CS 650x305	CS 650x305
Colunas - 5	CS 650x305	CS 650x305
Contraventamento - 1	CS 400x146	CS 400x128
Contraventamento - 2	CS 350x119	CS 400x106
Contraventamento - 3	CS 300x95	CS 400x106
Contraventamento - 4	CS 300x76	CS 350x95
Contraventamento - 5	CS 250x52	CS 250x52
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51

* Não padronizado

Os respectivos consumos de aço obtidos para cada grupo de elementos estruturais estão apresentados a seguir.

Quadro IV.69 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 30 pavimentos (Ton)

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
Colunas	522,79	522,79
Contraventamento	221,08	81,41
Vigas	692,20	692,20
Consumo total de aço (Ton)	1434,17	1294,50

Quadro IV.70 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 50 pavimentos (Ton)

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
Colunas	1433,41	1433,41
Contraventamento	702,46	203,64
Vigas	1150,50	1150,50
Consumo total de aço (Ton)	3286,37	2787,55

Quadro IV.71 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
Consumo de aço (kg/m ²)	55,33	49,94

Quadro IV.72 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 50 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO	
	Módulos pequenos	Módulos grandes
Consumo de aço (kg/m ²)	76,07	64,53

Os gráficos das figuras IV.96 e IV.97 ilustram o consumo de aço por metro quadrado para as estruturas com contraventamentos de pequenos e grandes módulos.

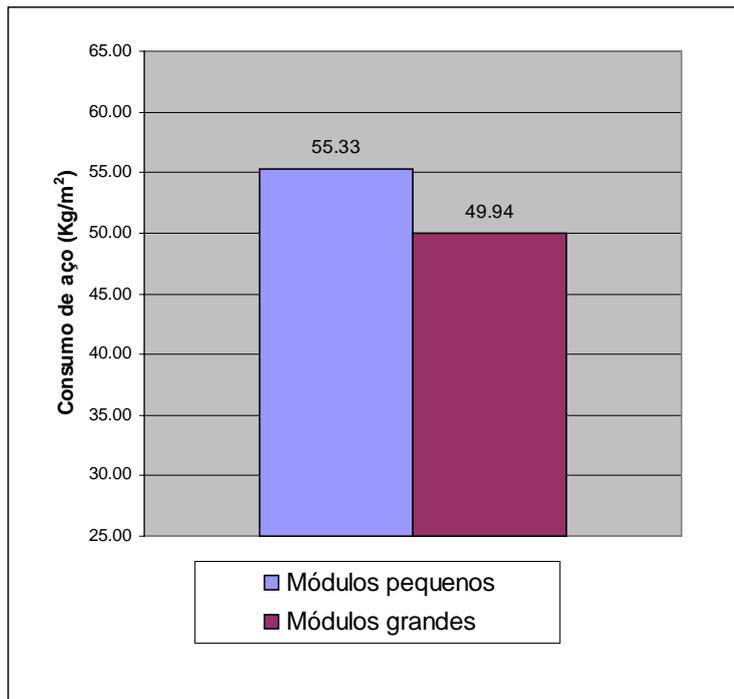


Figura IV.96 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos de pequenos e grandes módulos.

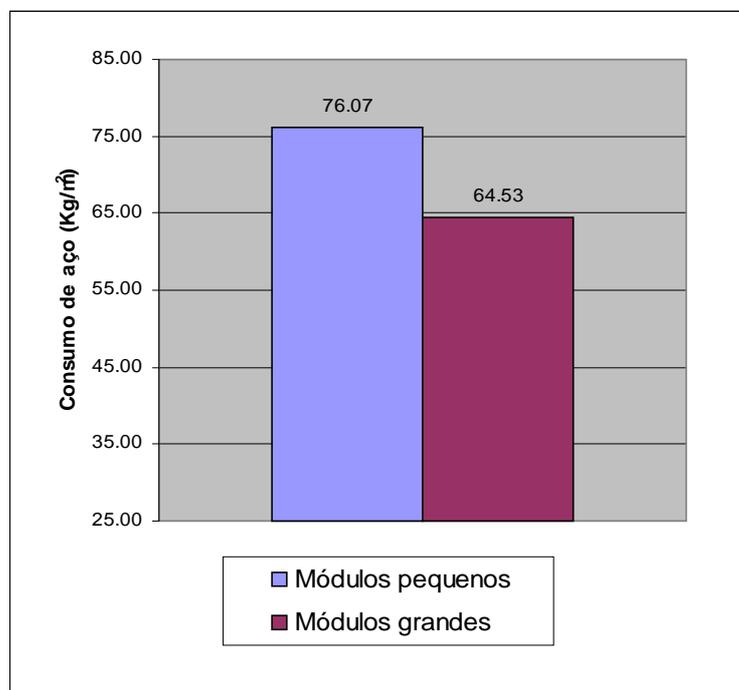


Figura IV.97 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos de pequenos e grandes módulos.

Quanto ao consumo de aço, como já era de se esperar, as estruturas contraventadas com módulos pequenos, tiveram um maior consumo de material. Este

consumo superior foi devido à grande quantidade de aço das diagonais, como se pode constatar através dos quadros IV.69 e IV.70. Vale lembrar que o contraventamento com módulos pequenos também aumenta significativamente o consumo de mão-de-obra e a quantidade de ligações.

4.8. ANÁLISE DOS RESULTADOS QUANTO À DIMINUIÇÃO DO CONTRAVENTAMENTO AO LONGO DA ALTURA DA EDIFICAÇÃO

Os resultados obtidos da análise das estruturas quanto à diminuição dos contraventamentos ao longo da altura da edificação estão apresentados a seguir.

4.8.1. DESLOCAMENTOS LATERAIS

4.8.1.1. Dois contraventamentos juntos:

As estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por duas treliças juntas, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.98 a IV.101):

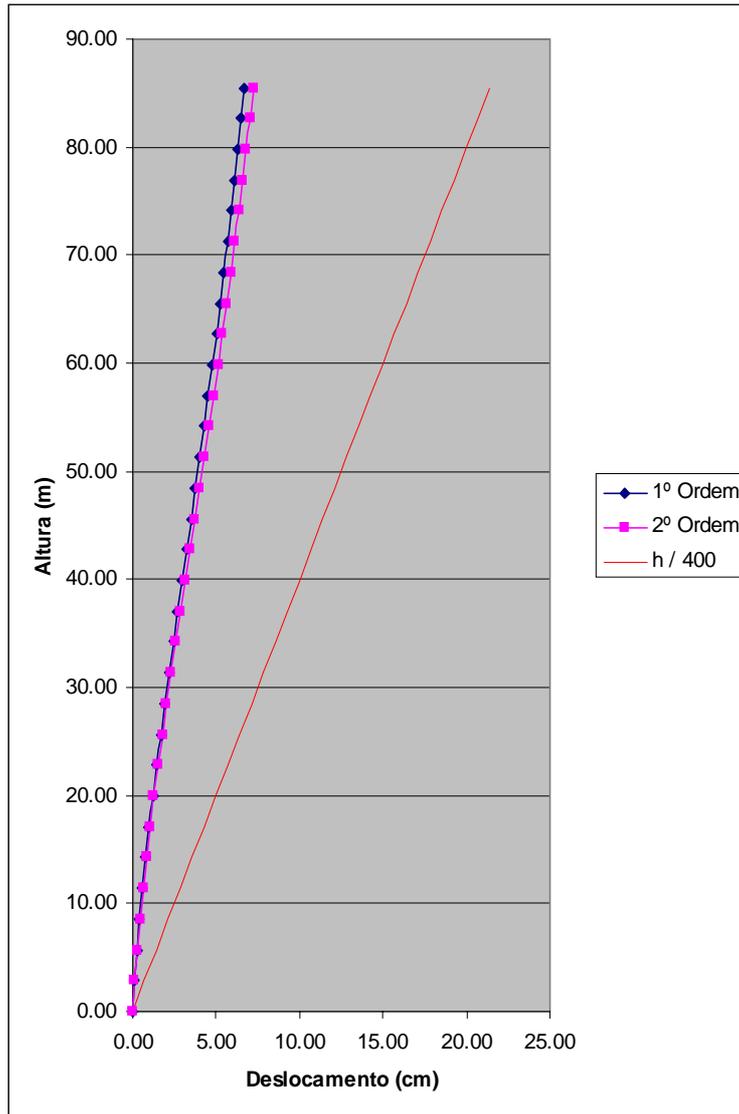


Figura IV.98 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos utilizando dois contraventamentos juntos

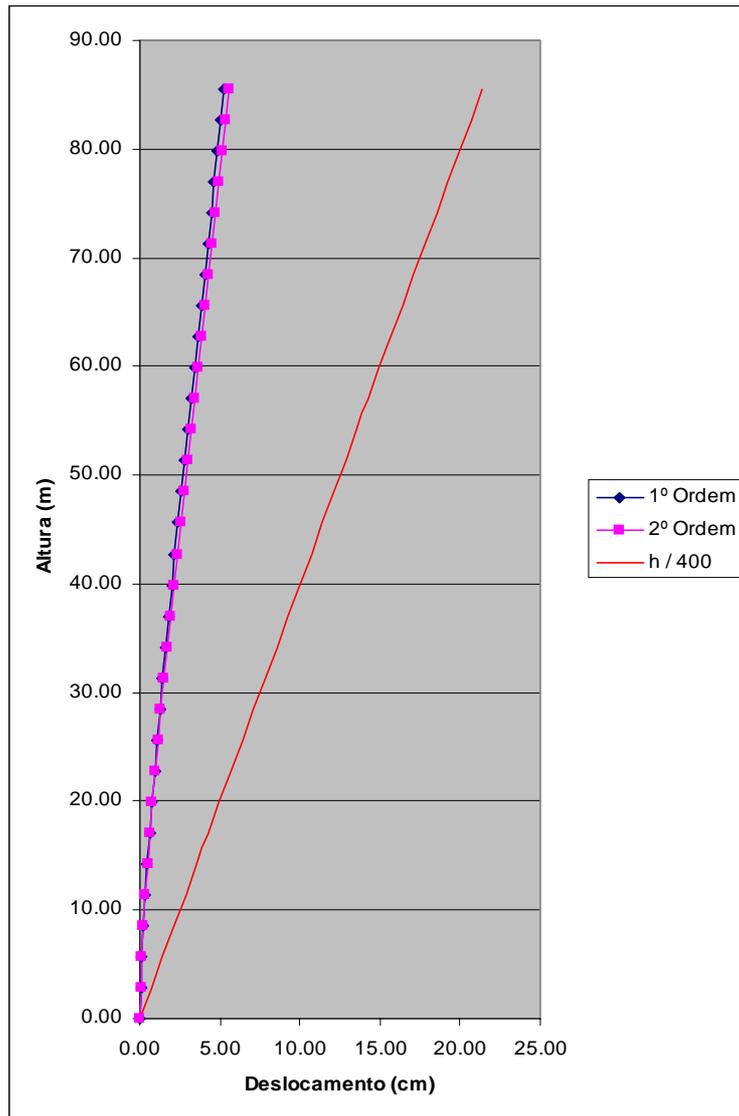


Figura IV.99 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos utilizando dois contraventamentos juntos

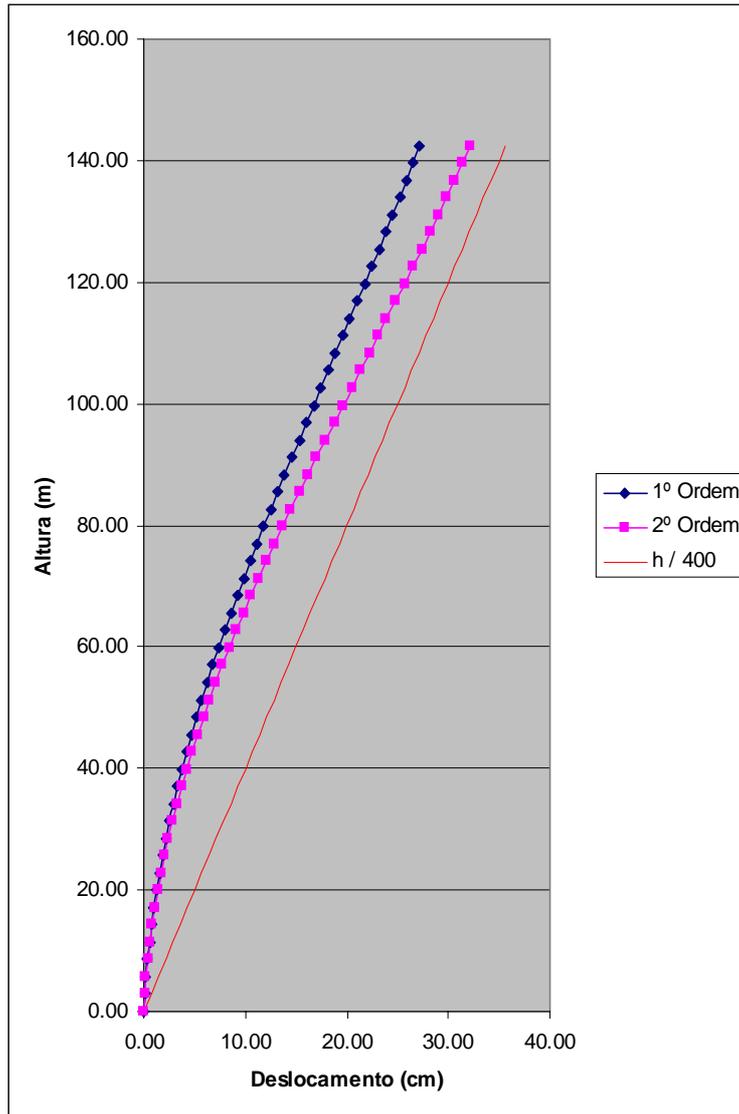


Figura IV.100 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos utilizando dois contraventamentos juntos

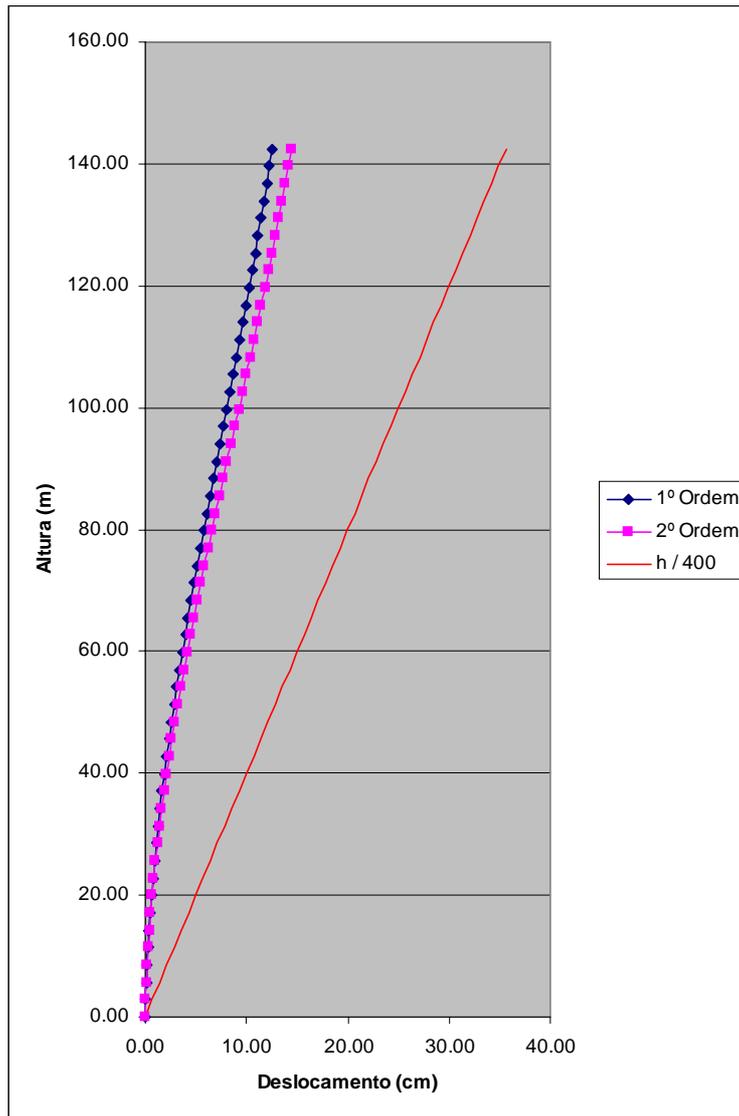


Figura IV.101 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos utilizando contraventamentos juntos

4.8.1.2. Três contraventamentos juntos

Os deslocamentos das estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por três treliças juntas, estão apresentados nas figuras IV.102 a IV.105 a seguir.

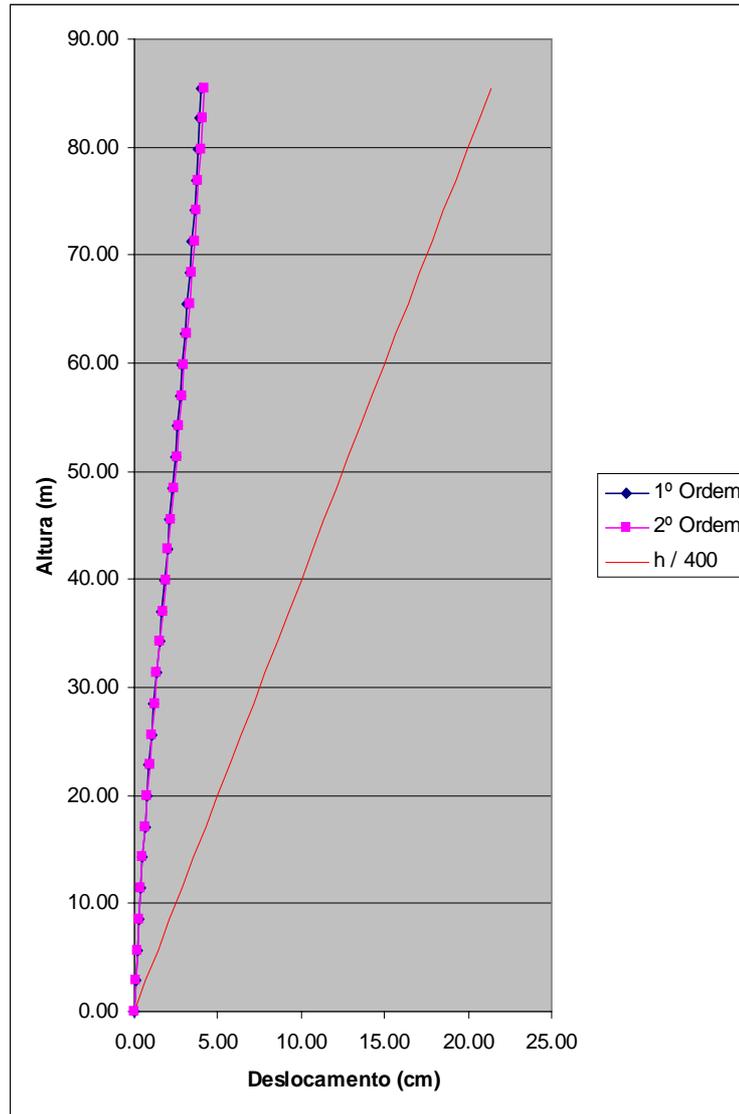


Figura IV.102 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com dois contraventamentos juntos

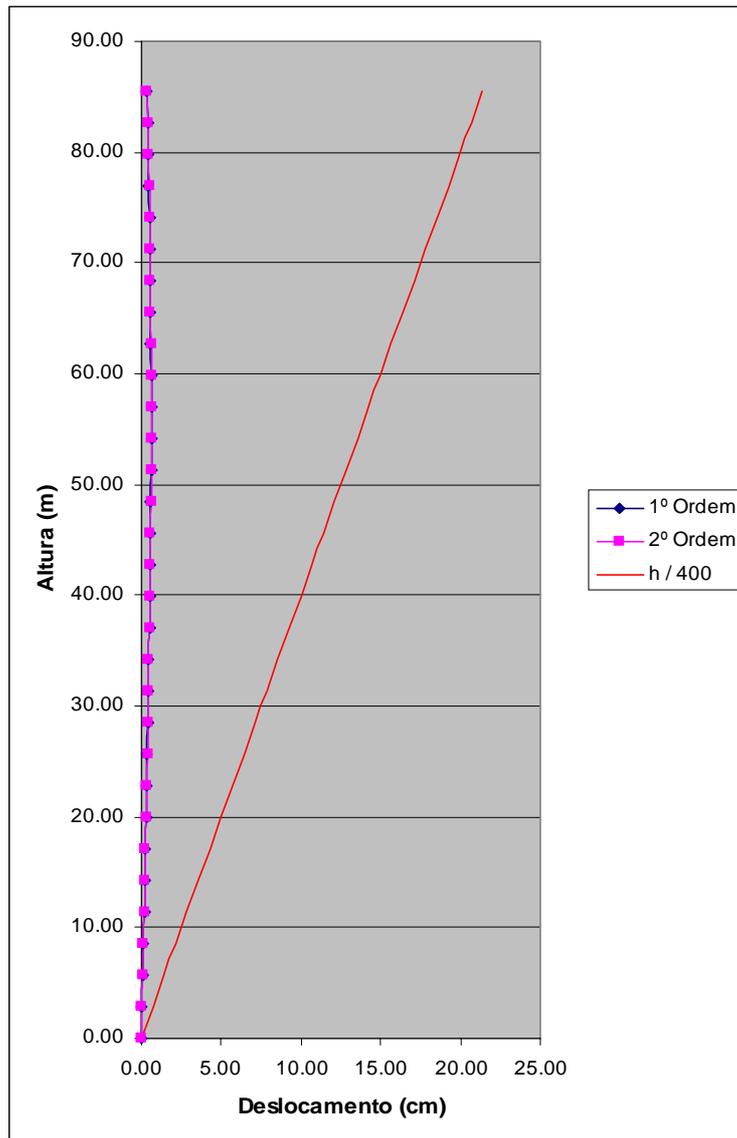


Figura IV.103 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com três contraventamentos juntos

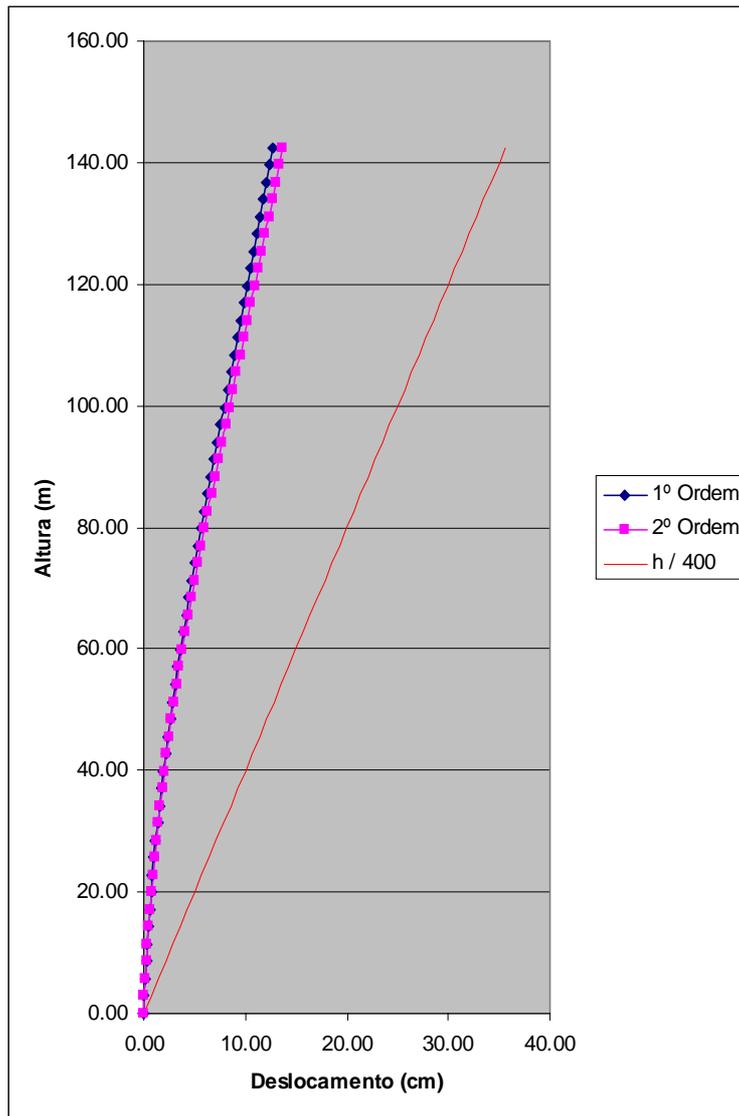


Figura IV.104 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com três contraventamentos juntos

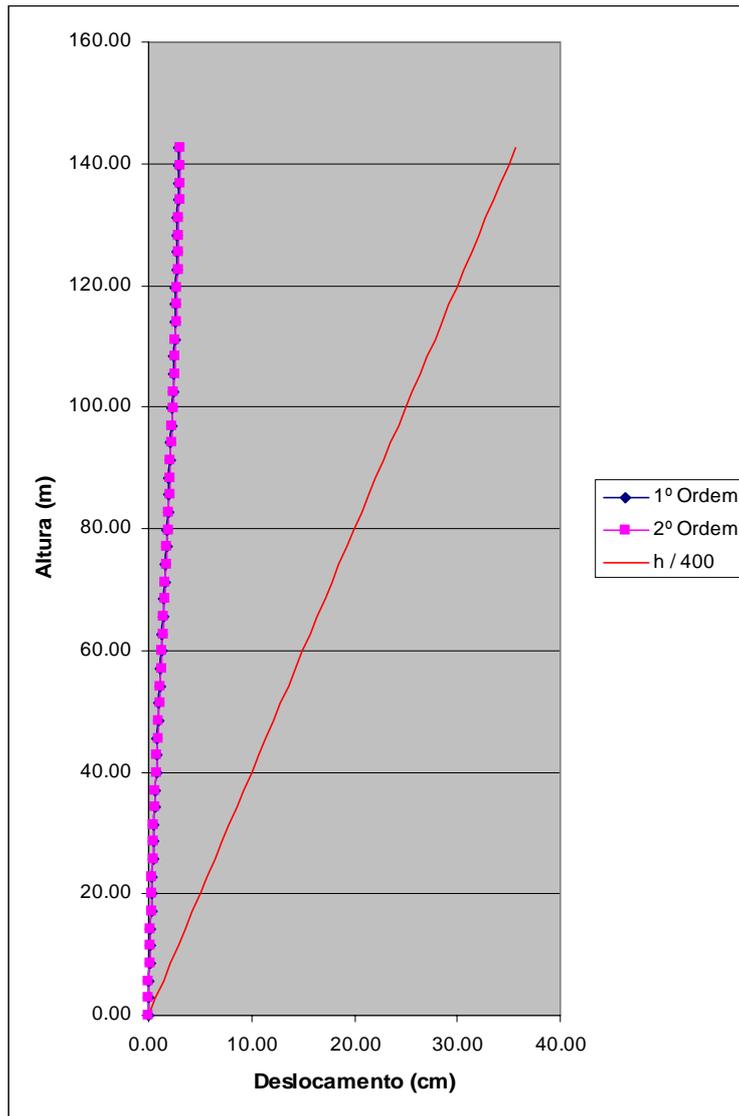


Figura IV.105 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com três contraventamentos juntos

4.8.1.3. Contraventamento escalonado

Os deslocamentos das estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujo sistema de contraventamento foi formado por um treliçamento escalonado, apresentaram os seguintes resultados (figura IV.106 a IV.109):

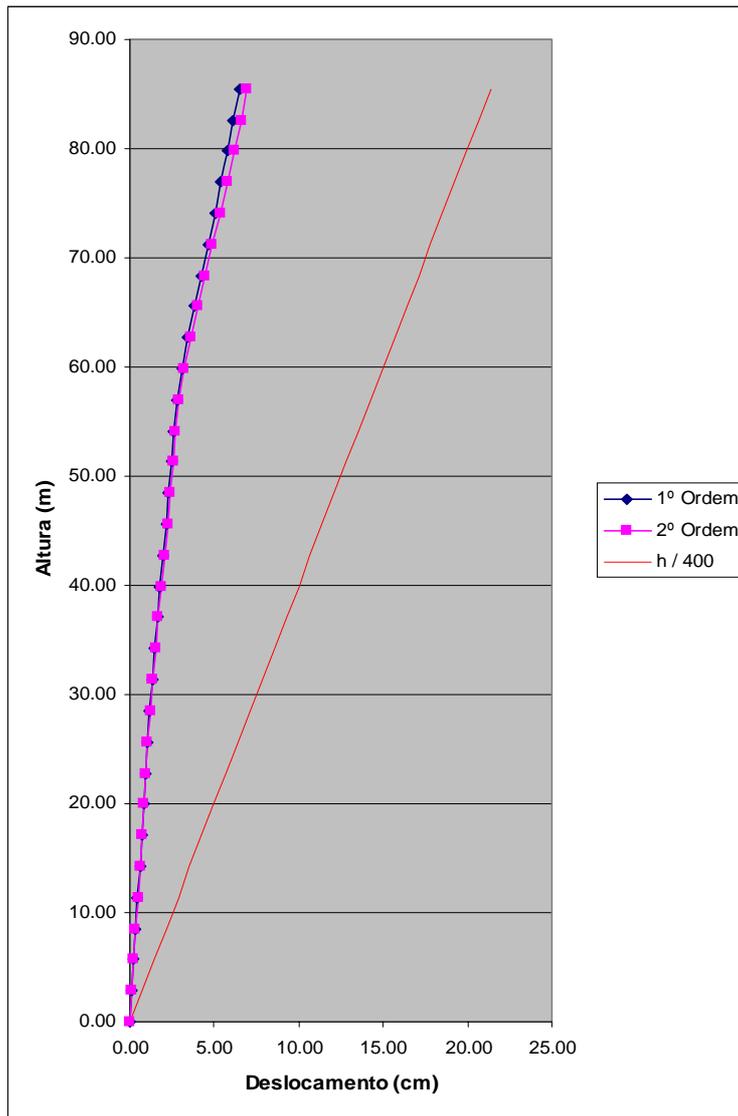


Figura IV.106 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamento escalonado

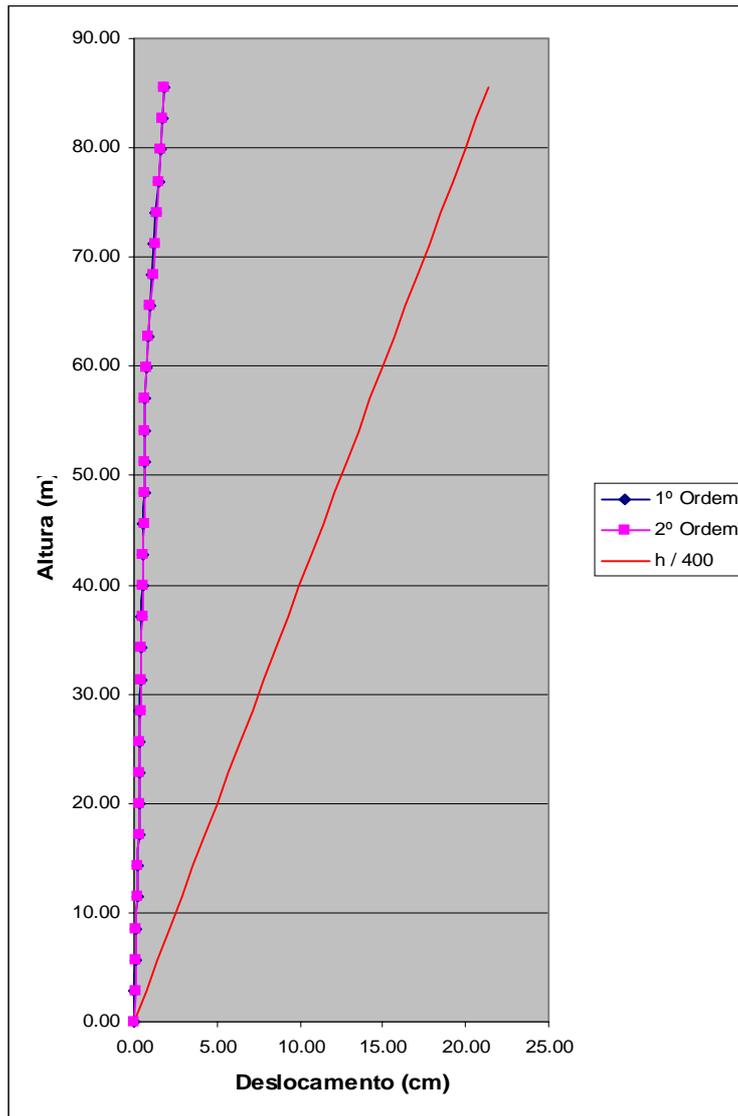


Figura IV.107 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamento escalonado

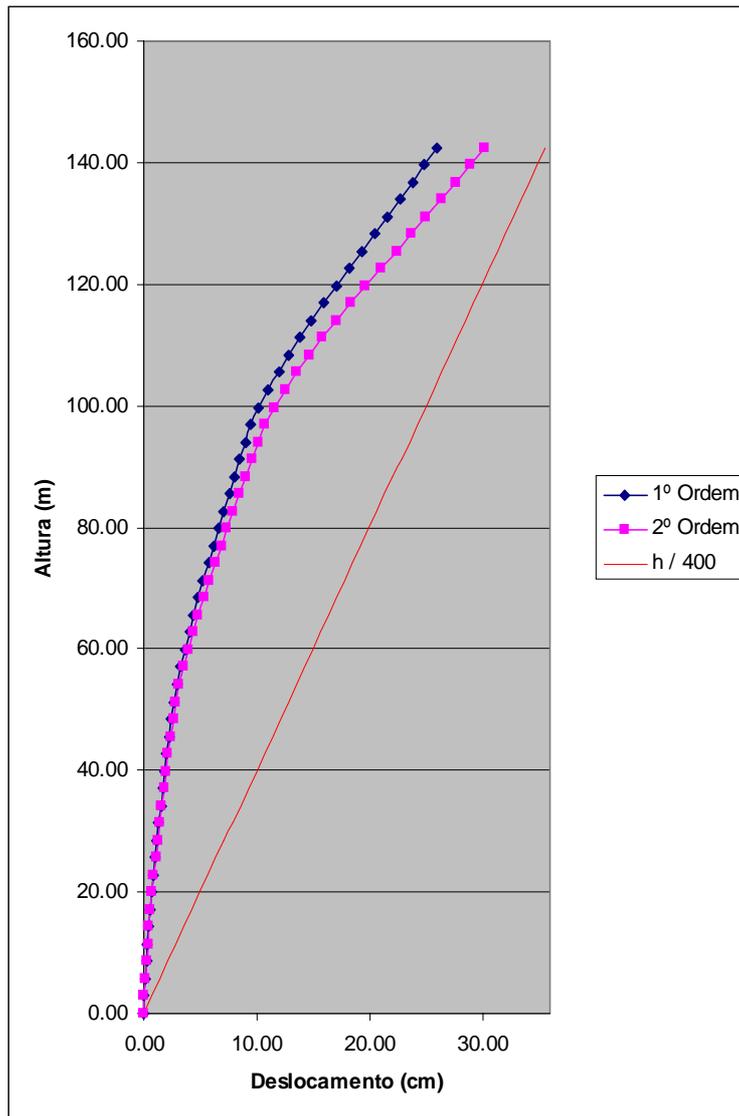


Figura IV.108 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamento escalonado

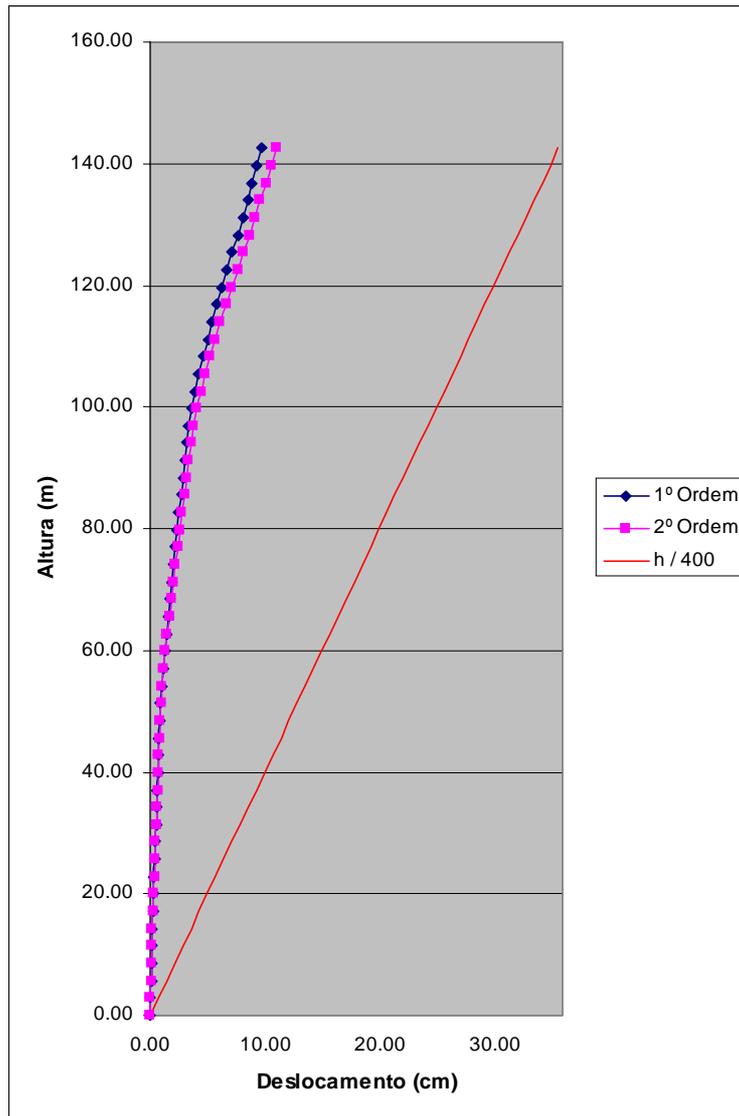


Figura IV.109 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamento escalonado

4.8.1.4. Análise comparativa dos deslocamentos para as estruturas com contraventamento escalonado e com contraventamento contínuo

As figuras IV.110 a IV.113 a seguir apresentam um comparativo entre os deslocamentos laterais das estruturas com contraventamento escalonado e não escalonado.

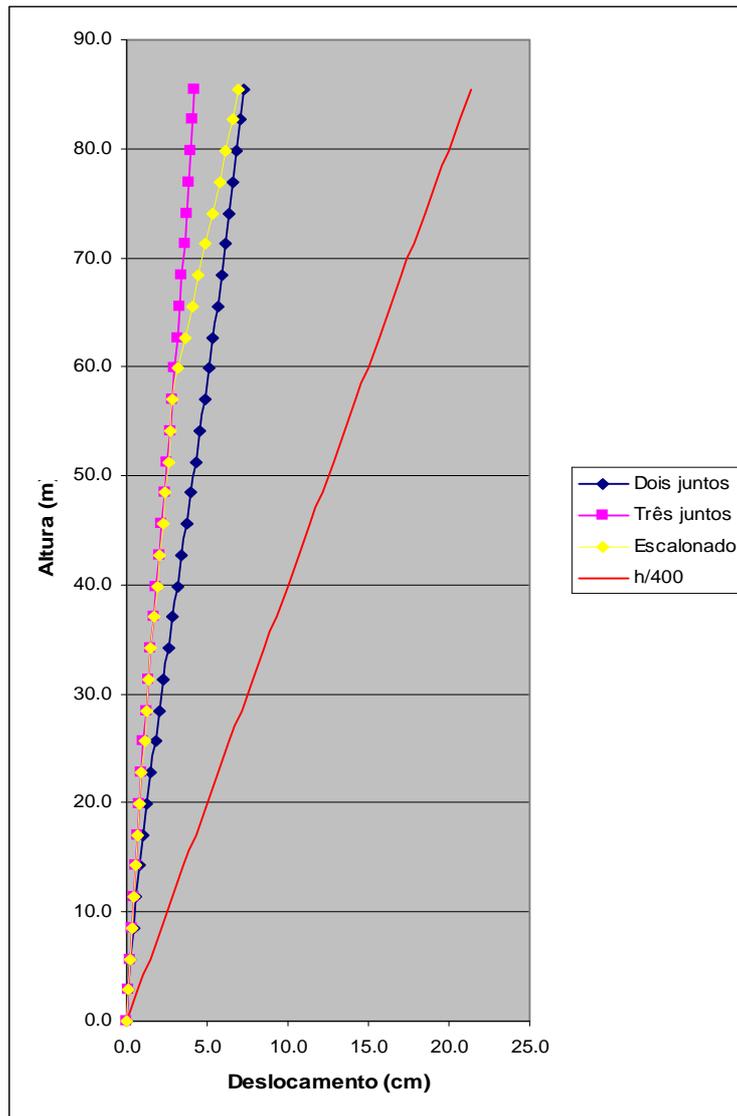


Figura IV.110 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 30 pavimentos utilizando contraventamentos escalonados e contínuos

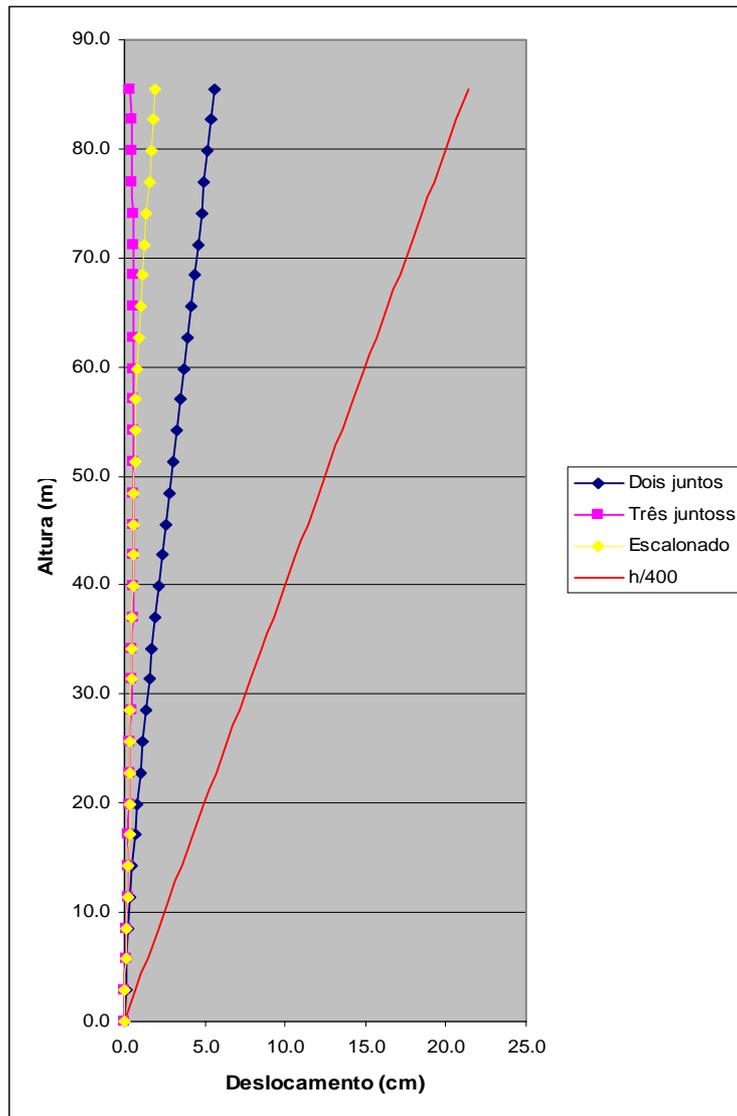


Figura IV.111 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 30 pavimentos utilizando contraventamentos escalonados e contínuos

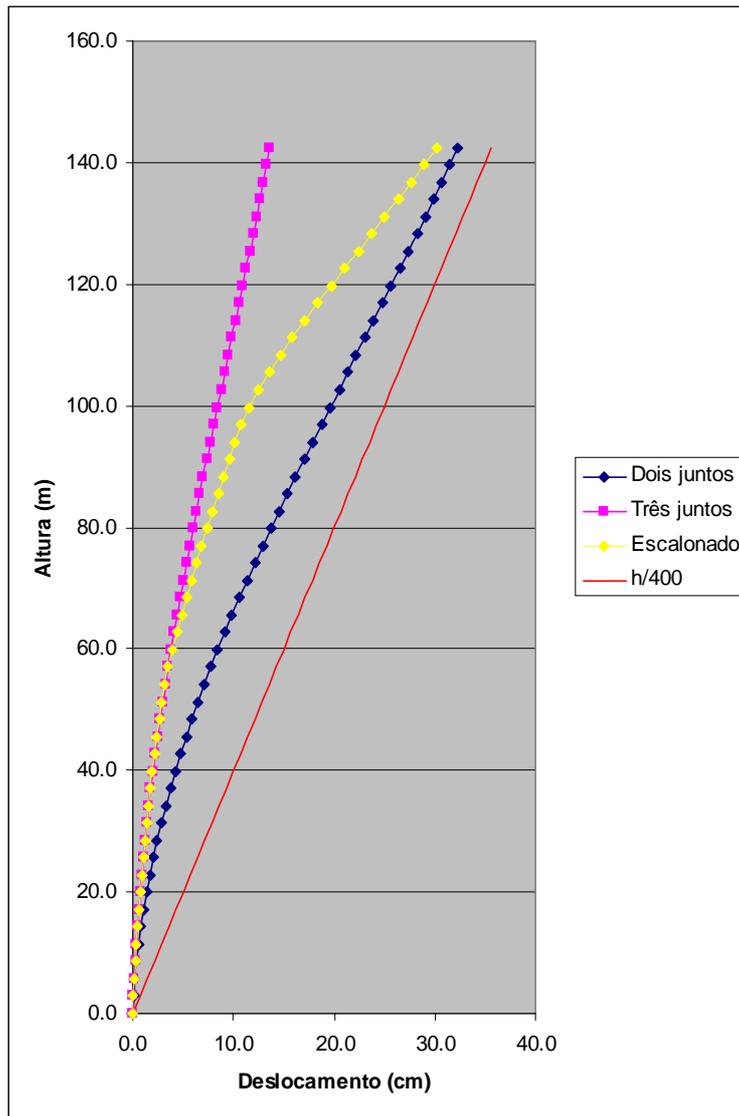


Figura IV.112 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos utilizando contraventamentos escalonados e contínuos

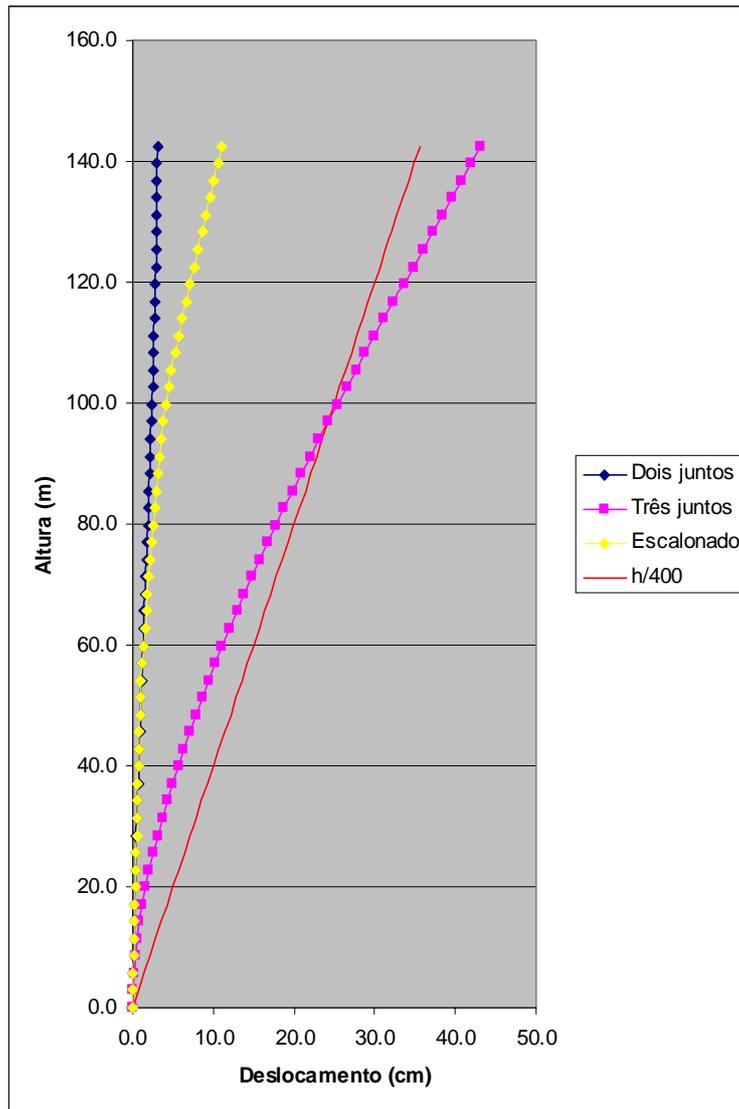


Figura IV.113 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos utilizando contraventamentos escalonados e contínuos

O quadro IV.73 a seguir, mostra a relação entre o deslocamento máximo “d” no topo da estrutura e a altura “H” da edificação, para as três diferentes formas de contraventamentos.

Quadro IV.73 - Relação entre o deslocamento no topo e a altura da edificação de 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contrav. escalonado
d / H	1/1180	1/2045	1/1231

Quadro IV.74 - Relação entre o deslocamento no topo e a altura da edificação de 50 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contrav. escalonado
d / H	1/442	1/1048	1/471

As ampliações para os deslocamentos, já definidas como a relação entre os deslocamentos obtidos de uma análise não linear geométrica e os deslocamentos obtidos de uma análise linear foram as seguintes:

Quadro IV.75 - Amplificações de deslocamentos na direção Y para a edificação de 30 pavimentos

TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contrav. escalonado
1,081	1,034	1,071

Quadro IV.76 - Amplificações de deslocamentos na direção Y para a edificação de 50 pavimentos

TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contrav. escalonado
1,189	1,070	1,165

Já era de se esperar que a estrutura com contraventamento em três vãos resultasse em menores deslocamentos laterais. No entanto, a estrutura com o contraventamento escalonado mostrou-se bem menos flexível que a estrutura com dois

vãos totalmente contraventados. Percebe-se, entretanto, que embora possua um melhor comportamento à flexão, tanto a estrutura com contraventamento escalonado como a estrutura com contraventamento contínuo em dois vãos não atenderam os limites impostos pela NBR-8800 [17]. A primeira apenas devido ao deslocamento relativo entre pisos, no trecho onde o contraventamento possui apenas um vão contraventado, a segunda, além deste motivo, por não atender o limite de deslocamento máximo relativo à base da edificação.

Os deslocamentos máximos no topo da estrutura (quadros IV.73 e IV.74), bem como as ampliações dos deslocamentos de primeira e segunda ordem (IV.75 e IV.76), vem a confirmar que o contraventamento escalonado possui um comportamento superior comparado ao contraventamento contínuo em dois vãos.

4.8.2. VERIFICAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

As frequências naturais das estruturas, correspondentes à translação segundo os eixos X e Y, respectivamente, estão apresentadas nos quadros IV.77 e IV.78 a seguir:

Quadro IV.77 - Frequência natural da estrutura segundo translação nos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contra-ventamento escalonado
f_1 (Hz)	0,2659	0,3981	0,2967
f_2 (Hz)	0,2421	0,3484	0,2604

Quadro IV.78 - Frequência natural da estrutura segundo translação nos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contra-ventamento escalonado
f_1 (Hz)	0,1132	0,2141	0,1715
f_2 (Hz)	0,0977	0,1692	0,1420

Os deslocamentos laterais da estrutura, obtidos para as forças devidas ao vento com um período de recorrência de 10 anos, foram os seguintes:

Quadro IV.79 - Deslocamento da estrutura de 30 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contraventamento escalonado
Deslocamento em X (cm)	2,53	1,01	1,07
Deslocamento em Y (cm)	3,06	1,88	1,49

Quadro IV.80 - Deslocamento da estrutura de 50 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contraventamento escalonado
Deslocamento em X (cm)	5,93	1,73	4,89
Deslocamento em Y (cm)	10,64	6,26	10,21

Com os valores das frequências naturais das estruturas e dos seus deslocamentos, foi possível calcular a amplitude máxima da aceleração, resultando nos seguintes valores:

Quadro IV.81 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contraventamento escalonado
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0706	0,0631	0,0371
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,0708	0,0900	0,0398

Quadro IV.82 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 50 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contraventamento escalonado
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0299	0,0313	0,0567
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,0403	0,0707	0,0813

Quanto ao conforto humano todas as estruturas atenderam às prescrições da NBR-8800, que limita a amplitude máxima da aceleração em $0,1m/s^2$.

4.8.3. CONSUMO DE AÇO

Os perfis obtidos para as estruturas, estão apresentados nos quadros IV.83 e IV.84 a seguir.

Quadro IV.83 - Perfis utilizados na edificação com 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. Juntos	Três contrav. juntos	Contrav. escalonado
Colunas - 1	CS 550x368	CS 550x368	CS 550x368
Colunas - 2	CS 550x345	CS 550x290	CS 550x290
Colunas - 3	CS 550x228	CS 550x228	CS 550x228
Colunas - 4	CS 550x228	CS 550x228	CS 550x228
Colunas - 5	CS 550x228	CS 550x228	CS 550x228
Contraventamento - 1	HP 250x62	HP 250x62	HP 250x73
Contraventamento - 2	HP 250x62	HP 250x53	HP 250x62
Contraventamento - 3	HP 200x53	HP 200x46	HP 250x53
Contraventamento - 4	HP 200x46	HP 200x46	HP 200x53
Contraventamento - 5	HP 200x35	HP 200x35	HP 200x46
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75	VS 550X75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51	VS 450X51

Quadro IV.84 - Perfis utilizados na edificação com 50 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. Juntos	Três contrav. juntos	Contrav. escalonado
Colunas - 1	CS 650x823*	CS 650x693*	CS 650x693*
Colunas - 2	CS 650x588	CS 650x496	CS 650x496
Colunas - 3	CS 650x395	CS 650x395	CS 650x395
Colunas - 4	CS 650x305	CS 650x305	CS 650x305
Colunas - 5	CS 650x305	CS 650x305	CS 650x305
Contraventamento - 1	CS 500x194	CS 400x165	CS 500x194
Contraventamento - 2	CS 450x154	CS 350x135	CS 400x165
Contraventamento - 3	CS 350x119	CS 350x102	CS 350x135
Contraventamento - 4	CS 350x93	CS 300x76	CS 400x106
Contraventamento - 5	CS 250x52	CS 250x52	CS 300x62
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75	VS 550X75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51	VS 450X51

* Não padronizado

Os respectivos consumos de aço obtidos para cada grupo de elementos estruturais estão apresentados nos quadros IV.85 e IV.86.

Quadro IV.85 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 30 pavimentos (Ton)

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contrav. escalonado
Colunas	547,93	526,69	526,69
Contraventamento	125,60	176,48	147,05
Vigas	692,20	692,20	692,20
Consumo total de aço (Ton)	1365,73	1395,37	1365,94

Quadro IV.86 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 50 pavimentos (Ton)

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contrav. escalonado
Colunas	1578,94	1433,41	1433,41
Contraventamento	493,53	648,48	613,79
Vigas	1150,05	1150,05	1150,05
Consumo total de aço (Ton)	3222,52	3231,94	3197,25

Quadro IV.87 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contrav. escalonado
Consumo de aço (kg/m ²)	52,62	53,76	52,70

Quadro IV.88 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 50 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Dois contrav. juntos	Três contrav. juntos	Contrav. escalonado
Consumo de aço (kg/m ²)	74,61	74,82	74,02

Os gráficos das figuras IV.114 e IV.115 ilustram o consumo de aço por metro quadrado para as diferentes tipos de contraventamentos.

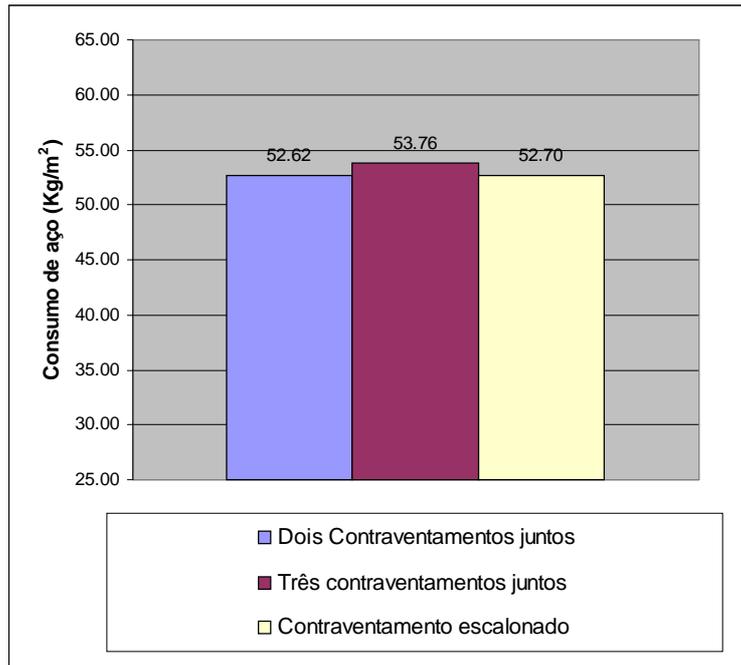


Figura IV.114 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 30 pavimentos para os diferentes tipos de contraventamento

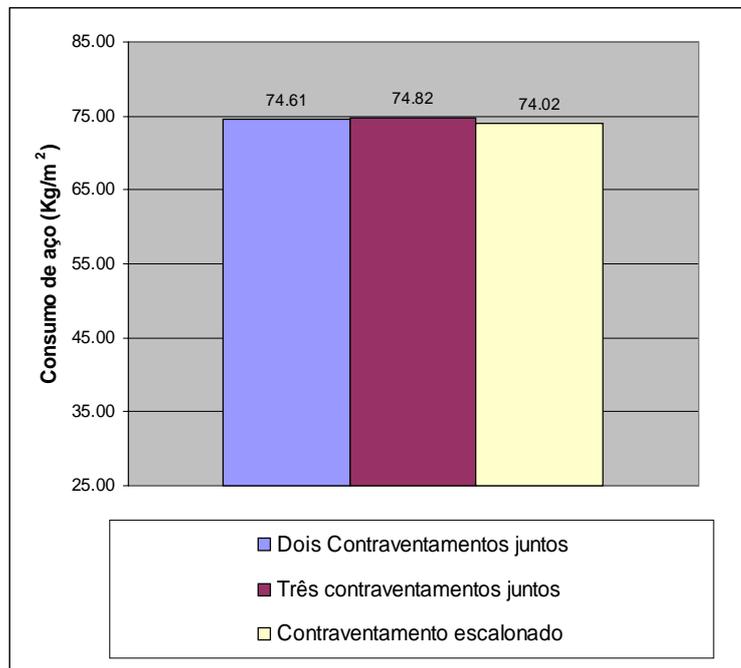


Figura IV.115 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos para os diferentes tipos de contraventamento

Quanto ao consumo de material, as estruturas apresentaram comportamento bastante semelhante, sendo as diferenças oriundas basicamente do consumo de aço das diagonais.

O fato do contraventamento escalonado não ter atendido à NBR-8800 [17] no que diz respeito aos deslocamentos entre pavimentos, não inviabiliza esta solução. Este mau comportamento pode ser explicado pela grandes solicitações de vento no topo da estrutura aliada à esbeltez do treliçamento no trecho mais alto da estrutura.

4.9. ANÁLISE DOS RESULTADOS QUANTO À INTERAÇÃO ENTRE CONTRAVENTAMENTOS EM ÚNICO VÃO E EM GRANDE ESCALA

A análise, quanto à interação entre um contraventamento em único vão, e um contraventamento em grande escala, foi feita para as edificações com 30 e 50 pavimentos, e os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

4.9.1. DESLOCAMENTOS LATERAIS

4.1.1.1. Contraventamento posicionado em um único vão

As estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujo sistema de contraventamento foi formado por treliçamentos ao longo de um único vão da estrutura em toda a sua altura, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.116 a IV.119):

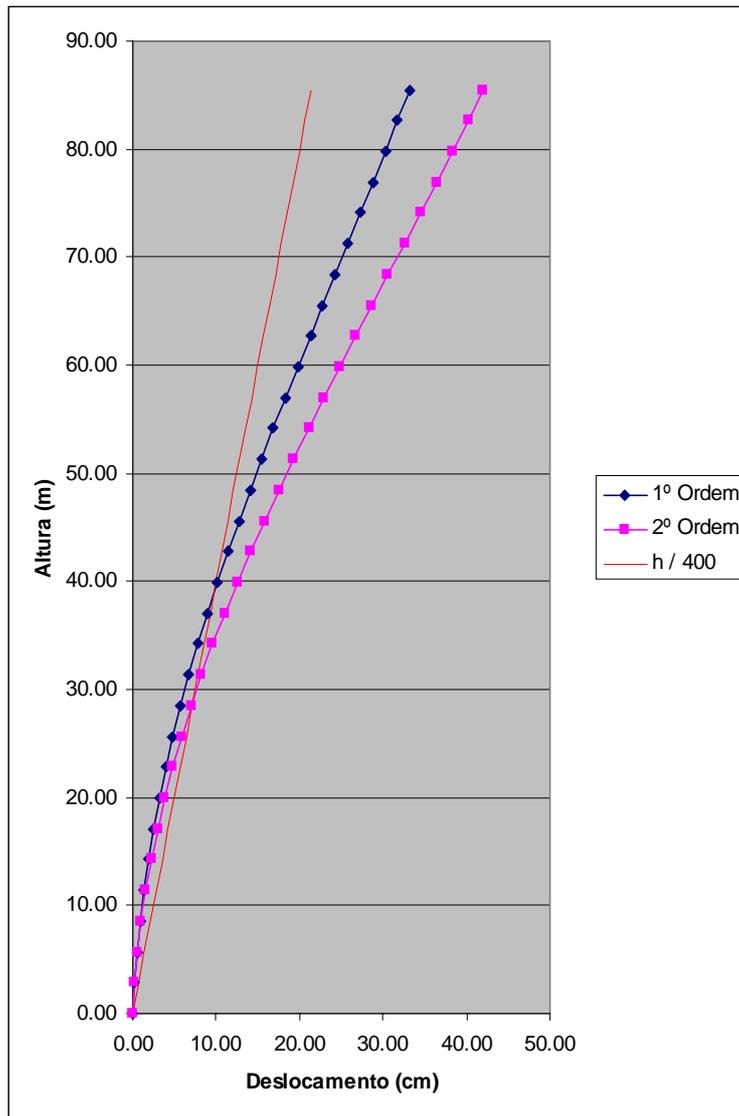


Figura IV.116 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos ao longo de único vão

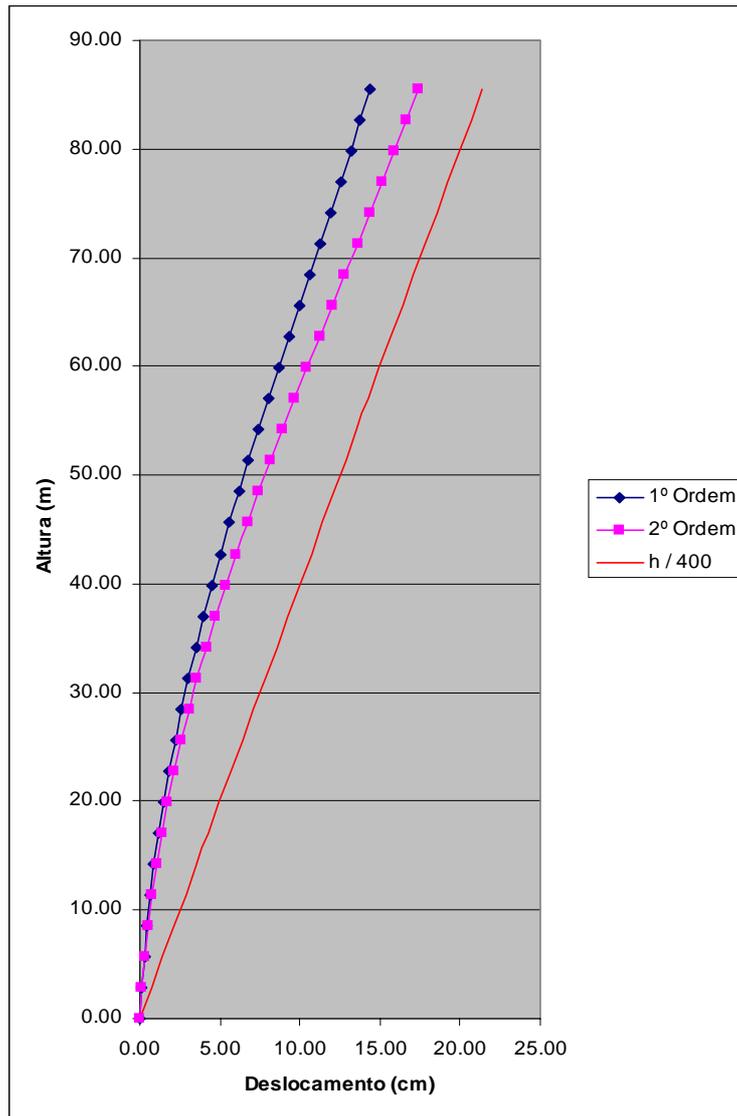


Figura IV.117 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão

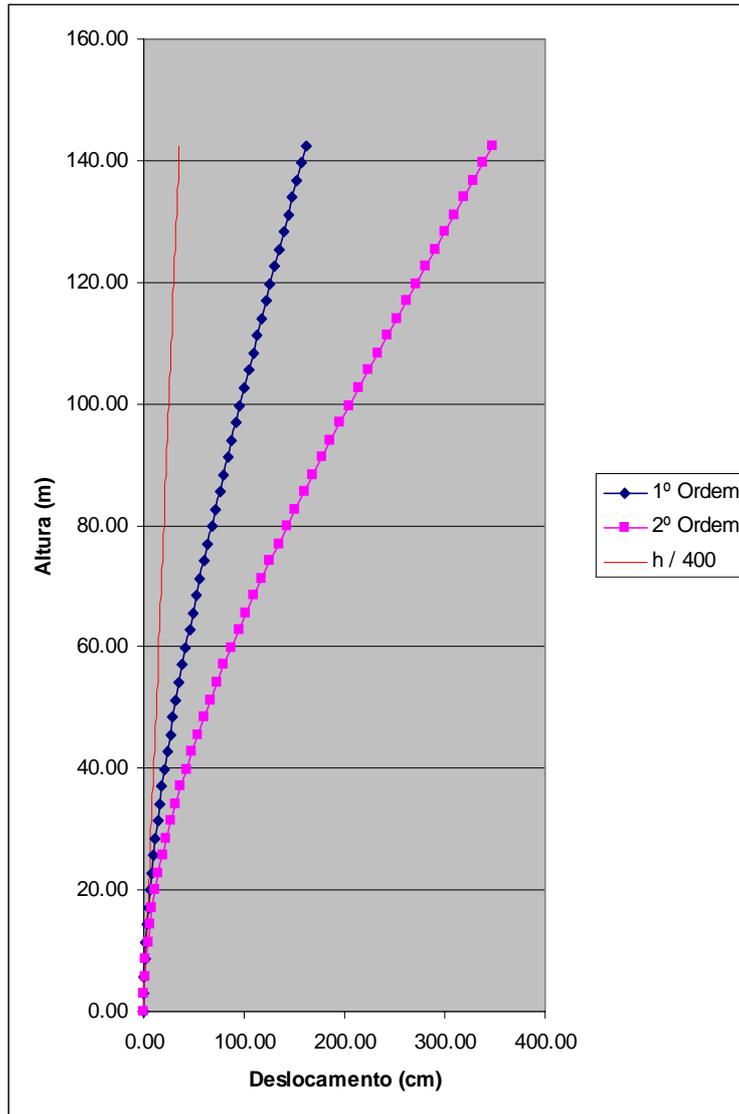


Figura IV.118 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão

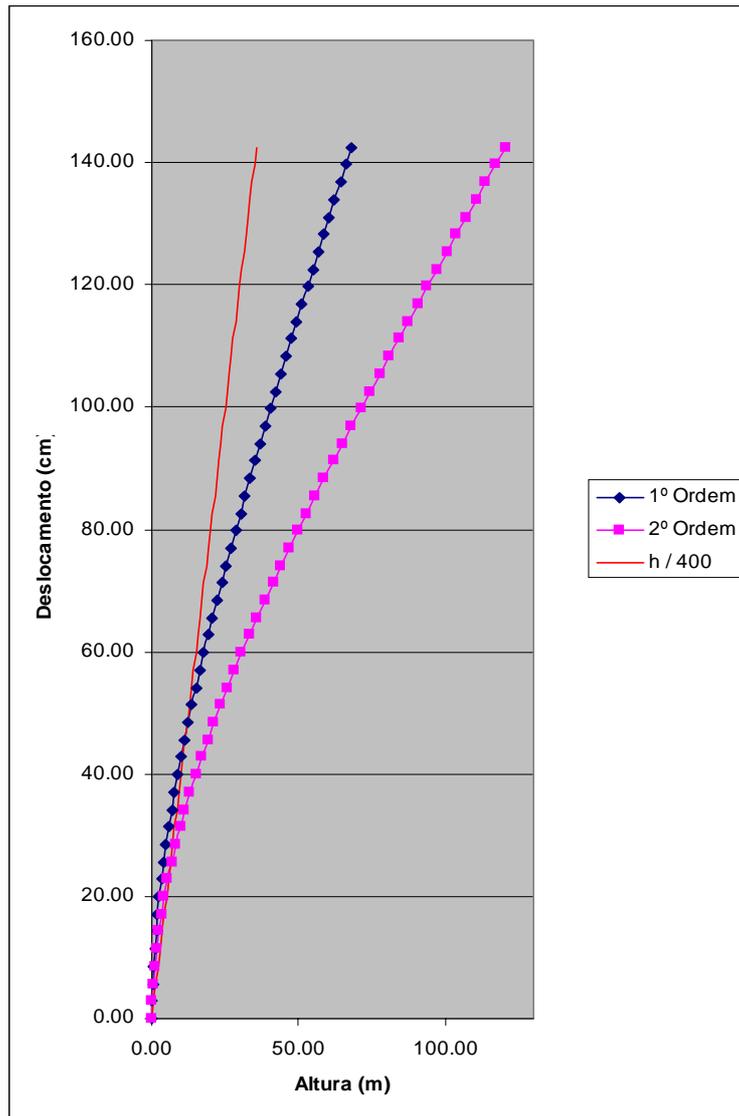


Figura IV.119 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão

4.9.1.2. Contraventamento em grande escala

Os deslocamentos das estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados por treliças com módulos de grandes dimensões, apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.120 a IV.123):

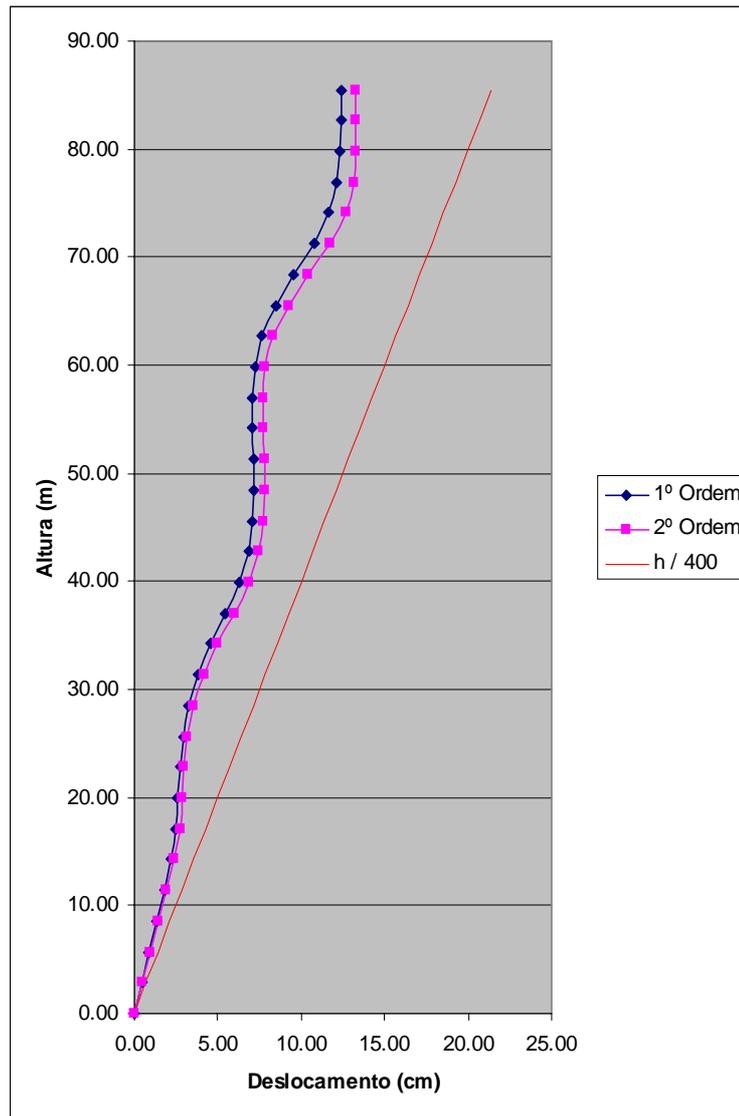


Figura IV.120 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos em grande escala

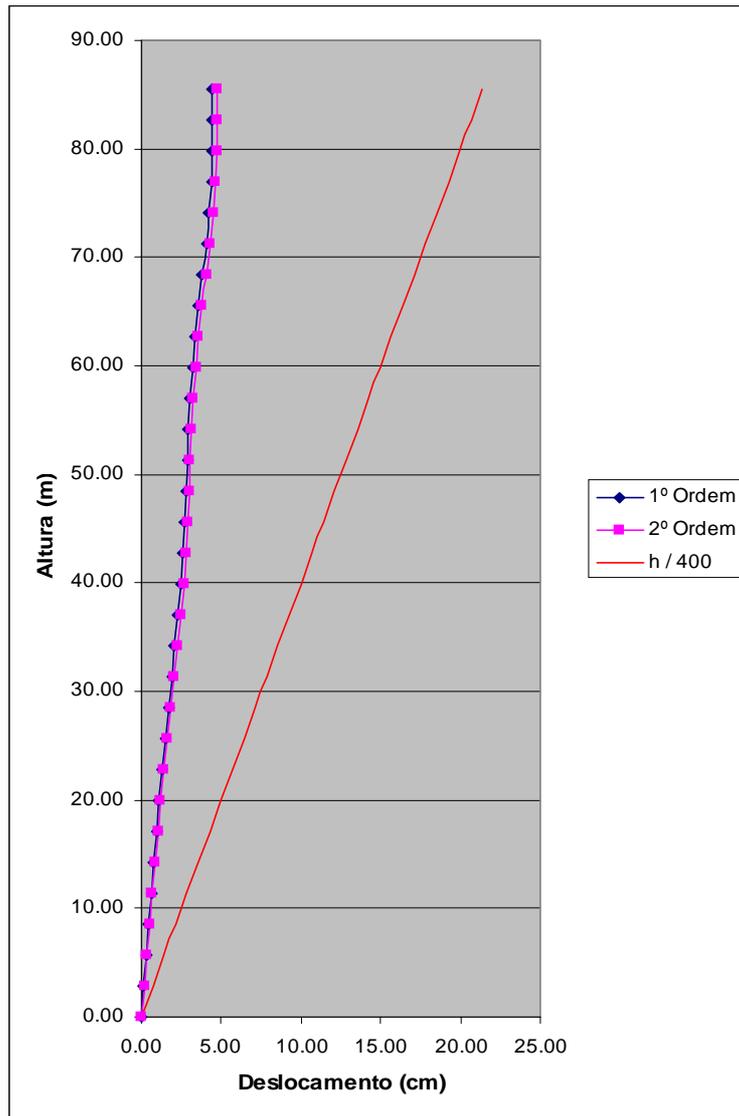


Figura IV.121 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos em grande escala

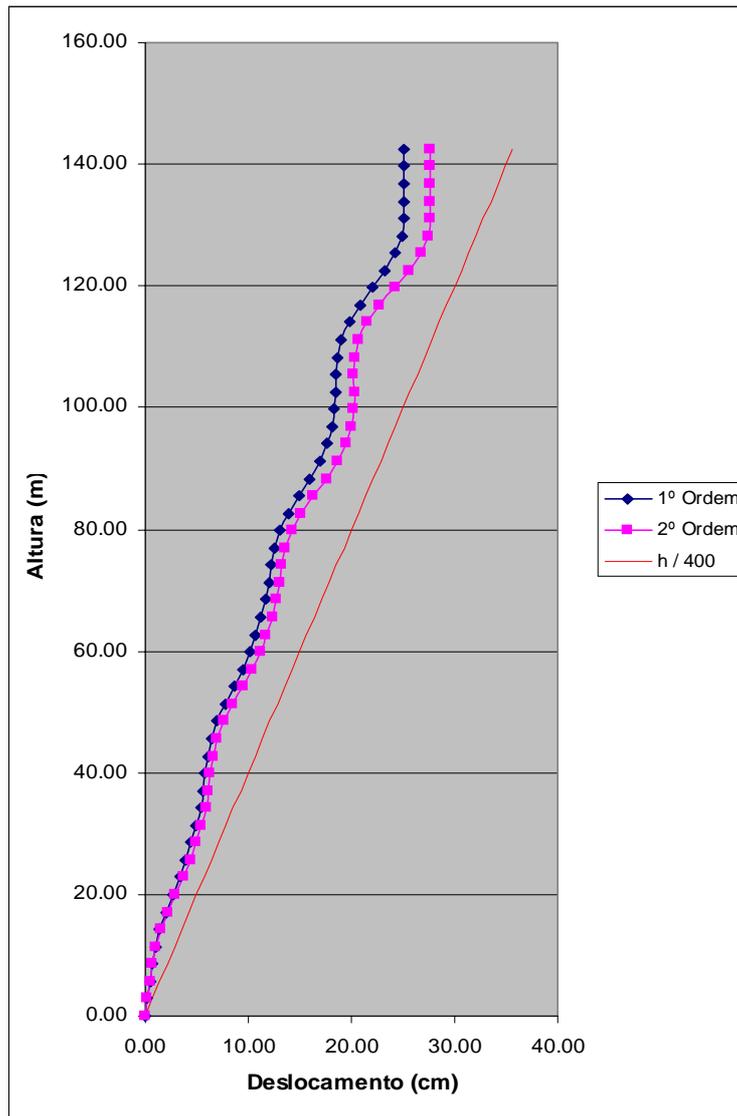


Figura IV.122 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos em grande escala

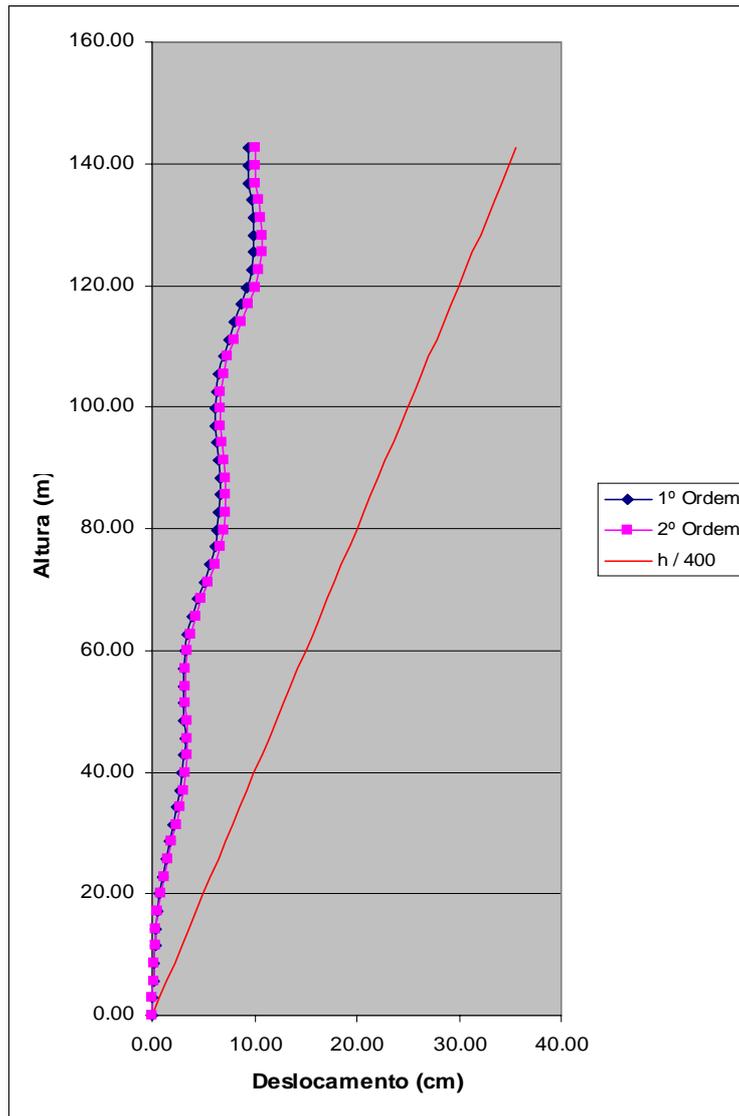


Figura IV.123 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos em grande escala

4.9.1.3. Interação entre contraventamentos em grande escala e em único vão

Os deslocamentos das estruturas com 30 e 50 pavimentos, cujos sistemas de contraventamento foram formados pela interação entre contraventamentos em grande escala e contraventamentos em único vão apresentaram os seguintes deslocamentos laterais (figura IV.124 a IV.127):

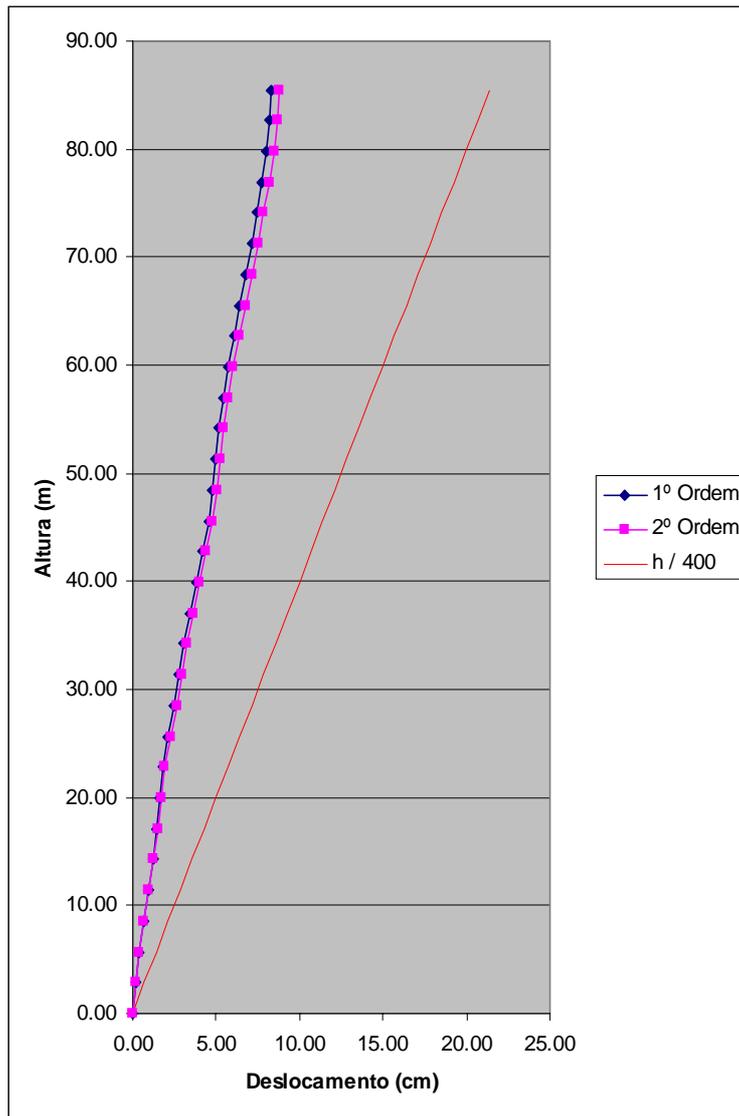


Figura IV.124 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos em único vão e em grande escala

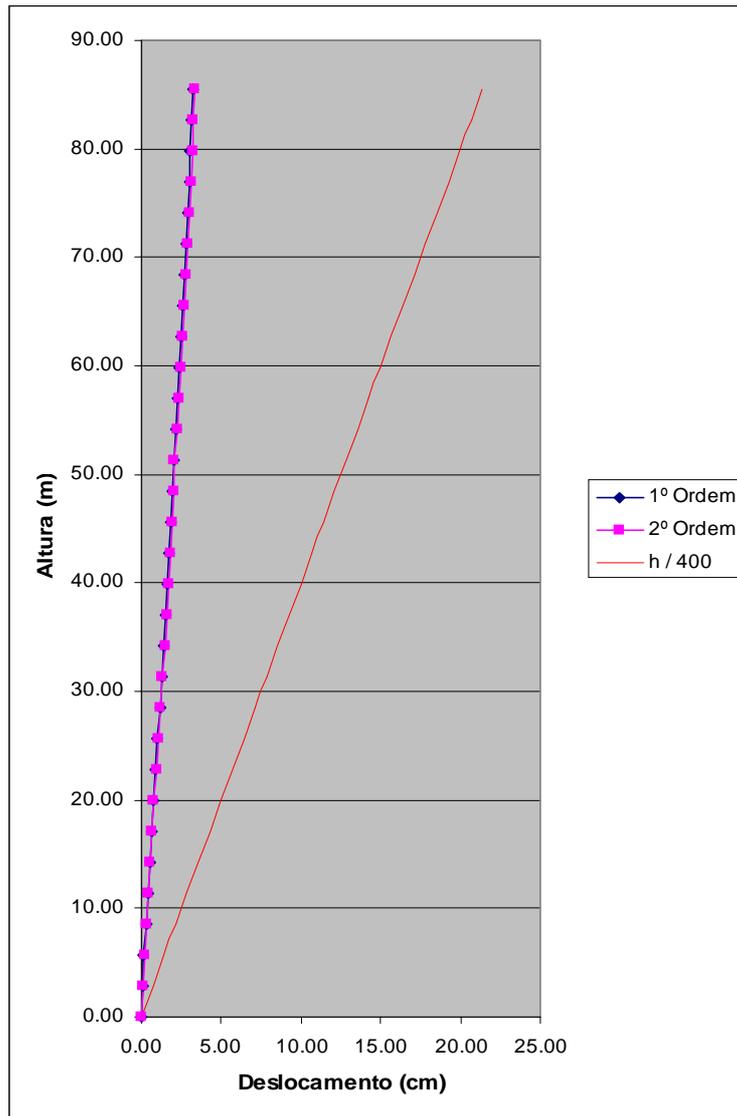


Figura IV.125 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos em único vão e em grande escala

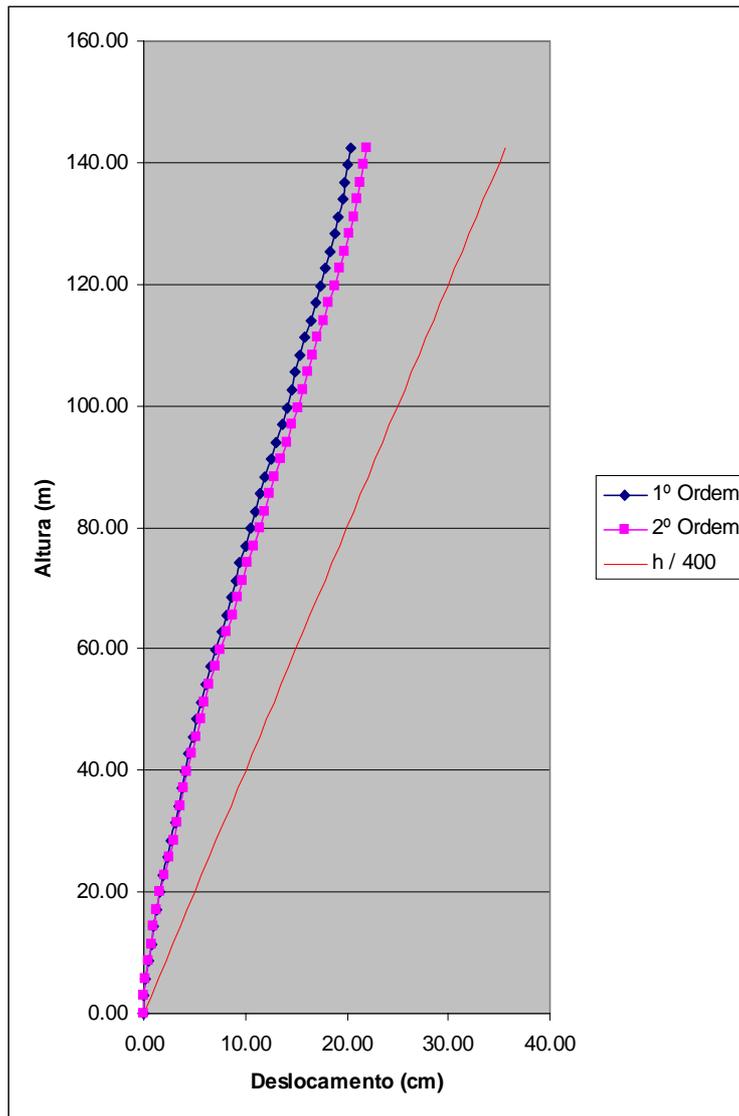


Figura IV.126 - Deslocamentos na direção “Y” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos em único vão e em grande escala

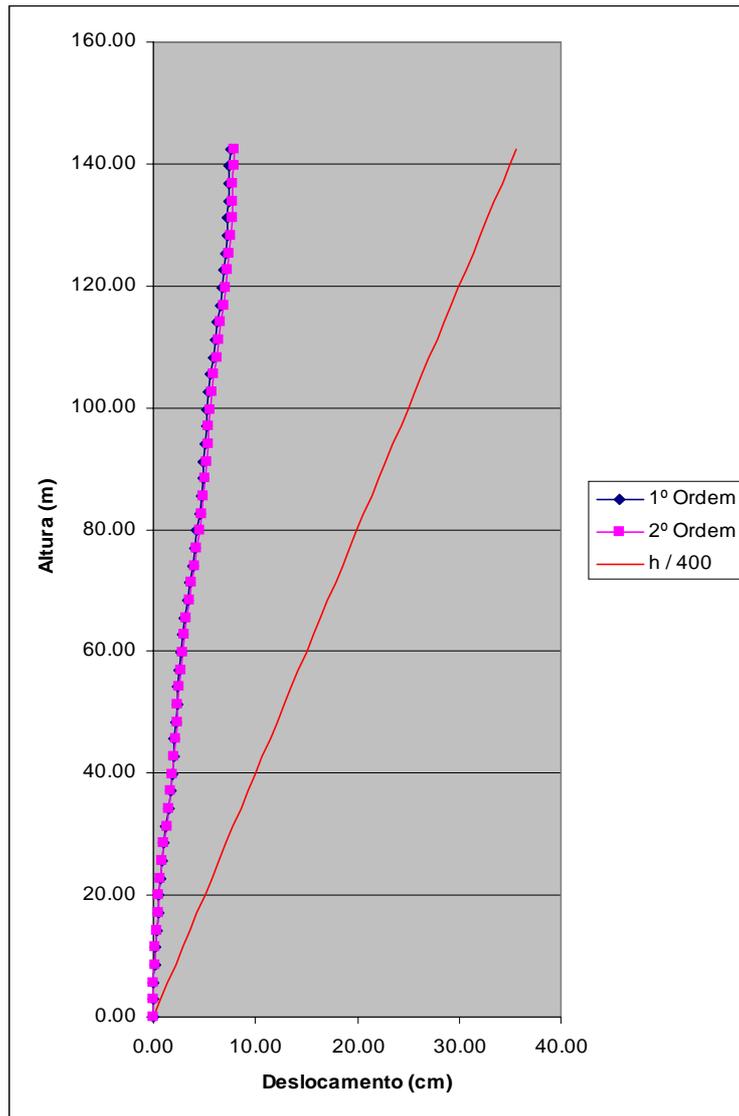


Figura IV.127 - Deslocamentos na direção “X” x Altura da edificação para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos em único vão e em grande escala

4.9.1.4. Análise comparativa dos deslocamentos para os contraventamentos em grande escala, em único vão e da sua respectiva interação

As figuras IV.128 a IV.131 a seguir apresentam um comparativo quanto aos deslocamentos laterais entre as três formas de associação de contraventamentos abordadas neste item.

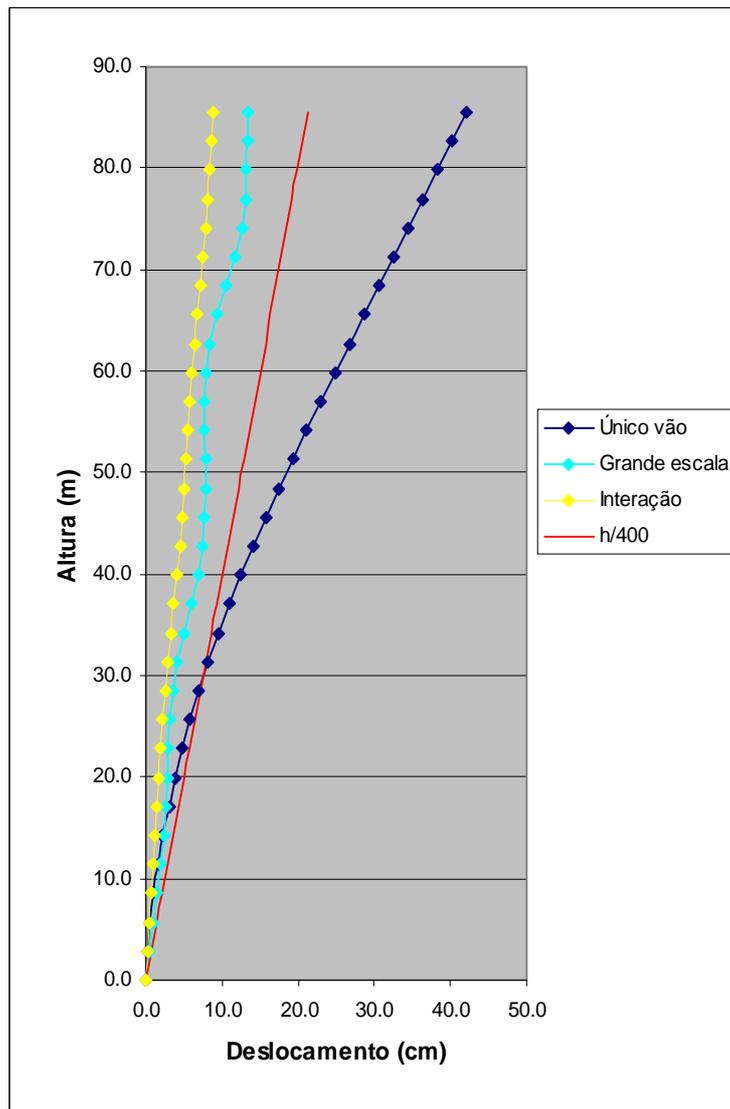


Figura IV.128 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 30 pavimentos para as três formas de contraventamento

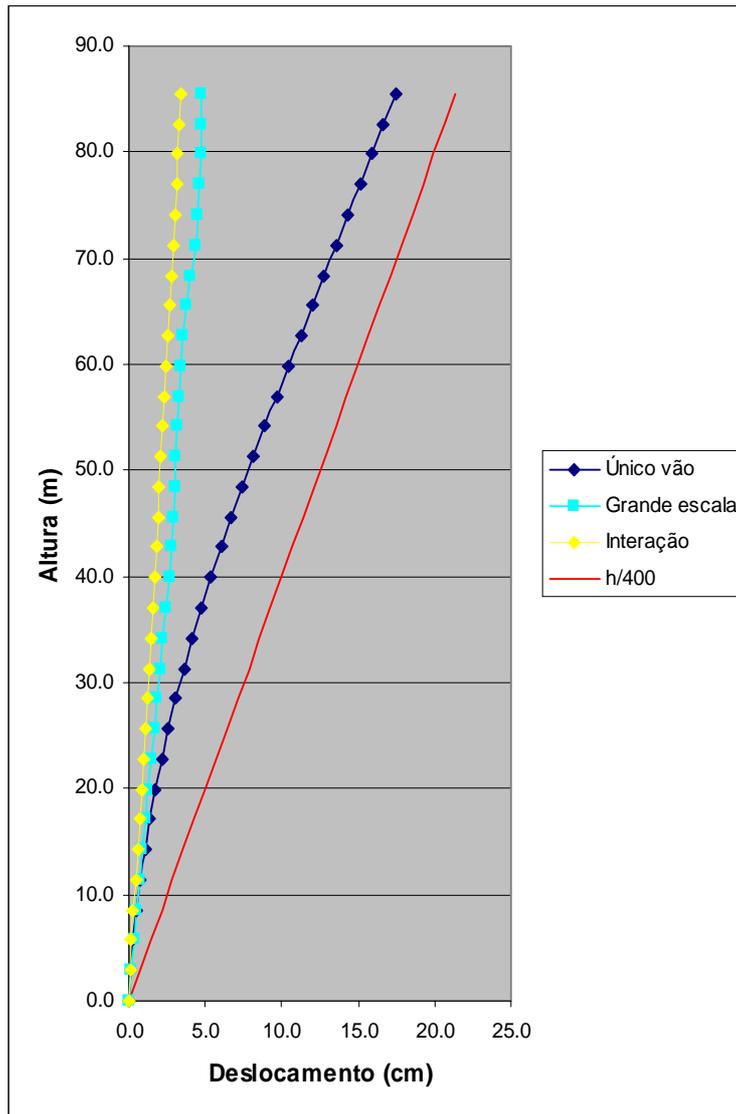


Figura IV.129 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 30 pavimentos para as três formas de contraventamentos

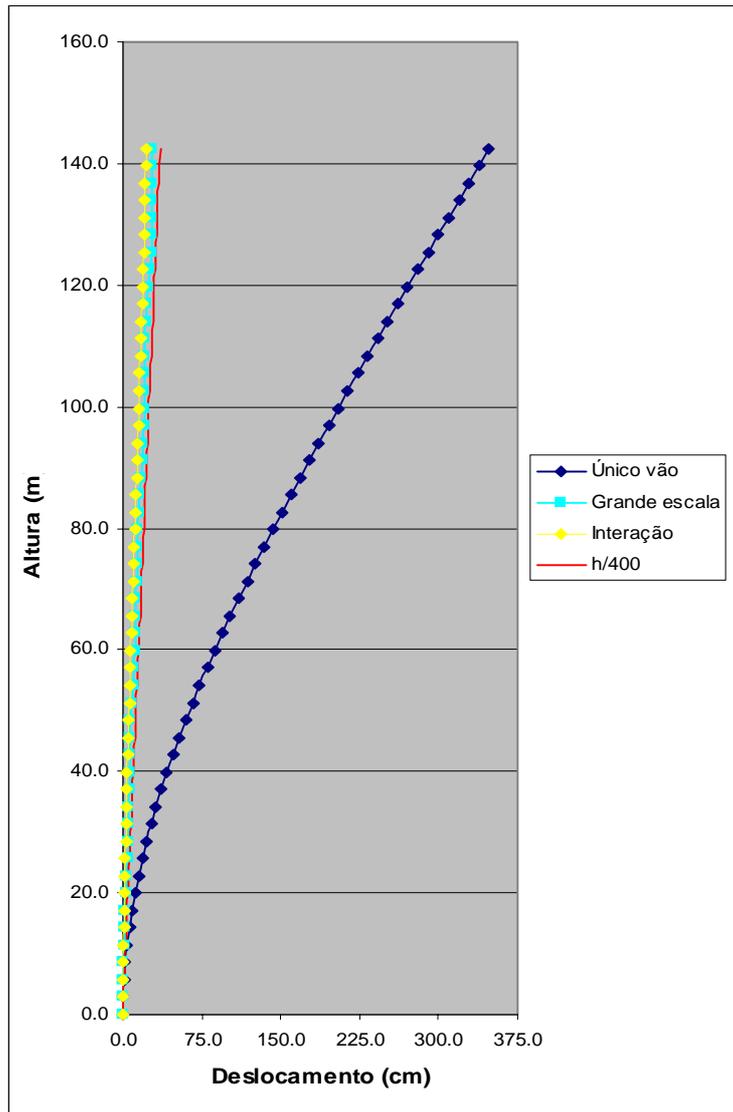


Figura IV.130 - Deslocamentos na direção "Y" x Altura da edificação de 50 pavimentos para as três formas de associações

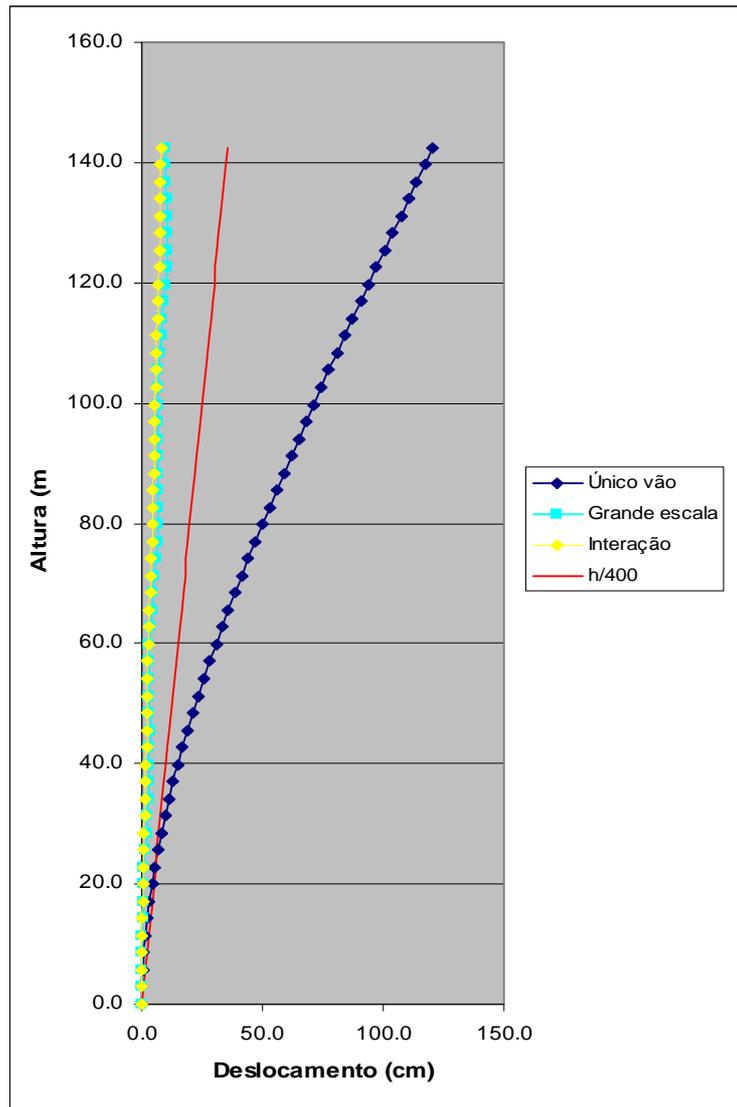


Figura IV.131 - Deslocamentos na direção "X" x Altura da edificação de 50 pavimentos para as três formas de associações

O quadro IV.89 a seguir, mostra a relação entre o deslocamento máximo “d” no topo da estrutura e a altura “H” da edificação, para as três diferentes formas de contraventamentos abordadas neste item.

Quadro IV.89 - Relação entre o deslocamento no topo e a altura da edificação de 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre os contrav.
d / H	1/203	1/643	1/970

Quadro IV.90 - Relação entre o deslocamento no topo e a altura da edificação de 50 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre os contrav.
d / H	1/41	1/514	1/647

As amplificações para os deslocamentos de primeira e de segunda ordem se encontram nos quadros IV.91 e IV.92:

Quadro IV.91 - Amplificações de deslocamentos na direção Y para a edificação de 30 pavimentos

TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre os contrav.
1,267	1,071	1,056

Quadro IV.92 - Amplificações de deslocamentos na direção Y para a edificação de 50 pavimentos

TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre os contrav.
2,159	1,100	1,079

Os resultados apresentados mostraram que a interação entre uma estrutura com contraventamento em único vão e uma estrutura com contraventamento em grande escala foi bastante benéfica. A estrutura com contraventamento em “X” ao longo de um único vão possui pouca rigidez lateral, no entanto, possui uma absorção relativamente boa do corte lateral. De modo contrário, a estrutura contraventada com diagonais em grande escala, possui boa rigidez lateral, ficando a desejar na absorção do corte horizontal, especialmente nos pavimentos em que as diagonais estão no mesmo sentido

da solicitação externa como se pode ver através da figura IV.122. Ao se impor a compatibilidade de deslocamentos através da união destes dois contraventamentos, as virtudes de cada sistema de contraventamento são somadas, resultando num conjunto com boa rigidez à flexão e ao corte, trazendo menores deslocamentos laterais relativos à base da edificação e entre pavimentos.

4.9.2. VERIFICAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

Através da análise dinâmica da estrutura obtivemos as seguintes frequências naturais, correspondentes à translação segundo os eixos X e Y respectivamente:

Quadro IV.93 - Frequência natural da estrutura segundo translação nos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre os contrav.
f_1 (Hz)	0,1555	0,2660	0,2688
f_2 (Hz)	0,1364	0,2375	0,2506

Quadro IV.94 - Frequência natural da estrutura segundo translação nos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre os contrav.
f_1 (Hz)	0,0633	0,2012	0,2193
f_2 (Hz)	0,0498	0,1721	0,1767

Os deslocamentos laterais da estrutura, obtidos para as forças devidas ao vento com um período de recorrência de 10 anos, foram os seguintes:

Quadro IV.95 - Deslocamento da estrutura de 30 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre os contrav.
Deslocamento em X (cm)	7,88	1,97	1,46
Deslocamento em Y(cm)	19,00	6,10	4,07

Quadro IV.96 - Deslocamento da estrutura de 50 pavimentos na direção dos eixos X e Y

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre os contrav.
Deslocamento em X (cm)	54,76	3,49	3,47
Deslocamento em Y(cm)	160,52	11,24	8,76

De posse dos valores das frequências naturais das estruturas e dos seus deslocamentos, foi possível, com o auxílio da equação III.1, calcular a amplitude máxima da aceleração, fornecendo seguintes valores:

Quadro IV.97 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre os contrav.
Aceleração dir. X (m/s^2)	0,0752	0,0550	0,0416
Aceleração dir. Y (m/s^2)	0,1396	0,1359	0,1009

Quadro IV.98 - Amplitude máxima da aceleração para a edificação de 50 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre os contrav.
Aceleração dir. X (m/s ²)	0,0864	0,0558	0,0659
Aceleração dir. Y (m/s ²)	0,1572	0,1314	0,1079

Pode-se também perceber que a estrutura que utilizou a interação entre o contraventamento em grande escala e o contraventamento em único vão resultou no melhor comportamento quanto ao conforto dos usuários, obtendo-se valores bastante próximos ao limite estabelecido pela NBR-8800 [17]. As demais estruturas obtiveram acelerações bem superiores ao limite imposto pela Norma brasileira.

4.9.3. CONSUMO DE AÇO

Os perfis obtidos para as estruturas com 30 e 50 pavimentos estão apresentados nos quadros IV.183 e IV.184 abaixo.

Quadro IV.99 - Perfis utilizados na edificação com 30 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre os contraventamentos
Colunas - 1	CS 650x588	CS 550x368	CS 550x368
Colunas - 2	CS 650x437	CS 550x345	CS 550x345
Colunas - 3	CS 650x305	CS 550x257	CS 550x228
Colunas - 4	CS 650x305	CS 550x228	CS 550x228
Colunas - 5	CS 650x305	CS 550x228	CS 550x228
Contraventamento - 1	W 310x97	W 310x117	W 310x97
Contraventamento - 2	HP 310x93	W 250x89	HP 310x79
Contraventamento - 3	W 250x73	HP 310x79	HP 310x79
Contraventamento - 4	HP 250x62	HP 250x62	W 250x73
Contraventamento - 5	W 200x46	HP 250x62	HP 250x62
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75	VS 550X75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51	VS 450X51

Quadro IV.100 - Perfis utilizados na edificação com 50 pavimentos

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre eles
Colunas - 1	CS 650x823*	CS 650x693*	CS 650x693*
Colunas - 2	CS 650x823*	CS 650x588	CS 650x525
Colunas - 3	CS 650x823*	CS 650x437	CS 650x395
Colunas - 4	CS 650x588	CS 650x305	CS 650x305
Colunas - 5	CS 650x305	CS 650x305	CS 650x305
Contraventamento - 1	CS 400x248	CS 450x186	CS 500x194
Contraventamento - 2	CS 400x248	CS 400x185	CS 400x185
Contraventamento - 3	CS 500x207	CS 500x172	CS 500x172
Contraventamento - 4	CS 500x172	CS 350x112	CS 350x128
Contraventamento - 5	CS 300x95	CS 300x95	CS 400x106
Vigas principais	VS 550X75	VS 550x75	VS 550X75
Vigas secundárias	VS 450X51	VS 450x51	VS 450X51

* Não padronizado

Os respectivos consumos de aço obtidos para cada grupo de elementos estruturais estão apresentados a seguir.

Quadro IV.101 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 30 pavimentos (Ton)

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre eles
Colunas	760,13	559,11	547,94
Contraventamento	89,99	49,57	126,82
Vigas	692,20	692,20	692,20
Consumo total de aço (Ton)	1504,32	1300,88	1366,96

Quadro IV.102 - Consumo de aço por elemento para o edifício de 50 pavimentos (Ton)

	TIPO DE CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em grande escala	Interação entre eles
Colunas	2198,05	1520,94	1452,59
Contraventamento	396,14	153,07	343,84
Vigas	1150,05	1150,05	1150,05
Consumo total de aço (Ton)	3744,69	2824,51	2946,93

Quadro IV.103 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 30 pavimentos

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Consumo de aço (kg/m ²)	59,43	50,12	52,66

Quadro IV.104 - Consumo de aço por metro quadrado para o edifício de 50 pavimentos

	POSICIONAMENTO DO CONTRAVENTAMENTO		
	Contraventamento em único vão	Contraventamento em três vãos	Contraventamento em vãos adjacentes
Consumo de aço (kg/m ²)	86,68	68,22	65,38

Os gráficos das figuras IV.132 e IV.133 ilustram o consumo de aço por metro quadrado para as diferentes formas de associação de contraventamentos.

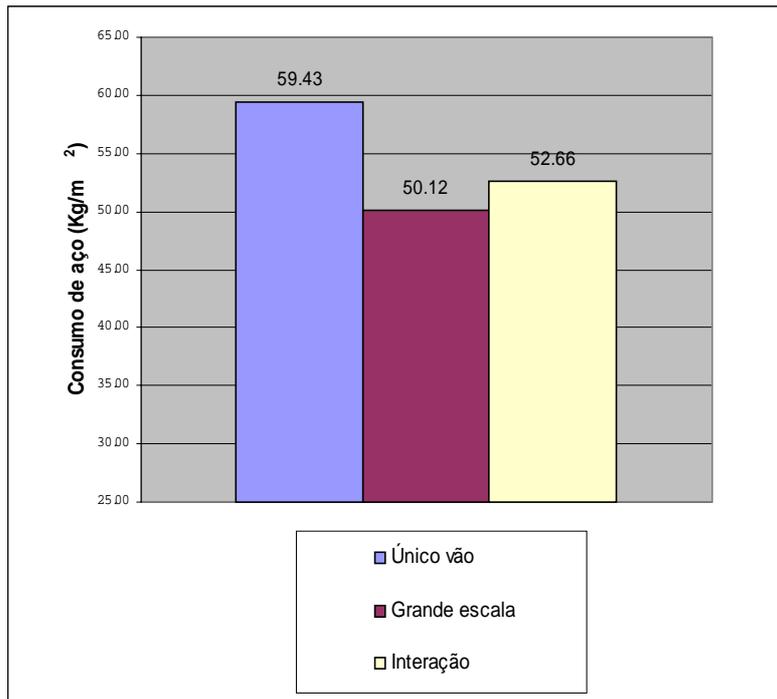


Figura IV.132 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 30 pavimentos para as diferentes formas de posicionamento dos contraventamentos

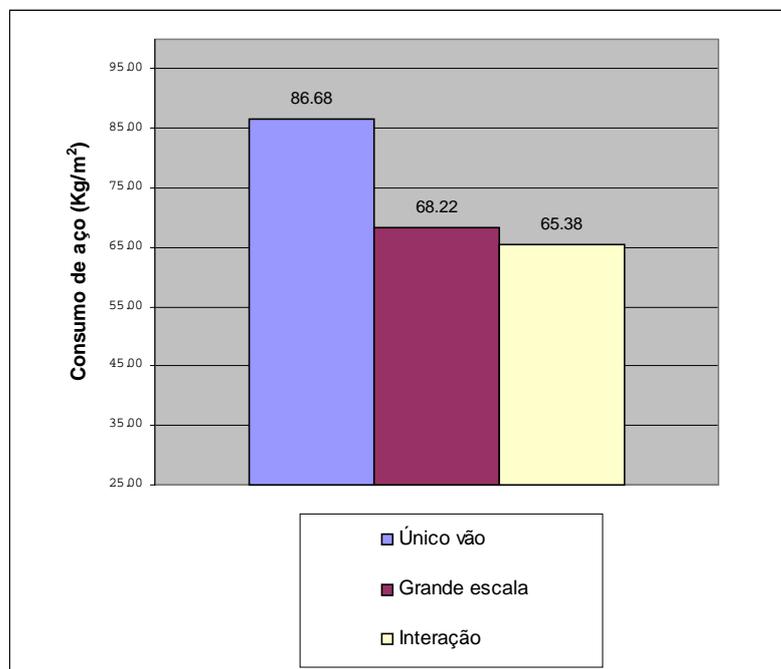


Figura IV.133 - Consumo de aço por metro quadrado da estrutura de 50 pavimentos para as diferentes formas de posicionamento dos contraventamentos

Os resultados quanto ao consumo de material mostra que, a interação entre o contraventamento em grande escala e em único vão, apresenta uma redução no consumo de aço, embora se tenha uma maior quantidade de barras na estrutura. Percebe-se assim que, com a utilização desta solução de contraventamento, obteve-se uma redução nos deslocamentos laterais aliados a um menor consumo de material.

CAPÍTULO - V

5.1. CONCLUSÕES

Antecedendo às conclusões sobre a eficiência dos sistemas de contraventamento analisados neste trabalho, se faz necessário um exame do conceito de eficiência, a fim de precisar sua significação no contexto deste trabalho. De acordo com o Ferreira [31] o termo eficiência pode ser entendido como sendo a virtude de produzir um efeito; ou ainda, eficácia. No entanto, o conceito de virtude e de eficácia para um sistema de contraventamento pode variar em função de quem analisa a estrutura. Para um arquiteto um sistema de contraventamento pode ser considerado mais eficiente à medida que causa menos obstrução à sua arquitetura ou proporciona um maior realce à plástica da sua edificação. Para os ocupantes da edificação, a eficiência dos sistemas de contraventamento pode ser aferida através da sensação de conforto proporcionada. Para o construtor a eficiência dos sistemas de contraventamento está relacionada com o menor consumo de material e menor desprendimento de mão-de-obra para a execução. Para um proprietário de um empreendimento comercial, um eficiente sistema de contraventamento seria aquele que possibilitasse a racionalização do processo construtivo de forma a proporcionar uma maior velocidade de execução da estrutura possibilitando o retorno mais precoce do seu investimento. Para o engenheiro estrutural, um eficiente sistema de contraventamento será aquele que atenda a todos os requisitos estabelecidos pelas normas técnicas, além dos requisitos arquitetônicos, econômicos, de utilização, de execução, etc.

Percebe-se então que não é fácil estabelecer critérios comparativos que definam a eficiência dos sistemas de contraventamento.

Neste trabalho, a eficiência dos sistemas de contraventamento foi aferida com base nos seguintes parâmetros:

- Estados limites de deformação
- Conforto humano quanto às vibrações
- Consumo de material

Após a análise dos resultados dos edifícios descritos neste trabalho, podem ser apresentadas as conclusões a seguir:

- Os sistemas de contraventamento com treliças possuem um campo de aplicação bastante amplo, apresentando considerável economia em estruturas de média e até grande altura.
- Nem sempre prevalece uma relação direta entre o consumo de aço e a eficiência do sistema de contraventamento. Contraventamentos bastante eficientes foram obtidos com consumos de aço relativamente pequenos. A habilidade do engenheiro é fundamental na concepção de um eficiente e econômico sistema de contraventamento.
- Pequenos deslocamentos laterais de primeira ordem não são indicadores de uma pequena sensibilidade da estruturas quanto aos efeitos não lineares geométricos.
- Os contraventamentos treliçados permitem os mais variados arranjos, tornando-se uma grande oportunidade para o engenheiro estrutural demonstrar sua criatividade e competência.
- O consumo de aço por metro quadrado de área construída das estruturas de 50 pavimentos com contraventamento treliçado é, em média, 40% superior ao consumo de aço das estruturas com 30 pavimentos, o que comprova a importância do carregamento horizontal no consumo de material, mesmo em regiões como Recife, onde a velocidade característica do vento é relativamente pequena.
- Foi constatado que os contraventamento formados por diagonais que possuem algumas das suas extremidades conectadas em vigas, apresentam um menor consumo de aço, por não atrair uma parcela significativa das forças gravitacionais.
- A esbeltez dos sistemas de contraventamento influenciam sobremaneira os deslocamentos laterais e o consumo de aço da estrutura.
- A associação dos contraventamentos utilizando treliças horizontais trouxe reduções significativas nos deslocamentos e no peso da estrutura.

A utilização desta técnica pode ser muito importante principalmente em edifícios ainda mais altos como os analisados neste trabalho.

- Os contraventamentos em “X” embora tenham apresentado, um melhor desempenho na restrição aos deslocamentos laterais, resultaram em um maior consumo de aço estrutural, aliado ainda a um maior consumo de ligações, o que deve ser avaliado antes da sua utilização.
- As frequências naturais das estruturas tiveram uma variação relativamente grande. Não se mostrando apropriado, a estimativa da frequência natural das estruturas a partir de valores aproximados como, por exemplo, aqueles fornecidos pela NBR-6123 [12].
- As deformações axiais dos pilares possuem grande importância nos deslocamentos laterais da estrutura. De forma que, soluções que venham a minimizar estas deformações se mostram bastante favoráveis. Dentre estas soluções podemos citar: contraventar diferentes vãos ao longo da altura da edificação, evitar treliças com grande esbeltez, etc.
- Embora as deformações axiais das diagonais não apresentem uma grande influência nos deslocamentos da estrutura, o arranjo destas diagonais pode se tornar determinante na viabilidade do sistema de contraventamento.
- Haja vista as excentricidades da ação do vento, o posicionamento dos contraventamentos em relação ao centróide da edificação mostrou-se bastante importante, especialmente para as edificações mais altas.
- O posicionamento dos contraventamentos nas fachadas da edificação mostrou um benefício adicional com relação ao consumo de aço. Os esforços de compressão introduzidos nas colunas dos contraventamentos, devido ao carregamento lateral, não se mostraram tão nocivos tendo em vista que estas colunas são bem menos solicitadas pelas ações gravitacionais que aquelas situadas no interior da edificação.

- A adoção de contraventamentos de grandes módulos mostrou-se uma solução bastante eficiente no que diz respeito ao consumo de material e à menor obstrução na circulação da edificação.
- A diminuição do contraventamento ao longo da altura da edificação, a fim de se obter uma espécie de viga com inércia variável, se mostrou uma solução interessante, no entanto cuidados especiais devem ser tomados no sentido de se evitar deslocamentos excessivos entre pavimentos nos trechos onde a treliça é mais esbelta.
- A interação entre contraventamentos de grande escala e contraventamentos em único vão se mostrou uma solução bastante satisfatória.

5.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Algumas sugestões podem ser mencionadas a fim de dar prosseguimento a este trabalho, entre as quais podemos citar:

- Analisar a influência do efeito construtivo incremental
- Analisar a interação entre os pórticos rígidos e os contraventamentos treliçados
- Analisar os contraventamentos que não formam triângulos “cheios”
- Acrescentar novos modelos na análise, diferindo não apenas na arquitetura, mas também na quantidade de pavimentos
- Realizar um estudo da iteração solo-estrutura nestes edifícios
- Discretizar as lajes em elementos finitos
- Analisar a colaboração das alvenarias e outras vedações verticais no contraventamento da estrutura

APÊNDICE I

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO DE VIGAS MISTAS NÃO ESCORADAS COM INTERAÇÃO PARCIAL

1 - Características do material:

VIGA - V2

Resistência característica do concreto:	$f_{ck} := 2.5$	(KN/cm ²)
Tensão de escoamento do aço:	$f_y := 25$	(KN/cm ²)
Tensão de ruptura do aço:	$f_u := 40$	(KN/cm ²)
Módulo de elasticidade do aço:	$E := 20500$	(KN/cm ²)
Peso específico do concreto:	$\gamma_c := 24$	(KN/cm ²)
Módulo de elasticidade do concreto:	$E_c := 4.2 \cdot \gamma_c^{1.5} \cdot \sqrt{10f_{ck}} \Rightarrow E_c = \blacksquare$	(KN/cm ²)
Coefficiente de minoração da resistência do aço:	$\phi := 0.9$	

2 - Características geométricas da estrutura:

Tipo da viga ("intermediária" ou de "bordo"):	VIGA := "intermediária"
Vão da viga:	$l := 900$ (cm)
Distância entre centros das vias adjacentes:	$DC := 400$ (cm)
Espessura da laje:	$e := 15$ (cm)
Altura da forma metálica:	$h_f := 7.5$ (cm)
Espessura da camada de concreto:	$e_c := e - h_f \Rightarrow e_c = \blacksquare$ (cm)

3- Carregamentos atuantes na viga:

Cargas permanentes aplicadas antes do concreto atingir 75% de fck:	distribuída:	$q_{pa} := 11.67$ (KN/m ²)
	concentrada:	$p_{pa} := 0$ (KN)
Sobrecargas aplicadas antes do concreto atingir 75% de fck:	distribuída:	$q_{sa} := 4$ (KN/m ²)
	concentrada:	$p_{sa} := 0$ (KN)
Cargas permanentes aplicadas após o concreto atingir 75% de fck:	distribuída:	$q_{pd} := 8$ (KN/m ²)
	concentrada:	$p_{pd} := 0$ (KN)
Sobrecargas aplicadas após o concreto atingir 75% de fck:	distribuída:	$q_{sd} := 8$ (KN/m ²)
	concentrada:	$p_{sd} := 0$ (KN)

4 - Solicitações atuantes na viga

- Momento fletor nominal decorrente das cargas aplicadas antes do concreto atingir 75% do fck:

$$M_1 := \frac{(1.0 \cdot q_{pa} + 1.0 \cdot q_{sa}) \cdot l^2}{8 \cdot 100} + \frac{(1.0 \cdot p_{pa} + 1.0 \cdot p_{sa}) \cdot l}{4} \quad M_1 = 15865.9 \quad (\text{KN.cm})$$

- Momento fletor de cálculo decorrente das cargas aplicadas antes do concreto atingir 75% do fck:

$$Md_1 := \frac{(1.2 \cdot q_{pa} + 1.3 \cdot q_{sa}) \cdot l^2}{8 \cdot 100} + \frac{(1.2 \cdot p_{pa} + 1.3 \cdot p_{sa}) \cdot l}{4} \quad Md_1 = 19444 \quad (\text{KN.cm})$$

- Momento fletor nominal decorrente das cargas aplicadas após o concreto atingir 75% do fck:

$$M_2 := \frac{[1.0 \cdot (q_{pd} + q_{pa}) + 1.0 \cdot q_{sd}] \cdot l^2}{8 \cdot 100} + \frac{[1.0 \cdot (p_{pd} + p_{pa}) + 1.0 \cdot p_{sd}] \cdot l}{4} \quad M_2 = 28015.9 \quad (\text{KN.cm})$$

- Momento fletor de cálculo decorrente das cargas aplicadas após o concreto atingir 75% do fck:

$$Md_2 := \frac{[1.3 \cdot (q_{pd} + q_{pa}) + 1.5 \cdot q_{sd}] \cdot l^2}{8 \cdot 100} + \frac{[1.3 \cdot (p_{pd} + p_{pa}) + 1.5 \cdot p_{sd}] \cdot l}{4} \quad Md_2 = 38040.6 \quad (\text{KN.cm})$$

- Esforço cortante de cálculo decorrente das cargas aplicadas antes do concreto atingir 75% do fck:

$$Vd_1 := \frac{(1.2 \cdot q_{pa} + 1.3 \cdot q_{sa}) \cdot l}{2 \cdot 100} + \frac{(1.2 \cdot p_{pa} + 1.3 \cdot p_{sa})}{2} \quad Vd_1 = 86.4 \quad (\text{KN})$$

- Esforço cortante de cálculo decorrente das cargas aplicadas após o concreto atingir 75% do fck:

$$Vd_2 := \frac{[1.3 \cdot (q_{pd} + q_{pa}) + 1.5 \cdot q_{sd}] \cdot l}{2 \cdot 100} + \frac{[1.3 \cdot (p_{pd} + p_{pa}) + 1.5 \cdot p_{sd}]}{2} \quad Vd_2 = 169.1 \quad (\text{KN})$$

5 - Pré - dimensionamento:

$$Z_x := \frac{Md_1}{0.9 \cdot f_y}$$

Adotar perfil com módulo plástico maior ou igual a: $Z_x = 864.2 \quad (\text{cm}^3)$

7.3 - Verificação da resistência ao momento fletor:

Momento fletor resistente antes do concreto atingir 75% do fck: $\phi M_n := \phi \cdot Z_x \cdot f_y$ $\phi M_n = \blacksquare$ (KN.cm)

Momento fletor de cálculo antes do concreto atingir 75% de fck: $Md_1 = \blacksquare$ (KN.cm)

Teste_4 := $\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } Md_1 \leq \phi M_n \\ \text{"Redimensionar"} & \text{otherwise} \end{cases}$

Teste_4 = \blacksquare

8 - Cálculo da largura efetiva da laje de concreto:

$$b_I := \begin{pmatrix} \frac{1}{4} \\ 16 \cdot e + b_f \\ DC \end{pmatrix} \quad b_B := \begin{pmatrix} b_f + 12^{-1} \cdot l \\ b_f + 6 \cdot e \\ \frac{DC}{2} \end{pmatrix}$$

$b := \begin{cases} \min(b_I) & \text{if VIGA} = \text{"intermediária"} \\ \min(b_B) & \text{if VIGA} = \text{"bordo"} \end{cases}$

$b = \blacksquare$ (cm) (Largura efetiva da laje de concreto)

9 - Dimensionamento dos conectores de cisalhamento:

9.1 - Características do conector

Diâmetro do conector: $d_c := 1.91$ (cm)

Altura do conector: $h_c := 12.7$ (cm)

Área da seção transversal do conector: $As_c := \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}$ $As_c = \blacksquare$ (cm²)

Limite de resistência à tração do conector: $f_{u_c} := 41.5$ (KN/cm²)

Sentido da nervura do Steel Deck ("longit" ou "transv"): $Nervura := \text{"transv"}$

Largura da mesa do steel deck: $b_{laje} := 13.7$ (cm)

Altura da laje do steel deck: $h_f = \blacksquare$ (cm)

Número de conectores por nervura: $n := 1$

9.2 - Resistência do conector:

$$Rn_1 := 0.5 \cdot A_{s_c} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c} \quad Rn_1 = \blacksquare \quad (\text{KN})$$

$$Rn_2 := A_{s_c} \cdot f_{u_c} \quad Rn_2 = \blacksquare \quad (\text{KN})$$

$$Rn_c := \begin{cases} Rn_1 & \text{if } Rn_1 < Rn_2 \\ Rn_2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Rn_c = \blacksquare \quad (\text{KN})$$

- Fatores de redução:

$$C_{red} := \begin{cases} \left[0.6 \cdot \left(\frac{b_{laje}}{h_f} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{h_f} - 1 \right) \right] & \text{if } \text{Nervura} = \text{"longit"} \\ \left[\frac{0.85}{\sqrt{n}} \cdot \left(\frac{b_{laje}}{h_f} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{h_f} - 1 \right) \right] & \text{if } \text{Nervura} = \text{"transv"} \end{cases}$$

$$C_{red} := \begin{cases} C_{red} & \text{if } C_{red} \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$C_{red} = \blacksquare$$

$$q_n := Rn_c \cdot C_{red}$$

$$\text{Resistência nominal de cada conector: } q_n = \blacksquare \quad (\text{KN})$$

9.3 - Cálculo do número de conectores:

Força de cisalhamento horizontal:

$$V_1 := A \cdot f_y \quad V_1 = \blacksquare \quad (\text{KN})$$

$$V_2 := 0.85 \cdot e_c \cdot b \cdot f_{ck} \quad V_2 = \blacksquare \quad (\text{KN})$$

$$V_h := \begin{cases} V_1 & \text{if } V_1 < V_2 \\ V_2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$V_h = \blacksquare$$

$$\text{Número de conectores: } N := \frac{V_h}{q_n} \quad N = \blacksquare \quad \text{conectores}$$

9.4 - Grau de iteração:

$$\text{Número de conectores adotados: } N := 12$$

$$\text{Grau de iteração: } \eta := \frac{N \cdot q_n}{V_h} \quad \eta = \blacksquare$$

10 - Verificação da viga mista com iteração parcial:

10.1 - Verificação da posição da linha neutra:

$$Q_n := \left(\sum_{n=1}^N q_n \right) \quad Q_n = \blacksquare$$

$$C := \frac{0.7}{0.9} Q_n \quad C = \blacksquare \quad (\text{KN})$$

$$C' := \frac{1}{2} (A \cdot f_y - C) \quad C' = \blacksquare \quad (\text{KN})$$

$$a := \frac{C}{0.66 \cdot b \cdot f_{ck}} \quad a = \blacksquare \quad (\text{cm}) \quad (\text{espessura de concreto comprimido na laje})$$

$$A_{c_e} := b \cdot a \quad A_{c_e} = \blacksquare \quad (\text{cm}^2) \quad (\text{área efetiva de concreto})$$

10.2 - Verificação da posição da segunda linha neutra:

$$\text{LN} := \begin{cases} \text{"LN na mesa superior"} & \text{if } C' \leq (b_f \cdot t_f) \cdot f_y \\ \text{"LN na base"} & \text{if } C' > (b_f \cdot t_f) \cdot f_y \end{cases}$$

$$\text{LN} = \blacksquare$$

Distância da linha neutra em relação à face superior da viga de aço:

$$y := \begin{cases} \left[\frac{C'}{(b_f \cdot t_f) \cdot f_y} \cdot t_f \right] & \text{if } C' \leq (b_f \cdot t_f) \cdot f_y \\ \left[t_f + \frac{C' - (b_f \cdot t_f) \cdot f_y}{(h_o \cdot t_w)} \right] & \text{if } C' > (b_f \cdot t_f) \cdot f_y \end{cases}$$

$$y = \blacksquare \quad (\text{cm})$$

10.3 - Cálculo do momento resistente da viga mista:

$$y_c := \begin{cases} \frac{y}{2} & \text{if LN} = \text{"LN na mesa superior"} \\ \left[\frac{\left(b_f \cdot t_f \cdot \frac{t_f}{2} \right) + (y - t_f) \cdot t_w \cdot \left(\frac{y - t_f}{2} + t_f \right)}{b_f \cdot t_f + (y - t_f) \cdot t_w} \right] & \text{if LN} = \text{"LN na alma"} \end{cases}$$

- Distância do centro de gravidade da parte comprimida da seção da viga de aço até a face superior desta viga: $y_c = \blacksquare$ (cm)

$$y_t := \begin{cases} \frac{\left[\left[(t_f - y) \cdot b_f \right] \cdot \left[\frac{(t_f - y)}{2} + h_o + t_f \right] + \left[h_o \cdot t_w \cdot \left(\frac{h_o}{2} + t_f \right) \right] + \left(t_f \cdot b_f \cdot \frac{t_f}{2} \right) \right]}{(t_f - y) \cdot b_f + h_o \cdot t_w + b_f \cdot t_f} & \text{if LN = "LN na mesa superior"} \\ \frac{\left[(h - y - t_f) \cdot t_w \cdot \left[\left(\frac{h - y - t_f}{2} \right) + t_f \right] \right] + t_f \cdot b_f \cdot \frac{t_f}{2}}{\left[(h - y - t_f) \cdot t_w \right] + b_f \cdot t_f} & \text{if LN = "LN na alma"} \end{cases}$$

- Distância do centro de gravidade da parte tracionada da seção da viga de aço até a face inferior desta viga: $y_t = \blacksquare$ (cm)

10.4 - Momento resistente admissível na viga mista após a cura do concreto:

$$\phi M_{nd} := \phi \cdot \left[C' \cdot (h - y_t - y_c) + C \cdot \left(e_c - \frac{a}{2} + h_f + h - y_t \right) \right]$$

Momento resistente admissível: $\phi M_{nd} = \blacksquare$ (KN.cm)

Momento fletor de cálculo após o concreto atingir 75% do fck: $Md_2 = \blacksquare$ (KN.cm)

Verificação se o perfil resiste ao momento após a cura:

$$\text{Teste}_4 := \begin{cases} \text{"Ok"} & \text{if } Md_2 \leq \phi M_{nd} \\ \text{"Redimensionar"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Teste_4 = \blacksquare

11 - Determinação das propriedades da seção mista:

$\alpha := \frac{2E}{E_c}$ $\alpha = \blacksquare$ (relação entre o módulo de elasticidade do concreto e do aço)

$b_{eq} := \frac{b}{\alpha}$ $b_{eq} = \blacksquare$ (cm) (Largura equivalente da laje de aço)

$A_{eq} := b_{eq} \cdot e_c$ $A_{eq} = \blacksquare$ (cm²) (Área da laje de aço equivalente)

$I_{eq} := \frac{b_{eq} \cdot e_c^3}{12}$ $I_{eq} = \blacksquare$ (cm⁴) (Momento de inércia da laje de aço equivalente em relação ao eixo que passa pelo CG da peça)

$y_{eq} := \frac{e_c}{2}$ $y_{eq} = \blacksquare$ (cm) (Distância da face superior da laje ao eixo que passa pelo CG da laje de aço equivalente)

$y_s := h_f + e_c + \frac{h}{2}$ $y_s = \blacksquare$ (cm) (Distância da face superior da laje ao eixo que passa pelo CG do perfil de aço)

$y_c := \frac{y_{eq} \cdot A_{eq} + y_s \cdot A}{A_{eq} + A}$ $y_c = \blacksquare$ (cm²) (Distância da face superior da laje ao eixo que passa pelo CG da seção mista)

- Momento de inércia da seção mista homogeneizada: $I_{tr} := I_x + (y_c - y_s)^2 \cdot A + I_{eq} + (y_{eq} - y_c)^2 \cdot A_{eq} \Rightarrow I_{tr} = \blacksquare$ (cm⁴)

- Momento de inércia usado para a interação parcial: $I_{ef} := I_x + \sqrt{\frac{Q_n}{V_h}} \cdot (I_{tr} - I_x) \Rightarrow I_{ef} = \blacksquare$ cm⁴

- Módulo resistente inferior da seção mista: $W_{tr} := \frac{I_{tr}}{(e_c + h_f + h) - y_c} \Rightarrow W_{tr} = \blacksquare$ cm³

- Módulo resistente usado para a interação parcial: $W_{ef} := W_x + \sqrt{\frac{Q_n}{V_h}} \cdot (W_{tr} - W_x) \Rightarrow W_{ef} = \blacksquare$ cm³

12 - Verificação nas tensões de serviço na mesa inferior:

Momento fletor devido as cargas aplicadas antes da resistência do concreto atingir 75% do fck:

$$M_G := \frac{(1.0 \cdot q_{pa}) \cdot l^2}{8 \cdot 100} + \frac{(1.0 \cdot p_{pa}) \cdot l}{4 \cdot 100} \quad M_G = \blacksquare \quad (\text{KN.cm})$$

Momento fletor devido as cargas aplicadas após a resistência do concreto atingir 75% do fck:

$$M_L := \frac{[1.0 \cdot (q_{pd}) + 1.0 \cdot q_{sd}] \cdot l^2}{8 \cdot 100} + \frac{[1.0 \cdot (p_{pd}) + 1.0 \cdot p_{sd}] \cdot l}{4 \cdot 100} \quad M_L = \blacksquare \quad (\text{KN.cm})$$

Solicitação na mesa inferior:

$$\frac{M_G}{W_x} + \frac{M_L}{W_{ef}} = \blacksquare \quad (\text{KN/cm}^2)$$

$$0.9 \cdot f_y = \blacksquare \quad (\text{KN/cm}^2)$$

$$\text{Teste}_5 := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{M_G}{W_x} + \frac{M_L}{W_{ef}} \leq 0.9 \cdot f_y \\ \text{"Redimensionar"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Teste}_5 = \blacksquare$$

APÊNDICE II

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA A VERIFICAÇÃO DE PILARES SUBMETIDOS À TENSÕES COMBINADAS

- O presente item se aplica a barras prismáticas cuja seção transversal possui um ou dois eixos de simetria, sujeitas aos efeitos combinados de força normal e flexão em torno dos eixos principais de inércia da seção.

1- Dados iniciais: Pilar: P-5 (1º Pavimento)

Tensão de escoamento do aço:	$f_y := 34.5$	(KN/cm ²)
Tensão de ruptura do aço:	$f_u := 48.5$	(KN/cm ²)
Tensão residual do aço:	$f_r := 11.5$	(KN/cm ²)
Módulo de elasticidade do aço:	$E := 20500$	(KN/cm ²)
Coeficiente de minoração da resistência do aço:	$\phi := 0.9$	
Carga axial de cálculo atuante no pilar:	$N_d := 9847$	(KN)
Menor momento fletor de cálculo na extremidade da barra em torno do eixo X:	$M_{1x} := 0$	(KN.cm)
Maior momento fletor de cálculo na extremidade da barra em torno do eixo X:	$M_{2x} := 1741$	(KN.cm)
Menor momento fletor de cálculo na extremidade da barra em torno do eixo Y:	$M_{1y} := 0.1$	(KN.cm)
Maior momento fletor de cálculo na extremidade da barra em torno do eixo Y:	$M_{2y} := 423$	(KN.cm)
Coeficiente de equivalência de momentos:	$Cm_x := 0.6 - 0.4 \cdot \frac{-M_{1x}}{M_{2x}}$	$Cm_x = 0.6$
	$Cm_y := 0.6 - 0.4 \cdot \frac{-M_{1y}}{M_{2y}}$	$Cm_y = 0.6$
Momentos fletores solicitantes de cálculo:	$Md_x := M_{2x}$	$Md_x = 1741$ (KN.cm)
	$Md_y := M_{2y}$	$Md_y = 423$ (KN.cm)

2 - Características do perfil: CS 550 x 368

Comprimento do pilar:	$l := 285$	(cm)
Parâmetro de flambagem:	$k := 1$	
Módulo plástico de resistência da seção:	$Z_x := 10465$	(cm ³)
	$Z_y := 4840$	(cm ³)

Momento de inércia do perfil:	$I_x := 257234$ (cm ⁴)
	$I_y := 87410$ (cm ⁴)
Módulo de resistência da seção:	$W_x := 9354$ (cm ³)
	$W_y := 3179$ (cm ³)
Raio de giro:	$i_x := 23.4$ (cm)
	$i_y := 13.7$ (cm)
Espessura da mesa do perfil:	$t_f := 3.15$ (cm)
Largura da mesa do perfil:	$b_f := 55$ (cm)
Espessura da alma do perfil:	$t_w := 2.5$ (cm)
Altura total do perfil:	$h := 55$ (cm)
Área de aço do perfil:	$A := 468.3$ (cm ²)
Altura da alma do perfil:	$h_o := h - 2 \cdot t_f \Rightarrow h_o = \blacksquare$ (cm)

3- Cálculo da carga axial resistente de projeto "N_{d res}":

3.1- Verificação quanto a possibilidade de flambagem localizada na mesa:

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \blacksquare \quad 0.55 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \blacksquare$$

$$\text{Teste}_1 := \begin{cases} \text{"Não há flambagem na mesa"} & \text{if } \frac{b_f}{2t_f} \leq 0.55 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \text{"Há risco de flambagem na mesa"} & \text{if } \frac{b_f}{2 \cdot t_f} > 0.55 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$$

$$\text{Teste}_1 = \blacksquare$$

$$Q_s := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{b_f}{2 \cdot t_f} \leq 0.55 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \left(1.415 - 0.755 \cdot \frac{b_f}{2 \cdot t_f} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \right) & \text{if } 1.018 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \geq \frac{b_f}{2 \cdot t_f} > 0.55 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \frac{0.670E}{f_y \cdot \left(\frac{b_f}{2t_f} \right)^2} & \text{if } \frac{b_f}{2 \cdot t_f} > 1.018 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$$

$$Q_s = \blacksquare \quad (\text{Coeficiente redutor devido a flambagem localizada na mesa})$$

3.2- Verificação quanto a possibilidade de flambagem localizada na alma:

$$\frac{h_o}{t_w} = \blacksquare \qquad 1.47 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \blacksquare$$

$$\text{Teste_2} := \begin{cases} \text{"Não há flambagem na alma"} & \text{if } \frac{h_o}{t_w} \leq 1.47 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \\ \text{"Há risco de flambagem na alma"} & \text{if } \frac{h_o}{t_w} > 1.47 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \end{cases}$$

$$\text{Teste_2} = \blacksquare$$

- Verificação complementar apenas se o Teste_2 = "Há flambagem na alma"

Tensão de cálculo estimada no elemento enrrigecido: $f := 16$ (KN/cm²)

$$b_e := \frac{797 \cdot t_w}{\sqrt{10f}} \cdot \left(1 - \frac{140}{\frac{h_o}{t_w} \cdot \sqrt{10 \cdot f}} \right)$$

$$b_e = \blacksquare \quad (\text{cm}) \quad (\text{largura efetiva do elemento enrrigecido})$$

$$Q_a := \begin{cases} 1 & \text{if Teste_2 = "Não há flambagem na alma"} \\ \frac{A - (h_o - b_e) \cdot t_w}{A} & \text{if Teste_2 = "Há risco de flambagem na alma"} \end{cases}$$

$$Q_a = \blacksquare \quad (\text{Coeficiente redutor devido a flambagem localizada na alma})$$

$$Q := Q_s \cdot Q_a$$

$$Q = \blacksquare \quad (\text{Coeficiente redutor devido a flambagem localizada})$$

3.3 - Cálculo do parâmetro de esbeltez " λ ":

$$k := 2.2$$

$$\lambda_x := \frac{k \cdot l}{i_x} \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot f_y}{\pi^2 \cdot E}} \quad \lambda_x = \blacksquare$$

$$\lambda_y := \frac{k \cdot l}{i_y} \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot f_y}{\pi^2 \cdot E}} \quad \lambda_y = \blacksquare$$

$$\beta_x := \frac{1}{2\lambda_x^2} \cdot \left(1 + 0.281 \sqrt{|\lambda_x^2 - 0.04|} + \lambda_x^2 \right)$$

$$\beta_y := \frac{1}{2\lambda_y^2} \cdot \left(1 + 0.384 \sqrt{|\lambda_y^2 - 0.04|} + \lambda_y^2 \right)$$

$$\rho_x := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_x \leq 0.2 \\ \left(\beta_x - \sqrt{\beta_x^2 - \frac{1}{\lambda_x^2}} \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_x = 0.917$$

$$\rho_y := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_y \leq 0.2 \\ \left(\beta_y - \sqrt{\beta_y^2 - \frac{1}{\lambda_y^2}} \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho_y = 0.77$$

$$\rho := \begin{cases} \rho_x & \text{if } \rho_x \leq \rho_y \\ \rho_y & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\rho = 0.77 \quad (\text{Relação entre a tensão resistente com flambagem e a tensão de escoamento do aço})$$

$$\text{Teste}_3 := \begin{cases} \text{"Adotar maior valor para f"} & \text{if } \phi \cdot Q_s \cdot \rho \cdot f_y > f \wedge \text{Teste}_2 = \text{"Há risco de flambagem na alma"} \\ \text{"OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Teste}_3 = \text{"OK"}$$

3.4 - Carga axial de projeto "N_{d res}":

$$N_{d_{res}} := \phi \cdot Q \cdot \rho \cdot A \cdot f_y \quad N_{d_{res}} = 11199.6 \text{ (KN)}$$

4- Cálculo dos momentos resistentes de projeto:

4.1 - Verificação quanto ao estado limite de flambagem local da alma - FLA

$$\lambda_{b_a} := \frac{h_o}{t_w} \quad \lambda_{b_a} = 19.48$$

$$\lambda_{b_{p_a}} := \begin{cases} \left(1.47 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) & \text{if } \frac{N_d}{0.9A \cdot f_y} > 0.207 \\ \left[3.5 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \cdot \left(1 - 2.8 \cdot \frac{N_d}{0.9A \cdot f_y} \right) \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad \lambda_{b_{p_a}} = 35.83$$

$$\lambda_{b_{r_a}} := 5.6 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_{b_{r_a}} = 136.51$$

$$\text{Teste}_4 := \begin{cases} \text{"A coluna é compacta quanto a alma"} & \text{if } \lambda_{b_a} \leq \lambda_{b_{p_a}} \\ \text{"A coluna é semicompacta quanto a alma"} & \text{if } \lambda_{b_{p_a}} < \lambda_{b_a} \leq \lambda_{b_{r_a}} \\ \text{"A coluna é esbelta quanto a alma"} & \text{if } \lambda_{b_a} > \lambda_{b_{r_a}} \end{cases}$$

$$\text{Teste}_4 = \text{"A coluna é compacta quanto a alma"}$$

4.2 - Verificação quanto ao estado limite de flambagem local da mesa - FLM

$$\lambda_{b_m} := \frac{b_f}{2t_f} \quad \lambda_{b_m} = \blacksquare$$

$$\lambda_{b_{p_m}} := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_{b_{p_m}} = \blacksquare$$

$$\lambda_{b_{r_m}} := 0.62 \sqrt{\frac{E}{(f_y - f_r)}} \quad \lambda_{b_{r_m}} = \blacksquare$$

$$\text{Teste}_5 := \begin{cases} \text{"A coluna é compacta quanto a mesa"} & \text{if } \lambda_{b_m} \leq \lambda_{b_{p_m}} \\ \text{"A coluna é semicomcompacta quanto a mesa"} & \text{if } \lambda_{b_{p_m}} < \lambda_{b_m} \leq \lambda_{b_{r_m}} \\ \text{"A coluna é esbelta quanto a mesa"} & \text{if } \lambda_{b_m} > \lambda_{b_{r_m}} \end{cases}$$

$$\text{Teste}_5 = \blacksquare$$

4.3 - Cálculo dos momentos resistentes:

$$C_{pg} := 0.38E \quad C_{pg} = \blacksquare$$

$$\lambda_m := \frac{b_f}{2t_f} \quad \lambda_m = \blacksquare$$

$$\lambda_p := 0.31 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_p = \blacksquare$$

$$\lambda_r := 0.87 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_r = \blacksquare$$

$$f_{cr} := \begin{cases} f_y & \text{if } \lambda_m \leq \lambda_p \\ f_y \cdot \left[1 - 0.5 \cdot \left(\frac{\lambda_m - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] & \text{if } \lambda_p < \lambda_m \leq \lambda_r \\ \frac{C_{pg}}{\lambda_m^2} & \text{if } \lambda_r < \lambda_m \end{cases}$$

$$f_{cr} = \blacksquare \quad (\text{Tensão crítica})$$

$$K_{pg} := \begin{cases} \left[1 - 0.0005 \cdot \frac{h_o \cdot t_w}{b_f \cdot t_f} \cdot \left(\frac{h}{t_w} - 5.6 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{cr}}} \right) \right] & \text{if } \left[1 - 0.0005 \cdot \frac{h_o \cdot t_w}{b_f \cdot t_f} \cdot \left(\frac{h}{t_w} - 5.6 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{cr}}} \right) \right] \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$K_{pg} = \blacksquare \quad (\text{Coeficiente de redução da resistência devido a flambagem})$$

$$Mn_{xa} := \begin{cases} (Z_x \cdot f_y) & \text{if Teste_4 = "A coluna é compacta quanto a alma"} \\ \left[(Z_x \cdot f_y) - \left(\frac{\lambda b_a - \lambda b p_a}{\lambda b r_a - \lambda b p_a} \right) \cdot (Z_x \cdot f_y - W_x \cdot f_y) \right] & \text{if Teste_4 = "A coluna é semicompacta quanto a alma"} \\ (W_x \cdot K_{pg} \cdot f_{cr}) & \text{if Teste_4 = "A coluna é esbelta quanto a alma"} \end{cases}$$

$$Mn_{xa} = \blacksquare$$

$$Mn_{ya} := \begin{cases} (Z_y \cdot f_y) & \text{if Teste_4 = "A coluna é compacta quanto a alma"} \\ \left[(Z_y \cdot f_y) - \left(\frac{\lambda b_a - \lambda b p_a}{\lambda b r_a - \lambda b p_a} \right) \cdot (Z_y \cdot f_y - W_y \cdot f_y) \right] & \text{if Teste_4 = "A coluna é semicompacta quanto a alma"} \\ (W_y \cdot K_{pg} \cdot f_{cr}) & \text{if Teste_4 = "A coluna é esbelta quanto a alma"} \end{cases}$$

$$Mn_{ya} = \blacksquare$$

$$Mn_{xm} := \begin{cases} (Z_x \cdot f_y) & \text{if Teste_5 = "A coluna é compacta quanto a mesa"} \\ \left[(Z_x \cdot f_y) - \left(\frac{\lambda b_m - \lambda b p_m}{\lambda b r_m - \lambda b p_m} \right) \cdot (Z_x \cdot f_y - W_x \cdot f_y) \right] & \text{if Teste_5 = "A coluna é semicompacta quanto a mesa"} \\ (W_x \cdot K_{pg} \cdot f_{cr}) & \text{if Teste_5 = "A coluna é esbelta quanto a mesa"} \end{cases}$$

$$Mn_{xm} = \blacksquare$$

$$Mn_{ym} := \begin{cases} (Z_y \cdot f_y) & \text{if Teste_5 = "A coluna é compacta quanto a mesa"} \\ \left[(Z_y \cdot f_y) - \left(\frac{\lambda b_m - \lambda b p_m}{\lambda b r_m - \lambda b p_m} \right) \cdot (Z_y \cdot f_y - W_y \cdot f_y) \right] & \text{if Teste_5 = "A coluna é semicompacta quanto a mesa"} \\ (W_y \cdot K_{pg} \cdot f_{cr}) & \text{if Teste_5 = "A coluna é esbelta quanto a mesa"} \end{cases}$$

$$Mn_{ym} = \blacksquare$$

$$Md_{x_res} := \begin{cases} (\phi \cdot Mn_{xa}) & \text{if } Mn_{xa} \leq Mn_{xm} \\ (\phi \cdot Mn_{xm}) & \text{if } Mn_{xa} > Mn_{xm} \end{cases} \quad Md_{y_res} := \begin{cases} (\phi \cdot Mn_{ya}) & \text{if } Mn_{ya} \leq Mn_{ym} \\ (\phi \cdot Mn_{ym}) & \text{if } Mn_{ya} > Mn_{ym} \end{cases}$$

$$Md_{x_res} = \blacksquare \quad (\text{Momento resistente de cálculo em torno do eixo "x"})$$

$$Md_{y_res} = \blacksquare \quad (\text{Momento resistente de cálculo em torno do eixo "y"})$$

4- Cálculo das cargas de flambagem elástica por flexão:

$$\text{Cargas críticas: } N_{cr_x} := A \cdot \left[\frac{\pi^2 E}{\left(\frac{k \cdot l}{i_y}\right)^2} \right] \quad N_{cr_x} = \blacksquare \quad (\text{KN})$$

$$N_{cr_y} := A \cdot \left[\frac{\pi^2 E}{\left(\frac{k \cdot l}{i_x}\right)^2} \right] \quad N_{cr_y} = \blacksquare \quad (\text{KN})$$

5 - Verificação quanto a tensão combinada:

$$\frac{N_d}{N_{d_{res}}} + \frac{M_{d_x}}{M_{d_{x_{res}}}} \cdot \frac{C_{m_x}}{1 - \frac{N_d}{0.73 \cdot N_{cr_x}}} + \frac{M_{d_y}}{M_{d_{y_{res}}}} \cdot \frac{C_{m_y}}{1 - \frac{N_d}{0.73 \cdot N_{cr_y}}} = \blacksquare$$

$$\text{Teste}_6 := \begin{cases} \text{"Redimensionar"} & \text{if } \frac{N_d}{N_{d_{res}}} + \frac{M_{d_x}}{M_{d_{x_{res}}}} \cdot \frac{C_{m_x}}{1 - \frac{N_d}{0.73 \cdot N_{cr_x}}} + \frac{M_{d_y}}{M_{d_{y_{res}}}} \cdot \frac{C_{m_y}}{1 - \frac{N_d}{0.73 \cdot N_{cr_y}}} > 1 \\ \text{"Ok"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Teste}_6 = \blacksquare$$

APÊNDICE III

6.1. TABELAS REFERENTES À ANÁLISE QUANTO AOS DIFERENTES TIPOS DE CONTRAVENTAMENTO

Quadro VI.1 - Deslocamentos laterais para a estrutura com 30 pavimentos e contraventamento em X

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,11	0,12	0,10	0,14	0,12	0,14
5,70	0,24	0,25	0,22	0,31	0,13	0,17
8,55	0,38	0,40	0,37	0,52	0,15	0,21
11,40	0,53	0,57	0,55	0,75	0,17	0,24
14,25	0,70	0,76	0,74	1,02	0,18	0,26
17,10	0,88	0,96	0,95	1,31	0,20	0,29
19,95	1,08	1,18	1,19	1,63	0,22	0,32
22,80	1,30	1,42	1,46	1,99	0,24	0,36
25,65	1,54	1,68	1,75	2,38	0,26	0,39
28,50	1,79	1,95	2,07	2,81	0,28	0,43
31,35	2,05	2,25	2,41	3,26	0,29	0,45
34,20	2,33	2,55	2,77	3,74	0,31	0,48
37,05	2,61	2,88	3,14	4,25	0,32	0,50
39,90	2,92	3,21	3,54	4,78	0,34	0,53
42,75	3,23	3,56	3,96	5,33	0,35	0,55
45,60	3,55	3,91	4,38	5,90	0,36	0,57
48,45	3,87	4,28	4,82	6,49	0,36	0,59
51,30	4,20	4,65	5,27	7,09	0,37	0,60
54,15	4,54	5,02	5,73	7,70	0,38	0,61
57,00	4,88	5,40	6,20	8,31	0,38	0,62
59,85	5,22	5,78	6,66	8,94	0,38	0,62
62,70	5,55	6,16	7,13	9,56	0,38	0,62
65,55	5,89	6,54	7,61	10,18	0,38	0,62
68,40	6,23	6,92	8,08	10,81	0,38	0,62
71,25	6,57	7,30	8,56	11,44	0,38	0,63
74,10	6,91	7,67	9,03	12,07	0,38	0,63
76,95	7,24	8,05	9,50	12,69	0,37	0,62
79,80	7,57	8,41	9,97	13,30	0,36	0,61
82,65	7,89	8,77	10,42	13,90	0,36	0,60
85,50	8,20	9,12	10,88	14,50	0,35	0,59

Quadro VI.2 - Deslocamentos laterais para a estrutura com 30 pavimentos e contraventamento em V

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,20	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
5,70	0,41	0,45	0,46	0,48	0,23	0,26
8,55	0,63	0,71	0,74	0,79	0,25	0,30
11,40	0,87	0,97	1,05	1,13	0,27	0,34
14,25	1,13	1,26	1,40	1,50	0,29	0,37
17,10	1,40	1,57	1,76	1,90	0,31	0,40
19,95	1,69	1,90	2,18	2,35	0,33	0,45
22,80	2,01	2,26	2,63	2,84	0,36	0,49
25,65	2,34	2,63	3,10	3,36	0,37	0,52
28,50	2,68	3,02	3,60	3,91	0,39	0,54
31,35	3,03	3,42	4,11	4,47	0,40	0,57
34,20	3,38	3,83	4,64	5,06	0,41	0,58
37,05	3,75	4,25	5,19	5,67	0,42	0,61
39,90	4,13	4,68	5,76	6,30	0,43	0,63
42,75	4,52	5,13	6,35	6,95	0,44	0,65
45,60	4,91	5,57	6,96	7,62	0,45	0,67
48,45	5,30	6,03	7,57	8,30	0,45	0,68
51,30	5,71	6,49	8,20	8,99	0,46	0,69
54,15	6,12	6,97	8,85	9,72	0,48	0,73
57,00	6,54	7,45	9,52	10,45	0,48	0,73
59,85	6,96	7,92	10,18	11,19	0,48	0,73
62,70	7,37	8,39	10,83	11,91	0,47	0,73
65,55	7,77	8,85	11,48	12,63	0,46	0,72
68,40	8,16	9,30	12,12	13,33	0,45	0,71
71,25	8,55	9,74	12,74	14,03	0,44	0,69
74,10	8,92	10,17	13,36	14,71	0,43	0,68
76,95	9,28	10,58	13,96	15,37	0,41	0,66
79,80	9,63	10,97	14,54	16,02	0,40	0,65
82,65	9,96	11,36	15,11	16,65	0,38	0,63
85,50	10,29	11,73	15,67	17,26	0,37	0,61

Quadro VI.3 - Deslocamentos laterais para a estrutura com 30 pavimentos e contraventamento em “V” invertido

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,15	0,20	0,13	0,13	0,20	0,13
5,70	0,32	0,41	0,31	0,33	0,21	0,19
8,55	0,49	0,63	0,53	0,56	0,22	0,23
11,40	0,69	0,87	0,78	0,82	0,24	0,26
14,25	0,90	1,13	1,05	1,11	0,25	0,29
17,10	1,12	1,40	1,34	1,43	0,27	0,32
19,95	1,36	1,69	1,66	1,77	0,30	0,34
22,80	1,62	2,01	2,01	2,15	0,31	0,38
25,65	1,89	2,34	2,39	2,56	0,33	0,41
28,50	2,18	2,68	2,80	3,00	0,34	0,44
31,35	2,49	3,03	3,23	3,47	0,35	0,47
34,20	2,80	3,38	3,68	3,97	0,36	0,50
37,05	3,13	3,75	4,15	4,49	0,37	0,52
39,90	3,47	4,13	4,65	5,03	0,38	0,54
42,75	3,81	4,52	5,16	5,59	0,39	0,56
45,60	4,17	4,91	5,69	6,17	0,39	0,58
48,45	4,53	5,30	6,23	6,76	0,40	0,59
51,30	4,89	5,71	6,78	7,37	0,40	0,60
54,15	5,26	6,12	7,34	7,98	0,42	0,61
57,00	5,63	6,54	7,90	8,60	0,42	0,62
59,85	6,00	6,96	8,47	9,22	0,42	0,62
62,70	6,36	7,37	9,03	9,84	0,41	0,62
65,55	6,72	7,77	9,60	10,46	0,40	0,62
68,40	7,08	8,16	10,16	11,08	0,39	0,62
71,25	7,43	8,55	10,71	11,69	0,38	0,61
74,10	7,77	8,92	11,26	12,29	0,37	0,60
76,95	8,11	9,28	11,80	12,89	0,36	0,60
79,80	8,44	9,63	12,34	13,47	0,35	0,59
82,65	8,76	9,96	12,86	14,05	0,34	0,58
85,50	9,07	10,29	13,38	14,62	0,33	0,57

Quadro VI.4 - Deslocamentos laterais para a estrutura com 30 pavimentos e contraventamento em diagonais no mesmo sentido

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,22	0,24	0,20	0,28	0,00	0,28
5,70	0,44	0,50	0,42	0,61	0,25	0,32
8,55	0,67	0,77	0,66	0,96	0,27	0,35
11,40	0,92	1,05	0,92	1,35	0,29	0,38
14,25	1,18	1,36	1,21	1,76	0,30	0,41
17,10	1,46	1,68	1,51	2,20	0,32	0,44
19,95	1,75	2,02	1,85	2,69	0,34	0,49
22,80	2,07	2,39	2,21	3,22	0,37	0,53
25,65	2,40	2,77	2,61	3,77	0,38	0,56
28,50	2,74	3,17	3,02	4,36	0,40	0,58
31,35	3,09	3,58	3,44	4,96	0,41	0,61
34,20	3,45	4,01	3,89	5,59	0,42	0,63
37,05	3,82	4,44	4,35	6,24	0,44	0,65
39,90	4,21	4,89	4,83	6,92	0,45	0,67
42,75	4,59	5,34	5,32	7,60	0,45	0,69
45,60	4,98	5,80	5,82	8,30	0,46	0,70
48,45	5,38	6,26	6,32	9,01	0,46	0,71
51,30	5,77	6,72	6,83	9,72	0,46	0,71
54,15	6,17	7,19	7,35	10,45	0,47	0,73
57,00	6,57	7,65	7,87	11,18	0,47	0,73
59,85	6,96	8,12	8,39	11,91	0,46	0,73
62,70	7,35	8,57	8,91	12,63	0,45	0,72
65,55	7,73	9,02	9,41	13,34	0,45	0,71
68,40	8,10	9,45	9,91	14,04	0,44	0,70
71,25	8,46	9,88	10,40	14,73	0,42	0,69
74,10	8,81	10,29	10,88	15,40	0,41	0,67
76,95	9,15	10,68	11,35	16,05	0,40	0,65
79,80	9,47	11,07	11,81	16,69	0,38	0,64
82,65	9,78	11,44	12,25	17,31	0,37	0,62
85,50	10,09	11,80	12,68	17,91	0,36	0,60

Quadro VI.5 - Deslocamentos laterais para a estrutura com 30 pavimentos e contraventamento em diagonais alternadas

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,17	0,19	0,18	0,20	0,19	0,20
5,70	0,37	0,40	0,46	0,46	0,21	0,27
8,55	0,58	0,62	0,73	0,74	0,22	0,27
11,40	0,83	0,86	1,09	1,06	0,24	0,33
14,25	1,08	1,11	1,43	1,39	0,25	0,33
17,10	1,36	1,38	1,84	1,76	0,27	0,37
19,95	1,64	1,65	2,24	2,13	0,27	0,36
22,80	1,94	1,96	2,70	2,58	0,31	0,45
25,65	2,24	2,28	3,15	3,02	0,31	0,44
28,50	2,57	2,62	3,64	3,53	0,35	0,51
31,35	2,89	2,97	4,13	4,02	0,34	0,49
34,20	3,23	3,34	4,65	4,58	0,37	0,56
37,05	3,57	3,70	5,16	5,11	0,36	0,53
39,90	3,92	4,09	5,71	5,72	0,39	0,61
42,75	4,26	4,48	6,24	6,29	0,39	0,57
45,60	4,61	4,89	6,80	6,93	0,41	0,64
48,45	4,96	5,29	7,34	7,53	0,40	0,60
51,30	5,31	5,70	7,90	8,18	0,42	0,65
54,15	5,67	6,12	8,46	8,82	0,42	0,64
57,00	6,03	6,55	9,04	9,49	0,43	0,67
59,85	6,38	6,96	9,59	10,13	0,41	0,64
62,70	6,73	7,38	10,16	10,80	0,42	0,67
65,55	7,06	7,78	10,70	11,44	0,40	0,64
68,40	7,40	8,19	11,25	12,08	0,40	0,65
71,25	7,72	8,57	11,78	12,71	0,39	0,62
74,10	8,04	8,96	12,31	13,33	0,38	0,63
76,95	8,34	9,33	12,81	13,93	0,37	0,60
79,80	8,64	9,69	13,31	14,53	0,36	0,60
82,65	8,93	10,04	13,80	15,11	0,35	0,58
85,50	9,21	10,38	14,28	15,67	0,34	0,57

6.2. TABELAS REFERENTES À ANÁLISE QUANTO A CONTRIBUIÇÃO DA RIGIDEZ AXIAL DOS PILARES, VIGAS E DIAGONAIS, NOS DESLOCAMENTOS DA ESTRUTURA

Quadro VI.6 - Deslocamentos laterais da estrutura na direção “Y” para diferentes valores de rigidez axial dos pilares

DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO -Y					
H (m)	E'A'= 1,EA	E'A'= 2,EA	E'A'= 5,EA	E'A'= 25,EA	E'A'= 100,EA
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,19	0,16	0,14	0,13	0,13
5,70	0,70	0,48	0,34	0,27	0,26
8,55	1,33	0,86	0,57	0,42	0,39
11,40	2,25	1,38	0,86	0,57	0,52
14,25	3,29	1,97	1,17	0,74	0,65
17,10	4,60	2,69	1,53	0,91	0,79
19,95	6,01	3,46	1,91	1,08	0,92
22,80	7,68	4,36	2,35	1,27	1,06
25,65	9,45	5,32	2,80	1,45	1,20
28,50	11,45	6,38	3,30	1,65	1,34
31,35	13,55	7,50	3,82	1,84	1,47
34,20	15,85	8,72	4,38	2,05	1,61
37,05	18,24	9,98	4,96	2,26	1,75
39,90	20,82	11,33	5,57	2,47	1,89
42,75	23,48	12,73	6,20	2,68	2,02
45,60	26,31	14,21	6,86	2,90	2,16
48,45	29,22	15,72	7,53	3,12	2,29
51,30	32,27	17,32	8,23	3,35	2,43
54,15	35,40	18,94	8,95	3,57	2,56
57,00	38,66	20,64	9,69	3,80	2,70
59,85	41,97	22,36	10,44	4,03	2,83
62,70	45,41	24,14	11,21	4,26	2,96
65,55	48,90	25,94	11,99	4,50	3,09
68,40	52,49	27,80	12,80	4,73	3,21
71,25	56,13	29,67	13,60	4,96	3,34
74,10	59,86	31,60	14,43	5,20	3,46
76,95	63,62	33,54	15,26	5,43	3,58
79,80	67,47	35,51	16,10	5,67	3,70
82,65	71,34	37,50	16,95	5,90	3,82
85,50	75,29	39,53	17,81	6,13	3,94
88,35	79,28	41,59	18,69	6,38	4,07
91,20	83,35	43,69	19,59	6,64	4,20
94,05	87,45	45,80	20,49	6,89	4,33
96,90	91,60	47,93	21,40	7,14	4,46
99,75	95,78	50,08	22,32	7,39	4,58
102,60	100,01	52,25	23,23	7,63	4,70
105,45	104,25	54,42	24,15	7,87	4,81
108,30	108,53	56,61	25,07	8,11	4,92

111,15	112,81	58,80	25,99	8,34	5,02
114,00	117,12	61,00	26,90	8,57	5,12
116,85	121,43	63,20	27,82	8,80	5,22
119,70	125,76	65,40	28,73	9,02	5,31
122,55	130,09	67,60	29,65	9,24	5,39
125,40	134,43	69,81	30,55	9,45	5,47
128,25	138,76	72,01	31,46	9,65	5,55
131,10	143,09	74,21	32,36	9,85	5,62
133,95	147,43	76,40	33,25	10,05	5,68
136,80	151,75	78,59	34,14	10,24	5,74
139,65	156,08	80,77	35,02	10,42	5,79
142,50	160,39	82,95	35,90	10,60	5,84

Quadro VI.7 - Deslocamentos laterais da estrutura na direção “X” para diferentes valores de rigidez axial dos pilares

DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO - X					
H (m)	E'A'= 1,EA	E'A'= 2,EA	E'A'= 5,EA	E'A'= 25,EA	E'A'= 100,EA
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,12	0,09	0,08	0,07	0,07
5,70	0,34	0,24	0,18	0,14	0,14
8,55	0,62	0,41	0,29	0,22	0,20
11,40	1,01	0,64	0,42	0,30	0,27
14,25	1,46	0,90	0,56	0,38	0,34
17,10	2,02	1,22	0,73	0,46	0,41
19,95	2,63	1,56	0,90	0,55	0,48
22,80	3,33	1,94	1,10	0,64	0,55
25,65	4,09	2,36	1,30	0,73	0,62
28,50	4,93	2,82	1,52	0,83	0,69
31,35	5,82	3,30	1,75	0,92	0,76
34,20	6,79	3,82	2,00	1,02	0,83
37,05	7,80	4,36	2,25	1,12	0,90
39,90	8,88	4,94	2,52	1,22	0,97
42,75	10,01	5,53	2,80	1,32	1,04
45,60	11,19	6,17	3,09	1,43	1,11
48,45	12,42	6,81	3,38	1,53	1,18
51,30	13,70	7,49	3,69	1,64	1,25
54,15	15,02	8,18	4,00	1,74	1,32
57,00	16,38	8,90	4,32	1,85	1,38
59,85	17,78	9,63	4,65	1,96	1,45
62,70	19,22	10,39	4,98	2,06	1,51
65,55	20,69	11,15	5,32	2,17	1,58
68,40	22,19	11,94	5,67	2,28	1,64
71,25	23,72	12,74	6,02	2,39	1,70
74,10	25,28	13,55	6,37	2,50	1,77
76,95	26,86	14,37	6,73	2,60	1,83
79,80	28,47	15,21	7,09	2,71	1,88
82,65	30,10	16,05	7,46	2,82	1,94

85,50	31,75	16,91	7,83	2,93	2,00
88,35	33,43	17,78	8,21	3,04	2,07
91,20	35,13	18,67	8,60	3,16	2,13
94,05	36,85	19,56	8,98	3,27	2,20
96,90	38,59	20,47	9,38	3,39	2,26
99,75	40,34	21,38	9,77	3,50	2,32
102,60	42,11	22,29	10,16	3,61	2,38
105,45	43,89	23,21	10,55	3,72	2,43
108,30	45,68	24,13	10,95	3,83	2,48
111,15	47,47	25,06	11,34	3,93	2,53
114,00	49,27	25,98	11,73	4,03	2,58
116,85	51,08	26,91	12,12	4,13	2,63
119,70	52,89	27,84	12,51	4,23	2,67
122,55	54,70	28,77	12,90	4,33	2,71
125,40	56,51	29,69	13,28	4,42	2,75
128,25	58,32	30,62	13,67	4,51	2,78
131,10	60,13	31,54	14,05	4,60	2,82
133,95	61,94	32,46	14,42	4,68	2,85
136,80	63,75	33,38	14,80	4,76	2,87
139,65	65,55	34,30	15,17	4,84	2,89
142,50	67,35	35,21	15,54	4,92	2,92

Quadro VI.8 - Deslocamentos laterais da estrutura na direção “Y” para diferentes valores de rigidez axial das diagonais

DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO -Y					
H (m)	E'A'= 1,EA	E'A'= 2,EA	E'A'= 5,EA	E'A'= 25,EA	E'A'= 100,EA
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,19	0,10	0,04	0,01	0,00
5,70	0,70	0,56	0,48	0,45	0,44
8,55	1,33	1,11	0,97	0,90	0,88
11,40	2,25	1,98	1,83	1,74	1,73
14,25	3,29	2,94	2,72	2,60	2,58
17,10	4,60	4,20	3,96	3,83	3,81
19,95	6,01	5,54	5,24	5,07	5,04
22,80	7,68	7,15	6,83	6,65	6,62
25,65	9,45	8,84	8,46	8,24	8,20
28,50	11,45	10,79	10,38	10,15	10,11
31,35	13,55	12,80	12,33	12,07	12,02
34,20	15,85	15,05	14,55	14,27	14,22
37,05	18,24	17,36	16,81	16,49	16,43
39,90	20,82	19,89	19,30	18,97	18,91
42,75	23,48	22,47	21,83	21,46	21,39
45,60	26,31	25,25	24,57	24,19	24,11
48,45	29,22	28,07	27,35	26,92	26,84
51,30	32,27	31,08	30,32	29,87	29,79
54,15	35,40	34,12	33,31	32,83	32,74
57,00	38,66	37,33	36,48	35,98	35,88

59,85	41,97	40,57	39,67	39,14	39,03
62,70	45,41	43,95	43,02	42,47	42,36
65,55	48,90	47,37	46,39	45,80	45,69
68,40	52,49	50,91	49,90	49,29	49,17
71,25	56,13	54,48	53,42	52,78	52,65
74,10	59,86	58,16	57,06	56,40	56,26
76,95	63,62	61,86	60,72	60,02	59,88
79,80	67,47	65,65	64,47	63,76	63,61
82,65	71,34	69,47	68,24	67,50	67,34
85,50	75,29	73,36	72,10	71,33	71,17
88,35	79,28	77,28	75,97	75,17	75,00
91,20	83,35	81,29	79,94	79,11	78,94
94,05	87,45	85,32	83,93	83,06	82,89
96,90	91,60	89,42	87,99	87,10	86,92
99,75	95,78	93,54	92,06	91,14	90,96
102,60	100,01	97,72	96,20	95,26	95,06
105,45	104,25	101,90	100,34	99,37	99,17
108,30	108,53	106,13	104,53	103,54	103,33
111,15	112,81	110,36	108,73	107,70	107,49
114,00	117,12	114,62	112,96	111,91	111,69
116,85	121,43	118,89	117,19	116,12	115,89
119,70	125,76	123,17	121,44	120,35	120,12
122,55	130,09	127,46	125,70	124,58	124,35
125,40	134,43	131,76	129,97	128,83	128,59
128,25	138,76	136,06	134,24	133,08	132,84
131,10	143,09	140,36	138,52	137,34	137,09
133,95	147,43	144,66	142,79	141,59	141,34
136,80	151,75	148,97	147,07	145,85	145,60
139,65	156,08	153,26	151,35	150,11	149,85
142,50	160,39	157,56	155,63	154,37	154,11

Quadro VI.9 - Deslocamentos laterais da estrutura na direção “X” para diferentes valores de rigidez axial das diagonais

DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO -Y					
H (m)	E'A'= 1,EA	E'A'= 2,EA	E'A'= 5,EA	E'A'= 25,EA	E'A'= 100,EA
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,07	0,03	0,01	0,00	0,07
5,70	0,26	0,21	0,19	0,18	0,26
8,55	0,50	0,42	0,37	0,36	0,50
11,40	0,86	0,77	0,72	0,71	0,86
14,25	1,27	1,15	1,08	1,06	1,27
17,10	1,80	1,66	1,59	1,57	1,80
19,95	2,37	2,20	2,10	2,08	2,37
22,80	3,04	2,86	2,75	2,73	3,04
25,65	3,75	3,54	3,41	3,38	3,75
28,50	4,56	4,33	4,20	4,17	4,56
31,35	5,41	5,15	4,99	4,96	5,41

34,20	6,35	6,07	5,90	5,87	6,35
37,05	7,32	7,01	6,82	6,78	7,32
39,90	8,38	8,05	7,84	7,80	8,38
42,75	9,46	9,10	8,87	8,82	9,46
45,60	10,62	10,24	10,00	9,95	10,62
48,45	11,81	11,40	11,13	11,07	11,81
51,30	13,06	12,63	12,35	12,29	13,06
54,15	14,34	13,88	13,58	13,51	14,34
57,00	15,67	15,19	14,88	14,81	15,67
59,85	17,03	16,52	16,18	16,11	17,03
62,70	18,44	17,91	17,56	17,48	18,44
65,55	19,87	19,31	18,94	18,85	19,87
68,40	21,35	20,77	20,38	20,29	21,35
71,25	22,84	22,24	21,82	21,73	22,84
74,10	24,38	23,75	23,32	23,22	24,38
76,95	25,92	25,27	24,82	24,71	25,92
79,80	27,50	26,83	26,36	26,25	27,50
82,65	29,10	28,40	27,91	27,79	29,10
85,50	30,72	30,00	29,49	29,37	30,72
88,35	32,36	31,61	31,08	30,96	32,36
91,20	34,03	33,26	32,71	32,58	34,03
94,05	35,72	34,92	34,34	34,21	35,72
96,90	37,43	36,60	36,01	35,88	37,43
99,75	39,15	38,30	37,68	37,54	39,15
102,60	40,89	40,02	39,38	39,24	40,89
105,45	42,64	41,74	41,09	40,93	42,64
108,30	44,40	43,48	42,81	42,65	44,40
111,15	46,17	45,22	44,53	44,37	46,17
114,00	47,94	46,98	46,27	46,10	47,94
116,85	49,72	48,74	48,01	47,84	49,72
119,70	51,51	50,51	49,76	49,58	51,51
122,55	53,30	52,27	51,51	51,33	53,30
125,40	55,09	54,05	53,27	53,08	55,09
128,25	56,88	55,82	55,03	54,83	56,88
131,10	58,68	57,60	56,79	56,59	58,68
133,95	60,47	59,37	58,55	58,35	60,47
136,80	62,26	61,15	60,31	60,10	62,26
139,65	64,05	62,93	62,07	61,86	64,05
142,50	65,84	64,70	63,83	63,62	65,84

Quadro VI.10 - Deslocamentos laterais da estrutura na direção “Y” para diferentes valores de rigidez axial das vigas

DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO -Y					
H (m)	$E'A' = 1,EA$	$E'A' = 2,EA$	$E'A' = 5,EA$	$E'A' = 25,EA$	$E'A' = 100,EA$
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
5,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

8,55	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
11,40	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
14,25	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29
17,10	4,60	4,60	4,60	4,60	4,60
19,95	6,01	6,01	6,01	6,01	6,01
22,80	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68
25,65	9,45	9,45	9,45	9,45	9,45
28,50	11,45	11,45	11,45	11,45	11,45
31,35	13,55	13,55	13,55	13,55	13,55
34,20	15,85	15,85	15,85	15,85	15,85
37,05	18,24	18,24	18,24	18,24	18,24
39,90	20,82	20,82	20,82	20,82	20,82
42,75	23,48	23,48	23,48	23,48	23,48
45,60	26,31	26,31	26,31	26,31	26,31
48,45	29,22	29,22	29,22	29,22	29,22
51,30	32,27	32,27	32,27	32,27	32,27
54,15	35,40	35,40	35,40	35,40	35,40
57,00	38,66	38,66	38,66	38,66	38,66
59,85	41,97	41,97	41,97	41,97	41,97
62,70	45,41	45,41	45,41	45,41	45,41
65,55	48,90	48,90	48,90	48,90	48,90
68,40	52,49	52,49	52,49	52,49	52,49
71,25	56,13	56,13	56,13	56,13	56,13
74,10	59,86	59,86	59,86	59,86	59,86
76,95	63,62	63,62	63,62	63,62	63,62
79,80	67,47	67,47	67,47	67,47	67,47
82,65	71,34	71,34	71,34	71,34	71,34
85,50	75,29	75,29	75,29	75,29	75,29
88,35	79,28	79,28	79,28	79,28	79,28
91,20	83,35	83,35	83,35	83,35	83,35
94,05	87,45	87,45	87,45	87,45	87,45
96,90	91,60	91,60	91,60	91,60	91,60
99,75	95,78	95,78	95,78	95,78	95,78
102,60	100,01	100,01	100,01	100,01	100,01
105,45	104,25	104,25	104,25	104,25	104,25
108,30	108,53	108,53	108,53	108,53	108,53
111,15	112,81	112,81	112,81	112,81	112,81
114,00	117,12	117,12	117,12	117,12	117,12
116,85	121,43	121,43	121,43	121,43	121,43
119,70	125,76	125,76	125,76	125,76	125,76
122,55	130,09	130,09	130,09	130,09	130,09
125,40	134,43	134,43	134,43	134,43	134,43
128,25	138,76	138,76	138,76	138,76	138,76
131,10	143,09	143,09	143,09	143,09	143,09
133,95	147,43	147,43	147,43	147,43	147,43
136,80	151,75	151,75	151,75	151,75	151,75
139,65	156,08	156,08	156,08	156,08	156,08
142,50	160,39	160,39	160,39	160,39	160,39

Quadro VI.11 - Deslocamentos laterais da estrutura na direção “X” para diferentes valores de rigidez axial das vigas

DESLOCAMENTOS NA DIREÇÃO -Y					
H (m)	E'A'= 1,EA	E'A'= 2,EA	E'A'= 5,EA	E'A'= 25,EA	E'A'= 100,EA
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
5,70	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
8,55	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
11,40	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
14,25	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46
17,10	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
19,95	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
22,80	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
25,65	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09
28,50	4,93	4,93	4,93	4,93	4,93
31,35	5,82	5,82	5,82	5,82	5,82
34,20	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79
37,05	7,80	7,80	7,80	7,80	7,80
39,90	8,88	8,88	8,88	8,88	8,88
42,75	10,01	10,01	10,01	10,01	10,01
45,60	11,19	11,19	11,19	11,19	11,19
48,45	12,42	12,42	12,42	12,42	12,42
51,30	13,70	13,70	13,70	13,70	13,70
54,15	15,02	15,02	15,02	15,02	15,02
57,00	16,38	16,38	16,38	16,38	16,38
59,85	17,78	17,78	17,78	17,78	17,78
62,70	19,22	19,22	19,22	19,22	19,22
65,55	20,69	20,69	20,69	20,69	20,69
68,40	22,19	22,19	22,19	22,19	22,19
71,25	23,72	23,72	23,72	23,72	23,72
74,10	25,28	25,28	25,28	25,28	25,28
76,95	26,86	26,86	26,86	26,86	26,86
79,80	28,47	28,47	28,47	28,47	28,47
82,65	30,10	30,10	30,10	30,10	30,10
85,50	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75
88,35	33,43	33,43	33,43	33,43	33,43
91,20	35,13	35,13	35,13	35,13	35,13
94,05	36,85	36,85	36,85	36,85	36,85
96,90	38,59	38,59	38,59	38,59	38,59
99,75	40,34	40,34	40,34	40,34	40,34
102,60	42,11	42,11	42,11	42,11	42,11
105,45	43,89	43,89	43,89	43,89	43,89
108,30	45,68	45,68	45,68	45,68	45,68
111,15	47,47	47,47	47,47	47,47	47,47
114,00	49,27	49,27	49,27	49,27	49,27
116,85	51,08	51,08	51,08	51,08	51,08
119,70	52,89	52,89	52,89	52,89	52,89
122,55	54,70	54,70	54,70	54,70	54,70
125,40	56,51	56,51	56,51	56,51	56,51

128,25	58,32	58,32	58,32	58,32	58,32
131,10	60,13	60,13	60,13	60,13	60,13
133,95	61,94	61,94	61,94	61,94	61,94
136,80	63,75	63,75	63,75	63,75	63,75
139,65	65,55	65,55	65,55	65,55	65,55
142,50	67,35	67,35	67,35	67,35	67,35

Quadro VI.12 - Contribuição dos pilares, diagonais e vigas nos deslocamentos laterais da estrutura na direção “Y”

H (m)	DESLOC, TOTAL	DESLOC, PILARES	DESLOC, DIAGONAIS	DESLOC, VIGAS
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,19	0,00	0,13	0,00
5,70	0,70	0,44	0,25	0,00
8,55	1,33	0,88	0,38	0,00
11,40	2,25	1,73	0,50	0,00
14,25	3,29	2,57	0,63	0,00
17,10	4,60	3,80	0,75	0,00
19,95	6,01	5,03	0,88	0,01
22,80	7,68	6,61	1,00	0,01
25,65	9,45	8,19	1,12	0,01
28,50	11,45	10,10	1,24	0,01
31,35	13,55	12,01	1,36	0,01
34,20	15,85	14,22	1,48	0,02
37,05	18,24	16,42	1,60	0,02
39,90	20,82	18,90	1,71	0,02
42,75	23,48	21,38	1,82	0,02
45,60	26,31	24,11	1,93	0,03
48,45	29,22	26,83	2,04	0,03
51,30	32,27	29,78	2,15	0,03
54,15	35,40	32,73	2,26	0,04
57,00	38,66	35,88	2,36	0,04
59,85	41,97	39,03	2,46	0,04
62,70	45,41	42,36	2,56	0,05
65,55	48,90	45,69	2,66	0,05
68,40	52,49	49,17	2,76	0,05
71,25	56,13	52,65	2,85	0,06
74,10	59,86	56,27	2,94	0,06
76,95	63,62	59,89	3,03	0,06
79,80	67,47	63,62	3,11	0,07
82,65	71,34	67,35	3,19	0,07
85,50	75,29	71,18	3,28	0,08
88,35	79,28	75,01	3,37	0,08
91,20	83,35	78,96	3,47	0,08
94,05	87,45	82,90	3,56	0,09
96,90	91,60	86,94	3,65	0,09
99,75	95,78	90,97	3,73	0,10

102,60	100,01	95,08	3,81	0,10
105,45	104,25	99,19	3,89	0,11
108,30	108,53	103,35	3,96	0,11
111,15	112,81	107,51	4,03	0,11
114,00	117,12	111,72	4,09	0,12
116,85	121,43	115,92	4,14	0,12
119,70	125,76	120,15	4,19	0,13
122,55	130,09	124,38	4,24	0,13
125,40	134,43	128,62	4,28	0,14
128,25	138,76	132,87	4,32	0,14
131,10	143,09	137,12	4,35	0,15
133,95	147,43	141,38	4,37	0,15
136,80	151,75	145,63	4,39	0,15
139,65	156,08	149,89	4,40	0,16
142,50	160,39	154,15	4,41	0,16

Quadro VI.13 - Contribuição dos pilares, contraventamentos e vigas nos deslocamentos laterais da estrutura na direção “X”

H (m)	DESLOC, TOTAL	DESLOC, PILARES	DESLOC, CONTRAV,	DESLOC, VIGAS
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,12	0,00	0,07	0,00
5,70	0,34	0,18	0,13	0,00
8,55	0,62	0,36	0,20	0,00
11,40	1,01	0,71	0,27	0,00
14,25	1,46	1,06	0,33	0,00
17,10	2,02	1,57	0,40	0,00
19,95	2,63	2,07	0,46	0,00
22,80	3,33	2,73	0,53	0,00
25,65	4,09	3,38	0,59	0,00
28,50	4,93	4,17	0,65	0,01
31,35	5,82	4,95	0,72	0,01
34,20	6,79	5,86	0,78	0,01
37,05	7,80	6,77	0,84	0,01
39,90	8,88	7,79	0,90	0,01
42,75	10,01	8,82	0,96	0,01
45,60	11,19	9,94	1,02	0,01
48,45	12,42	11,07	1,08	0,01
51,30	13,70	12,28	1,13	0,01
54,15	15,02	13,50	1,19	0,02
57,00	16,38	14,80	1,24	0,02
59,85	17,78	16,10	1,30	0,02
62,70	19,22	17,47	1,35	0,02
65,55	20,69	18,84	1,40	0,02
68,40	22,19	20,28	1,45	0,02
71,25	23,72	21,72	1,50	0,02
74,10	25,28	23,21	1,55	0,03

76,95	26,86	24,70	1,59	0,03
79,80	28,47	26,24	1,64	0,03
82,65	30,10	27,78	1,68	0,03
85,50	31,75	29,36	1,72	0,03
88,35	33,43	30,94	1,77	0,03
91,20	35,13	32,57	1,82	0,04
94,05	36,85	34,20	1,87	0,04
96,90	38,59	35,86	1,92	0,04
99,75	40,34	37,53	1,96	0,04
102,60	42,11	39,22	2,00	0,04
105,45	43,89	40,92	2,04	0,05
108,30	45,68	42,64	2,08	0,05
111,15	47,47	44,36	2,11	0,05
114,00	49,27	46,09	2,15	0,05
116,85	51,08	47,82	2,18	0,05
119,70	52,89	49,57	2,20	0,05
122,55	54,70	51,32	2,23	0,06
125,40	56,51	53,07	2,25	0,06
128,25	58,32	54,82	2,27	0,06
131,10	60,13	56,58	2,28	0,06
133,95	61,94	58,33	2,29	0,06
136,80	63,75	60,09	2,30	0,07
139,65	65,55	61,85	2,31	0,07
142,50	67,35	63,60	2,31	0,07

6.3. TABELAS REFERENTES À ANÁLISE QUANTO AO POSICIONAMENTO DOS CONTRAVENTAMENTOS EM DIFERENTES VÃOS AO LONGO DA ALTURA DA EDIFICAÇÃO

Quadro VI.14 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos e com contraventamentos ao longo de um único vão

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,12	0,13	0,21	0,23	0,13	0,23
5,70	0,27	0,30	0,52	0,59	0,17	0,36
8,55	0,45	0,51	0,90	1,03	0,20	0,44
11,40	0,67	0,76	1,37	1,60	0,25	0,57
14,25	0,91	1,04	1,91	2,24	0,28	0,64

17,10	1,19	1,37	2,53	3,00	0,33	0,76
19,95	1,49	1,73	3,21	3,84	0,36	0,83
22,80	1,84	2,14	4,00	4,81	0,41	0,98
25,65	2,21	2,58	4,84	5,86	0,44	1,05
28,50	2,62	3,07	5,77	7,02	0,49	1,17
31,35	3,04	3,58	6,75	8,25	0,51	1,22
34,20	3,50	4,14	7,80	9,57	0,55	1,33
37,05	3,99	4,73	8,92	10,99	0,59	1,41
39,90	4,52	5,36	10,13	12,52	0,64	1,54
42,75	5,06	6,02	11,38	14,11	0,66	1,59
45,60	5,63	6,71	12,70	15,79	0,69	1,68
48,45	6,21	7,42	14,05	17,51	0,71	1,71
51,30	6,81	8,16	15,44	19,29	0,73	1,79
54,15	7,43	8,91	16,87	21,12	0,75	1,83
57,00	8,05	9,68	18,33	23,00	0,77	1,87
59,85	8,68	10,45	19,81	24,88	0,77	1,88
62,70	9,32	11,23	21,29	26,79	0,78	1,91
65,55	9,96	12,01	22,78	28,70	0,78	1,91
68,40	10,60	12,79	24,28	30,62	0,78	1,92
71,25	11,25	13,58	25,79	32,56	0,79	1,94
74,10	11,89	14,36	27,30	34,49	0,78	1,93
76,95	12,52	15,14	28,79	36,41	0,78	1,92
79,80	13,15	15,91	30,27	38,30	0,77	1,90
82,65	13,77	16,67	31,73	40,17	0,76	1,87
85,50	14,38	17,42	33,18	42,03	0,75	1,85

Quadro VI.15 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos e com contraventamentos ao longo de um único vão

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,12	0,16	0,19	0,26	0,16	0,26
5,70	0,34	0,50	0,70	1,15	0,34	0,89
8,55	0,62	0,94	1,33	2,31	0,45	1,16
11,40	1,01	1,58	2,25	4,07	0,64	1,76
14,25	1,46	2,32	3,29	6,09	0,74	2,02
17,10	2,02	3,24	4,60	8,68	0,92	2,59
19,95	2,63	4,27	6,01	11,51	1,02	2,83
22,80	3,33	5,46	7,68	14,88	1,19	3,37
25,65	4,09	6,74	9,45	18,48	1,29	3,60
28,50	4,93	8,18	11,45	22,58	1,44	4,11
31,35	5,82	9,71	13,55	26,90	1,53	4,32

34,20	6,79	11,39	15,85	31,69	1,67	4,79
37,05	7,80	13,14	18,24	36,68	1,76	4,99
39,90	8,88	15,03	20,82	42,10	1,89	5,42
42,75	10,01	16,99	23,48	47,70	1,96	5,60
45,60	11,19	19,08	26,31	53,70	2,08	6,00
48,45	12,42	21,23	29,22	59,86	2,15	6,16
51,30	13,70	23,49	32,28	66,38	2,26	6,52
54,15	15,02	25,81	35,40	73,05	2,32	6,67
57,00	16,39	28,23	38,66	80,05	2,42	7,00
59,85	17,79	30,72	41,99	87,21	2,49	7,16
62,70	19,24	33,29	45,45	94,66	2,57	7,45
65,55	20,72	35,91	48,96	102,23	2,62	7,57
68,40	22,23	38,61	52,57	110,04	2,70	7,81
71,25	23,77	41,35	56,23	117,96	2,74	7,92
74,10	25,34	44,15	59,97	126,09	2,80	8,13
76,95	26,93	46,99	63,75	134,31	2,84	8,22
79,80	28,55	49,88	67,61	142,71	2,89	8,40
82,65	30,18	52,80	71,51	151,18	2,92	8,47
85,50	31,84	55,77	75,46	159,81	2,97	8,63
88,35	33,52	58,78	79,46	168,54	3,01	8,73
91,20	35,23	61,84	83,54	177,45	3,06	8,91
94,05	36,95	64,94	87,65	186,43	3,09	8,98
96,90	38,70	68,07	91,81	195,55	3,13	9,12
99,75	40,46	71,22	96,00	204,72	3,15	9,17
102,60	42,23	74,41	100,23	213,99	3,19	9,28
105,45	44,01	77,61	104,48	223,31	3,20	9,31
108,30	45,80	80,83	108,76	232,70	3,22	9,39
111,15	47,60	84,06	113,05	242,12	3,23	9,42
114,00	49,41	87,32	117,37	251,60	3,25	9,48
116,85	51,23	90,60	121,73	261,17	3,29	9,57
119,70	53,07	93,91	126,13	270,83	3,31	9,66
122,55	54,91	97,23	130,52	280,50	3,32	9,67
125,40	56,76	100,56	134,93	290,20	3,33	9,70
128,25	58,60	103,88	139,34	299,90	3,32	9,70
131,10	60,45	107,20	143,75	309,60	3,32	9,70
133,95	62,29	110,52	148,15	319,28	3,32	9,68
136,80	64,12	113,83	152,54	328,95	3,31	9,67
139,65	65,95	117,13	156,93	338,60	3,30	9,65
142,50	67,78	120,42	161,30	348,23	3,29	9,63

Quadro VI.16 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos posicionados em três vãos

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,12	0,13	0,23	0,24	0,13	0,24
5,70	0,26	0,27	0,55	0,59	0,15	0,34
8,55	0,40	0,43	0,91	0,97	0,16	0,39
11,40	0,56	0,60	1,33	1,43	0,17	0,46
14,25	0,72	0,78	1,78	1,92	0,18	0,49
17,10	0,89	0,96	2,27	2,46	0,18	0,54
19,95	1,06	1,14	2,79	3,02	0,18	0,56
22,80	1,23	1,32	3,33	3,60	0,18	0,58
25,65	1,39	1,50	3,86	4,18	0,18	0,58
28,50	1,55	1,67	4,38	4,74	0,17	0,56
31,35	1,73	1,87	4,84	5,27	0,20	0,52
34,20	1,94	2,09	5,34	5,83	0,23	0,57
37,05	2,16	2,34	5,88	6,44	0,24	0,61
39,90	2,39	2,60	6,46	7,10	0,26	0,66
42,75	2,62	2,86	7,04	7,78	0,26	0,67
45,60	2,86	3,12	7,64	8,46	0,26	0,69
48,45	3,09	3,37	8,23	9,15	0,25	0,68
51,30	3,30	3,61	8,81	9,82	0,24	0,67
54,15	3,49	3,83	9,38	10,47	0,21	0,66
57,00	3,59	3,94	9,79	10,95	0,11	0,48
59,85	3,46	3,78	9,57	10,67	-0,16	-0,28
62,70	3,25	3,53	9,23	10,24	-0,25	-0,43
65,55	3,01	3,25	8,88	9,81	-0,27	-0,44
68,40	2,77	2,97	8,53	9,36	-0,29	-0,44
71,25	2,53	2,68	8,20	8,94	-0,28	-0,42
74,10	2,28	2,39	7,85	8,51	-0,29	-0,44
76,95	2,01	2,08	7,48	8,04	-0,31	-0,46
79,80	1,73	1,76	7,08	7,55	-0,32	-0,49
82,65	1,44	1,42	6,66	7,04	-0,34	-0,52
85,50	1,13	1,08	6,20	6,50	-0,35	-0,54

Quadro VI.17 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos e com contraventamentos posicionados em três vãos

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,11	0,12	0,21	0,22	0,12	0,22
5,70	0,26	0,29	0,57	0,62	0,17	0,40
8,55	0,44	0,48	0,99	1,10	0,19	0,48
11,40	0,65	0,72	1,55	1,74	0,24	0,64
14,25	0,89	0,98	2,16	2,44	0,26	0,70
17,10	1,15	1,28	2,87	3,26	0,30	0,83
19,95	1,43	1,59	3,63	4,14	0,31	0,88
22,80	1,73	1,92	4,47	5,11	0,34	0,97
25,65	2,03	2,27	5,33	6,12	0,35	1,01
28,50	2,35	2,63	6,26	7,19	0,36	1,07
31,35	2,67	3,00	7,19	8,29	0,36	1,09
34,20	2,99	3,37	8,17	9,42	0,37	1,14
37,05	3,32	3,73	9,15	10,57	0,37	1,15
39,90	3,63	4,10	10,15	11,73	0,36	1,16
42,75	3,94	4,45	11,14	12,89	0,35	1,16
45,60	4,23	4,79	12,12	14,03	0,34	1,14
48,45	4,51	5,11	13,08	15,14	0,32	1,12
51,30	4,77	5,41	13,98	16,18	0,30	1,04
54,15	5,06	5,73	14,73	17,10	0,33	0,92
57,00	5,38	6,10	15,55	18,11	0,36	1,01
59,85	5,73	6,50	16,46	19,22	0,40	1,11
62,70	6,12	6,94	17,46	20,47	0,44	1,24
65,55	6,51	7,40	18,49	21,75	0,46	1,28
68,40	6,93	7,88	19,58	23,11	0,48	1,36
71,25	7,35	8,37	20,68	24,49	0,49	1,38
74,10	7,78	8,86	21,81	25,91	0,49	1,42
76,95	8,21	9,35	22,95	27,33	0,49	1,43
79,80	8,63	9,84	24,08	28,76	0,49	1,43
82,65	9,04	10,32	25,20	30,18	0,48	1,42
85,50	9,43	10,77	26,29	31,56	0,45	1,38
88,35	9,80	11,19	27,32	32,87	0,42	1,31
91,20	10,14	11,59	28,31	34,13	0,40	1,26
94,05	10,45	11,95	29,28	35,37	0,36	1,24
96,90	10,66	12,19	30,01	36,30	0,24	0,92
99,75	10,60	12,10	29,73	35,87	-0,09	-0,42
102,60	10,47	11,91	29,28	35,21	-0,19	-0,67
105,45	10,32	11,71	28,84	34,55	-0,21	-0,66
108,30	10,18	11,50	28,41	33,89	-0,21	-0,65

111,15	10,03	11,29	27,98	33,24	-0,21	-0,65
114,00	9,89	11,08	27,57	32,60	-0,20	-0,64
116,85	9,77	10,90	27,22	32,03	-0,18	-0,57
119,70	9,66	10,73	26,90	31,48	-0,17	-0,55
122,55	9,55	10,55	26,57	30,92	-0,18	-0,56
125,40	9,43	10,36	26,23	30,34	-0,19	-0,58
128,25	9,30	10,16	25,87	29,75	-0,20	-0,59
131,10	9,16	9,95	25,49	29,14	-0,21	-0,61
133,95	9,01	9,73	25,10	28,51	-0,22	-0,63
136,80	8,84	9,50	24,68	27,86	-0,23	-0,65
139,65	8,67	9,26	24,25	27,20	-0,24	-0,66
142,50	8,49	9,01	23,80	26,52	-0,25	-0,68

Quadro VI.18 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos ao longo de vãos adjacentes

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,10	0,11	0,20	0,21	0,11	0,21
5,70	0,20	0,21	0,37	0,39	0,10	0,18
8,55	0,31	0,32	0,61	0,64	0,11	0,25
11,40	0,42	0,45	0,89	0,93	0,12	0,30
14,25	0,53	0,56	1,19	1,26	0,11	0,32
17,10	0,64	0,67	1,52	1,60	0,11	0,35
19,95	0,76	0,79	1,83	1,94	0,12	0,33
22,80	0,85	0,89	2,10	2,23	0,10	0,29
25,65	0,90	0,94	2,17	2,29	0,04	0,06
28,50	0,93	0,97	2,22	2,34	0,03	0,04
31,35	1,02	1,06	2,50	2,63	0,09	0,29
34,20	1,12	1,17	2,85	3,01	0,11	0,38
37,05	1,21	1,26	3,27	3,45	0,10	0,44
39,90	1,30	1,36	3,71	3,92	0,09	0,47
42,75	1,40	1,46	4,08	4,32	0,10	0,40
45,60	1,46	1,52	4,37	4,63	0,06	0,31
48,45	1,43	1,49	4,30	4,55	-0,03	-0,08
51,30	1,39	1,45	4,21	4,44	-0,04	-0,11
54,15	1,43	1,49	4,49	4,74	0,05	0,30
57,00	1,51	1,57	4,87	5,14	0,08	0,41
59,85	1,57	1,63	5,36	5,67	0,06	0,52
62,70	1,62	1,69	5,86	6,19	0,06	0,53
65,55	1,67	1,74	6,21	6,57	0,05	0,38
68,40	1,68	1,75	6,44	6,81	0,01	0,25

71,25	1,59	1,65	6,26	6,62	-0,10	-0,19
74,10	1,48	1,54	6,06	6,40	-0,11	-0,22
76,95	1,46	1,52	6,25	6,60	-0,02	0,20
79,80	1,47	1,53	6,55	6,92	0,01	0,31
82,65	1,47	1,53	6,99	7,38	0,01	0,46
85,50	1,47	1,54	7,46	7,87	0,00	0,49

Quadro VI.19 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos e com contraventamentos ao longo de vãos adjacentes

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,07	0,08	0,14	0,14	0,08	0,14
5,70	0,15	0,15	0,27	0,27	0,08	0,13
8,55	0,24	0,24	0,46	0,47	0,09	0,20
11,40	0,33	0,34	0,69	0,72	0,10	0,25
14,25	0,42	0,44	0,93	0,98	0,09	0,26
17,10	0,51	0,53	1,20	1,27	0,10	0,29
19,95	0,62	0,65	1,49	1,58	0,12	0,31
22,80	0,73	0,77	1,78	1,88	0,11	0,30
25,65	0,82	0,85	1,88	1,98	0,09	0,10
28,50	0,90	0,94	1,98	2,08	0,09	0,10
31,35	1,03	1,07	2,32	2,44	0,13	0,36
34,20	1,17	1,22	2,73	2,89	0,15	0,45
37,05	1,29	1,35	3,14	3,34	0,13	0,45
39,90	1,41	1,48	3,58	3,81	0,13	0,47
42,75	1,56	1,64	4,02	4,30	0,16	0,49
45,60	1,70	1,79	4,42	4,73	0,15	0,43
48,45	1,80	1,89	4,54	4,85	0,11	0,11
51,30	1,89	2,00	4,64	4,95	0,10	0,11
54,15	2,03	2,14	5,05	5,40	0,15	0,45
57,00	2,19	2,30	5,55	5,94	0,16	0,54
59,85	2,31	2,44	6,08	6,53	0,14	0,58
62,70	2,44	2,58	6,64	7,14	0,14	0,61
65,55	2,61	2,75	7,18	7,73	0,17	0,60
68,40	2,75	2,91	7,65	8,25	0,16	0,51
71,25	2,84	3,01	7,74	8,33	0,10	0,09
74,10	2,93	3,10	7,82	8,40	0,09	0,07
76,95	3,06	3,24	8,28	8,91	0,15	0,51
79,80	3,21	3,40	8,85	9,53	0,16	0,62
82,65	3,33	3,52	9,46	10,21	0,12	0,68

85,50	3,44	3,65	10,10	10,91	0,12	0,70
88,35	3,60	3,81	10,69	11,56	0,16	0,65
91,20	3,73	3,95	11,18	12,09	0,14	0,53
94,05	3,79	4,02	11,23	12,14	0,07	0,05
96,90	3,85	4,09	11,27	12,18	0,06	0,04
99,75	3,96	4,21	11,74	12,69	0,12	0,51
102,60	4,09	4,35	12,31	13,32	0,14	0,63
105,45	4,19	4,45	12,99	14,06	0,10	0,75
108,30	4,28	4,55	13,68	14,81	0,10	0,75
111,15	4,40	4,67	14,23	15,42	0,12	0,61
114,00	4,49	4,77	14,67	15,90	0,10	0,48
116,85	4,52	4,81	14,70	15,92	0,04	0,02
119,70	4,54	4,84	14,70	15,93	0,03	0,00
122,55	4,62	4,92	15,11	16,38	0,08	0,45
125,40	4,71	5,02	15,65	16,96	0,10	0,58
128,25	4,77	5,09	16,33	17,70	0,07	0,74
131,10	4,83	5,16	17,00	18,43	0,07	0,73
133,95	4,90	5,23	17,49	18,97	0,07	0,54
136,80	4,93	5,27	17,83	19,35	0,04	0,37
139,65	4,88	5,23	17,74	19,25	-0,04	-0,10
142,50	4,81	5,16	17,53	19,03	-0,07	-0,22

6.4. TABELAS REFERENTES À ANÁLISE QUANTO A ASSOCIAÇÃO EM LINHA DOS CONTRAVENTAMENTOS

Quadro VI.20 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos contraventada com duas treliças juntas

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,06	0,07	0,11	0,12	0,07	0,12
5,70	0,15	0,16	0,26	0,27	0,09	0,15
8,55	0,24	0,25	0,41	0,43	0,10	0,16
11,40	0,36	0,37	0,60	0,62	0,12	0,19
14,25	0,48	0,50	0,79	0,83	0,13	0,20
17,10	0,61	0,65	1,00	1,05	0,15	0,22
19,95	0,76	0,80	1,21	1,28	0,15	0,23
22,80	0,91	0,97	1,45	1,53	0,17	0,25
25,65	1,08	1,14	1,68	1,78	0,17	0,25

28,50	1,25	1,33	1,93	2,05	0,19	0,27
31,35	1,43	1,52	2,18	2,32	0,19	0,27
34,20	1,61	1,72	2,44	2,60	0,20	0,28
37,05	1,80	1,92	2,70	2,88	0,20	0,28
39,90	2,00	2,13	2,96	3,16	0,21	0,29
42,75	2,20	2,34	3,23	3,45	0,21	0,28
45,60	2,40	2,56	3,49	3,73	0,22	0,29
48,45	2,61	2,78	3,75	4,02	0,22	0,28
51,30	2,81	3,00	4,01	4,30	0,22	0,28
54,15	3,02	3,22	4,27	4,58	0,22	0,28
57,00	3,23	3,45	4,52	4,85	0,22	0,27
59,85	3,44	3,67	4,77	5,12	0,22	0,27
62,70	3,65	3,89	5,01	5,38	0,22	0,26
65,55	3,85	4,12	5,25	5,64	0,22	0,26
68,40	4,06	4,34	5,48	5,89	0,22	0,25
71,25	4,26	4,55	5,70	6,13	0,22	0,24
74,10	4,46	4,77	5,91	6,37	0,22	0,24
76,95	4,66	4,98	6,12	6,60	0,21	0,23
79,80	4,86	5,19	6,32	6,82	0,21	0,22
82,65	5,05	5,40	6,51	7,03	0,21	0,21
85,50	5,24	5,60	6,70	7,24	0,20	0,21

Quadro VI.21 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos contraventada com duas treliças juntas

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,05	0,05	0,09	0,09	0,05	0,09
5,70	0,12	0,12	0,22	0,23	0,07	0,14
8,55	0,19	0,21	0,37	0,39	0,08	0,16
11,40	0,29	0,31	0,56	0,60	0,11	0,21
14,25	0,39	0,43	0,76	0,83	0,11	0,22
17,10	0,51	0,56	1,00	1,09	0,13	0,27
19,95	0,64	0,70	1,25	1,38	0,14	0,28
22,80	0,79	0,86	1,54	1,70	0,16	0,32
25,65	0,94	1,03	1,84	2,04	0,17	0,34
28,50	1,10	1,21	2,16	2,41	0,19	0,37
31,35	1,28	1,41	2,52	2,81	0,20	0,40
34,20	1,48	1,64	2,92	3,27	0,22	0,45
37,05	1,68	1,87	3,32	3,74	0,23	0,47
39,90	1,90	2,12	3,77	4,25	0,25	0,51

2,85	0,07	0,07	0,12	0,13	0,07	0,13
5,70	0,17	0,18	0,33	0,36	0,11	0,23
8,55	0,28	0,30	0,57	0,62	0,12	0,26
11,40	0,43	0,46	0,89	0,97	0,16	0,35
14,25	0,58	0,63	1,23	1,34	0,17	0,37
17,10	0,77	0,83	1,63	1,79	0,20	0,45
19,95	0,96	1,04	2,06	2,27	0,21	0,47
22,80	1,17	1,27	2,54	2,80	0,23	0,54
25,65	1,39	1,51	3,03	3,36	0,24	0,56
28,50	1,63	1,78	3,58	3,97	0,26	0,61
31,35	1,88	2,05	4,13	4,59	0,27	0,62
34,20	2,14	2,33	4,72	5,26	0,29	0,67
37,05	2,40	2,63	5,32	5,94	0,29	0,68
39,90	2,68	2,93	5,95	6,65	0,30	0,71
42,75	2,96	3,24	6,59	7,36	0,31	0,72
45,60	3,25	3,56	7,25	8,11	0,32	0,74
48,45	3,53	3,88	7,91	8,85	0,32	0,75
51,30	3,83	4,20	8,59	9,62	0,33	0,76
54,15	4,12	4,53	9,27	10,38	0,33	0,77
57,00	4,42	4,86	9,95	11,16	0,33	0,78
59,85	4,72	5,19	10,64	11,94	0,33	0,78
62,70	5,02	5,52	11,33	12,72	0,33	0,78
65,55	5,32	5,84	12,02	13,49	0,33	0,78
68,40	5,61	6,17	12,71	14,27	0,33	0,78
71,25	5,91	6,50	13,39	15,04	0,33	0,77
74,10	6,20	6,82	14,07	15,81	0,32	0,77
76,95	6,49	7,14	14,74	16,57	0,32	0,76
79,80	6,78	7,46	15,41	17,33	0,32	0,76
82,65	7,06	7,77	16,08	18,08	0,31	0,75
85,50	7,34	8,08	16,73	18,82	0,31	0,74

Quadro VI.23 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos contraventada com duas treliças separadas

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,05	0,05	0,08	0,09	0,05	0,09
5,70	0,15	0,18	0,35	0,42	0,12	0,32
8,55	0,28	0,34	0,66	0,79	0,15	0,38
11,40	0,48	0,57	1,13	1,39	0,23	0,59
14,25	0,69	0,84	1,64	2,04	0,26	0,64

17,10	0,97	1,19	2,30	2,89	0,34	0,85
19,95	1,27	1,56	2,99	3,79	0,37	0,89
22,80	1,63	2,02	3,83	4,88	0,45	1,08
25,65	2,02	2,50	4,69	6,00	0,48	1,12
28,50	2,46	3,06	5,65	7,28	0,56	1,27
31,35	2,94	3,65	6,67	8,63	0,59	1,34
34,20	3,44	4,29	7,77	10,09	0,63	1,45
37,05	3,96	4,95	8,89	11,58	0,65	1,49
39,90	4,51	5,64	10,09	13,18	0,69	1,59
42,75	5,07	6,35	11,31	14,81	0,70	1,63
45,60	5,65	7,09	12,60	16,53	0,74	1,72
48,45	6,25	7,84	13,91	18,28	0,75	1,75
51,30	6,86	8,63	15,28	20,11	0,78	1,83
54,15	7,49	9,43	16,67	21,97	0,80	1,86
57,00	8,14	10,26	18,11	23,91	0,82	1,93
59,85	8,81	11,11	19,58	25,89	0,84	1,98
62,70	9,51	11,99	21,14	27,98	0,88	2,09
65,55	10,21	12,90	22,71	30,10	0,90	2,12
68,40	10,95	13,83	24,35	32,31	0,93	2,21
71,25	11,69	14,78	26,00	34,55	0,95	2,23
74,10	12,45	15,76	27,72	36,87	0,97	2,31
76,95	13,23	16,75	29,44	39,20	0,98	2,33
79,80	14,02	17,76	31,22	41,61	1,01	2,40
82,65	14,81	18,78	33,01	44,03	1,02	2,42
85,50	15,63	19,83	34,83	46,51	1,04	2,48
88,35	16,45	20,89	36,69	49,03	1,06	2,52
91,20	17,31	21,99	38,62	51,65	1,09	2,61
94,05	18,17	23,09	40,55	54,28	1,10	2,62
96,90	19,04	24,22	42,53	56,97	1,12	2,69
99,75	19,92	25,35	44,52	59,68	1,13	2,70
102,60	20,82	26,50	46,54	62,43	1,15	2,75
105,45	21,72	27,66	48,56	65,19	1,15	2,76
108,30	22,62	28,82	50,61	67,99	1,16	2,79
111,15	23,53	29,99	52,67	70,79	1,16	2,80
114,00	24,45	31,17	54,74	73,62	1,18	2,82
116,85	25,37	32,37	56,83	76,47	1,19	2,85
119,70	26,30	33,56	58,93	79,34	1,19	2,87
122,55	27,22	34,76	61,03	82,21	1,19	2,86
125,40	28,15	35,95	63,13	85,07	1,19	2,86
128,25	29,07	37,14	65,22	87,93	1,18	2,85
131,10	29,99	38,32	67,31	90,78	1,18	2,85
133,95	30,91	39,50	69,39	93,62	1,18	2,83
136,80	31,82	40,68	71,46	96,45	1,17	2,82
139,65	32,73	41,85	73,52	99,26	1,17	2,81
142,50	33,63	43,01	75,58	102,07	1,16	2,80

Quadro VI.24 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos interligados

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,07	0,08	0,13	0,14	0,08	0,14
5,70	0,16	0,16	0,30	0,31	0,09	0,18
8,55	0,25	0,26	0,48	0,50	0,09	0,19
11,40	0,35	0,36	0,68	0,71	0,10	0,21
14,25	0,45	0,47	0,89	0,93	0,11	0,22
17,10	0,54	0,57	1,10	1,14	0,10	0,22
19,95	0,59	0,62	1,22	1,27	0,05	0,13
22,80	0,64	0,67	1,35	1,41	0,05	0,13
25,65	0,74	0,77	1,56	1,63	0,10	0,22
28,50	0,85	0,88	1,80	1,87	0,12	0,25
31,35	0,97	1,00	2,04	2,12	0,12	0,25
34,20	1,08	1,13	2,28	2,38	0,12	0,26
37,05	1,21	1,25	2,54	2,65	0,13	0,27
39,90	1,32	1,37	2,78	2,90	0,11	0,25
42,75	1,37	1,42	2,93	3,05	0,06	0,15
45,60	1,43	1,48	3,08	3,21	0,06	0,16
48,45	1,53	1,59	3,31	3,46	0,11	0,25
51,30	1,66	1,72	3,57	3,72	0,13	0,27
54,15	1,78	1,85	3,83	3,99	0,13	0,27
57,00	1,90	1,98	4,08	4,26	0,13	0,27
59,85	2,02	2,10	4,33	4,52	0,12	0,26
62,70	2,12	2,20	4,56	4,75	0,10	0,23
65,55	2,17	2,25	4,70	4,90	0,05	0,14
68,40	2,22	2,30	4,83	5,04	0,05	0,14
71,25	2,31	2,40	5,05	5,27	0,10	0,23
74,10	2,42	2,51	5,28	5,50	0,11	0,24
76,95	2,52	2,62	5,49	5,72	0,11	0,22
79,80	2,62	2,72	5,69	5,94	0,10	0,21
82,65	2,71	2,81	5,89	6,14	0,09	0,20
85,50	2,79	2,90	6,07	6,32	0,09	0,19

Quadro VI.25 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos interligados

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,06	0,06	0,10	0,11	0,06	0,11
5,70	0,13	0,14	0,26	0,27	0,08	0,17
8,55	0,22	0,23	0,44	0,46	0,09	0,18
11,40	0,32	0,33	0,66	0,69	0,11	0,23
14,25	0,43	0,45	0,89	0,93	0,11	0,24
17,10	0,55	0,58	1,15	1,21	0,13	0,28
19,95	0,68	0,71	1,42	1,50	0,13	0,29
22,80	0,82	0,85	1,72	1,81	0,14	0,31
25,65	0,96	1,00	2,01	2,12	0,15	0,32
28,50	1,10	1,15	2,32	2,45	0,15	0,33
31,35	1,23	1,29	2,62	2,77	0,14	0,32
34,20	1,36	1,43	2,91	3,08	0,13	0,31
37,05	1,43	1,50	3,10	3,27	0,07	0,20
39,90	1,50	1,57	3,30	3,48	0,07	0,21
42,75	1,63	1,71	3,61	3,82	0,15	0,34
45,60	1,80	1,89	3,97	4,21	0,17	0,39
48,45	1,97	2,06	4,34	4,60	0,18	0,39
51,30	2,14	2,25	4,73	5,02	0,19	0,42
54,15	2,32	2,44	5,13	5,44	0,19	0,42
57,00	2,50	2,63	5,53	5,87	0,19	0,43
59,85	2,69	2,83	5,94	6,32	0,20	0,44
62,70	2,87	3,03	6,36	6,76	0,20	0,44
65,55	3,06	3,22	6,77	7,19	0,19	0,44
68,40	3,22	3,39	7,15	7,60	0,17	0,41
71,25	3,31	3,48	7,41	7,88	0,09	0,28
74,10	3,39	3,57	7,68	8,17	0,09	0,29
76,95	3,56	3,75	8,06	8,58	0,17	0,41
79,80	3,74	3,94	8,49	9,03	0,20	0,45
82,65	3,93	4,14	8,91	9,49	0,20	0,46
85,50	4,13	4,35	9,35	9,96	0,21	0,47
88,35	4,33	4,56	9,81	10,45	0,21	0,49
91,20	4,53	4,78	10,27	10,95	0,22	0,50
94,05	4,73	4,99	10,73	11,44	0,21	0,49
96,90	4,93	5,20	11,18	11,92	0,21	0,48
99,75	5,12	5,40	11,63	12,40	0,20	0,48
102,60	5,29	5,58	12,04	12,84	0,18	0,44
105,45	5,39	5,68	12,34	13,16	0,10	0,32
108,30	5,49	5,78	12,64	13,47	0,10	0,32
111,15	5,65	5,96	13,04	13,91	0,18	0,43
114,00	5,84	6,16	13,48	14,38	0,20	0,47

116,85	6,05	6,38	13,97	14,90	0,22	0,52
119,70	6,27	6,61	14,47	15,43	0,23	0,53
122,55	6,49	6,84	14,96	15,96	0,23	0,53
125,40	6,70	7,07	15,45	16,49	0,23	0,53
128,25	6,91	7,29	15,94	17,01	0,22	0,52
131,10	7,12	7,51	16,42	17,53	0,22	0,51
133,95	7,32	7,73	16,89	18,03	0,21	0,50
136,80	7,52	7,94	17,35	18,52	0,21	0,49
139,65	7,71	8,14	17,80	19,01	0,20	0,48
142,50	7,90	8,34	18,24	19,48	0,20	0,47

6.5. TABELAS REFERENTES À ANÁLISE QUANTO AO POSICIONAMENTO DOS CONTRAVENTAMENTOS EM RELAÇÃO AO CENTRO DE ROTAÇÃO DA EDIFICAÇÃO

Quadro VI.26 - Deslocamentos laterais para a estrutura com todos os contraventamentos nas fachadas

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,06	0,06	0,10	0,11	0,06	0,11
5,70	0,13	0,14	0,26	0,27	0,08	0,17
8,55	0,22	0,23	0,44	0,46	0,09	0,18
11,40	0,32	0,33	0,66	0,69	0,11	0,23
14,25	0,43	0,45	0,89	0,93	0,11	0,24
17,10	0,55	0,58	1,15	1,21	0,13	0,28
19,95	0,68	0,71	1,42	1,50	0,13	0,29
22,80	0,82	0,85	1,72	1,81	0,14	0,31
25,65	0,96	1,00	2,01	2,12	0,15	0,32
28,50	1,10	1,15	2,32	2,45	0,15	0,33
31,35	1,23	1,29	2,62	2,77	0,14	0,32
34,20	1,36	1,43	2,91	3,08	0,13	0,31
37,05	1,43	1,50	3,10	3,27	0,07	0,20
39,90	1,50	1,57	3,30	3,48	0,07	0,21
42,75	1,63	1,71	3,61	3,82	0,15	0,34
45,60	1,80	1,89	3,97	4,21	0,17	0,39
48,45	1,97	2,06	4,34	4,60	0,18	0,39
51,30	2,14	2,25	4,73	5,02	0,19	0,42
54,15	2,32	2,44	5,13	5,44	0,19	0,42

57,00	2,50	2,63	5,53	5,87	0,19	0,43
59,85	2,69	2,83	5,94	6,32	0,20	0,44
62,70	2,87	3,03	6,36	6,76	0,20	0,44
65,55	3,06	3,22	6,77	7,19	0,19	0,44
68,40	3,22	3,39	7,15	7,60	0,17	0,41
71,25	3,31	3,48	7,41	7,88	0,09	0,28
74,10	3,39	3,57	7,68	8,17	0,09	0,29
76,95	3,56	3,75	8,06	8,58	0,17	0,41
79,80	3,74	3,94	8,49	9,03	0,20	0,45
82,65	3,93	4,14	8,91	9,49	0,20	0,46
85,50	4,13	4,35	9,35	9,96	0,21	0,47
88,35	4,33	4,56	9,81	10,45	0,21	0,49
91,20	4,53	4,78	10,27	10,95	0,22	0,50
94,05	4,73	4,99	10,73	11,44	0,21	0,49
96,90	4,93	5,20	11,18	11,92	0,21	0,48
99,75	5,12	5,40	11,63	12,40	0,20	0,48
102,60	5,29	5,58	12,04	12,84	0,18	0,44
105,45	5,39	5,68	12,34	13,16	0,10	0,32
108,30	5,49	5,78	12,64	13,47	0,10	0,32
111,15	5,65	5,96	13,04	13,91	0,18	0,43
114,00	5,84	6,16	13,48	14,38	0,20	0,47
116,85	6,05	6,38	13,97	14,90	0,22	0,52
119,70	6,27	6,61	14,47	15,43	0,23	0,53
122,55	6,49	6,84	14,96	15,96	0,23	0,53
125,40	6,70	7,07	15,45	16,49	0,23	0,53
128,25	6,91	7,29	15,94	17,01	0,22	0,52
131,10	7,12	7,51	16,42	17,53	0,22	0,51
133,95	7,32	7,73	16,89	18,03	0,21	0,50
136,80	7,52	7,94	17,35	18,52	0,21	0,49
139,65	7,71	8,14	17,80	19,01	0,20	0,48
142,50	7,90	8,34	18,24	19,48	0,20	0,47

Quadro VI.27 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos e com contraventamentos na fachada na direção "X" e internos na direção "Y"

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,07	0,08	0,14	0,15	0,08	0,15
5,70	0,17	0,18	0,34	0,37	0,10	0,22
8,55	0,28	0,30	0,57	0,61	0,12	0,24
11,40	0,41	0,44	0,84	0,90	0,14	0,30
14,25	0,55	0,59	1,13	1,22	0,15	0,31

17,10	0,71	0,76	1,46	1,57	0,17	0,35
19,95	0,88	0,94	1,80	1,94	0,18	0,37
22,80	1,05	1,13	2,16	2,33	0,19	0,39
25,65	1,24	1,33	2,52	2,73	0,20	0,40
28,50	1,42	1,53	2,89	3,13	0,20	0,40
31,35	1,59	1,71	3,23	3,50	0,19	0,37
34,20	1,76	1,89	3,55	3,85	0,18	0,35
37,05	1,86	1,99	3,75	4,06	0,10	0,21
39,90	1,96	2,11	3,96	4,29	0,11	0,23
42,75	2,14	2,31	4,31	4,67	0,20	0,38
45,60	2,36	2,54	4,72	5,11	0,23	0,44
48,45	2,58	2,78	5,13	5,56	0,24	0,45
51,30	2,81	3,03	5,56	6,03	0,25	0,48
54,15	3,05	3,29	6,01	6,51	0,26	0,48
57,00	3,29	3,55	6,46	7,01	0,26	0,49
59,85	3,54	3,82	6,92	7,51	0,27	0,50
62,70	3,78	4,08	7,37	8,00	0,27	0,49
65,55	4,03	4,35	7,82	8,49	0,26	0,49
68,40	4,25	4,59	8,24	8,94	0,24	0,45
71,25	4,39	4,74	8,51	9,23	0,15	0,30
74,10	4,53	4,89	8,79	9,54	0,15	0,30
76,95	4,76	5,14	9,21	9,98	0,25	0,45
79,80	5,02	5,42	9,67	10,48	0,28	0,50
82,65	5,28	5,70	10,14	10,99	0,28	0,50
85,50	5,54	5,99	10,62	11,51	0,29	0,52
88,35	5,82	6,28	11,13	12,06	0,30	0,55
91,20	6,10	6,58	11,64	12,61	0,30	0,55
94,05	6,37	6,88	12,13	13,15	0,30	0,54
96,90	6,64	7,17	12,62	13,67	0,29	0,52
99,75	6,91	7,46	13,09	14,18	0,29	0,51
102,60	7,15	7,72	13,53	14,65	0,26	0,47
105,45	7,31	7,89	13,83	14,97	0,17	0,33
108,30	7,46	8,05	14,14	15,30	0,17	0,33
111,15	7,70	8,31	14,57	15,76	0,26	0,46
114,00	7,96	8,60	15,04	16,26	0,29	0,50
116,85	8,24	8,90	15,53	16,80	0,30	0,53
119,70	8,53	9,21	16,05	17,35	0,31	0,55
122,55	8,82	9,52	16,56	17,90	0,31	0,55
125,40	9,10	9,83	17,08	18,46	0,31	0,56
128,25	9,39	10,13	17,59	19,01	0,31	0,55
131,10	9,67	10,44	18,11	19,56	0,31	0,55
133,95	9,96	10,74	18,61	20,10	0,30	0,54
136,80	10,23	11,04	19,11	20,63	0,30	0,54
139,65	10,51	11,34	19,60	21,16	0,30	0,53
142,50	10,78	11,63	20,09	21,68	0,29	0,52

Quadro VI.28 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos posicionados internamente

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,05	0,06	0,11	0,14	0,06	0,14
5,70	0,12	0,14	0,30	0,36	0,08	0,23
8,55	0,21	0,24	0,51	0,63	0,10	0,26
11,40	0,31	0,36	0,78	0,97	0,12	0,34
14,25	0,42	0,49	1,08	1,34	0,13	0,37
17,10	0,55	0,64	1,43	1,77	0,15	0,43
19,95	0,68	0,80	1,79	2,23	0,16	0,46
22,80	0,83	0,97	2,19	2,73	0,17	0,51
25,65	0,98	1,15	2,61	3,26	0,18	0,52
28,50	1,14	1,33	3,05	3,81	0,19	0,56
31,35	1,29	1,51	3,49	4,37	0,18	0,55
34,20	1,44	1,69	3,94	4,93	0,18	0,56
37,05	1,53	1,80	4,29	5,36	0,11	0,43
39,90	1,64	1,93	4,67	5,84	0,12	0,48
42,75	1,80	2,13	5,18	6,48	0,20	0,64
45,60	2,00	2,36	5,76	7,22	0,23	0,74
48,45	2,20	2,60	6,36	7,97	0,24	0,75
51,30	2,41	2,85	6,99	8,77	0,25	0,80
54,15	2,62	3,11	7,64	9,58	0,26	0,81
57,00	2,84	3,37	8,31	10,43	0,26	0,84
59,85	3,07	3,64	8,99	11,29	0,27	0,86
62,70	3,30	3,91	9,69	12,17	0,27	0,88
65,55	3,52	4,18	10,39	13,05	0,27	0,88
68,40	3,73	4,43	11,07	13,90	0,25	0,85
71,25	3,87	4,59	11,62	14,57	0,17	0,67
74,10	4,01	4,76	12,18	15,26	0,17	0,69
76,95	4,23	5,02	12,89	16,15	0,26	0,89
79,80	4,48	5,31	13,67	17,11	0,29	0,97
82,65	4,72	5,60	14,45	18,09	0,29	0,97
85,50	4,98	5,91	15,26	19,09	0,30	1,01
88,35	5,28	6,26	16,09	20,12	0,35	1,03
91,20	5,59	6,61	16,93	21,16	0,36	1,04
94,05	5,86	6,93	17,77	22,20	0,32	1,04
96,90	6,11	7,23	18,60	23,22	0,30	1,02
99,75	6,37	7,53	19,42	24,23	0,30	1,01
102,60	6,60	7,80	20,21	25,19	0,27	0,96
105,45	6,75	7,98	20,85	25,96	0,18	0,77
108,30	6,91	8,17	21,49	26,74	0,19	0,78
111,15	7,14	8,44	22,28	27,69	0,27	0,96
114,00	7,40	8,73	23,12	28,71	0,30	1,02

116,85	7,67	9,06	24,02	29,80	0,32	1,09
119,70	7,96	9,39	24,94	30,92	0,33	1,12
122,55	8,25	9,72	25,86	32,03	0,33	1,11
125,40	8,54	10,06	26,79	33,15	0,33	1,11
128,25	8,82	10,39	27,70	34,25	0,33	1,11
131,10	9,11	10,71	28,61	35,35	0,33	1,10
133,95	9,38	11,03	29,51	36,44	0,32	1,09
136,80	9,66	11,35	30,40	37,52	0,32	1,08
139,65	9,93	11,66	31,28	38,59	0,31	1,07
142,50	10,19	11,97	32,15	39,64	0,31	1,05

6.6. TABELAS REFERENTES À ANÁLISE QUANTO A ESBELTEZ DOS CONTRAVENTAMENTOS

Quadro VI.29 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos com um vão de largura

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,12	0,16	0,19	0,26	0,16	0,26
5,70	0,34	0,50	0,70	1,15	0,34	0,89
8,55	0,62	0,94	1,33	2,31	0,45	1,16
11,40	1,01	1,58	2,25	4,07	0,64	1,76
14,25	1,46	2,32	3,29	6,09	0,74	2,02
17,10	2,02	3,24	4,60	8,68	0,92	2,59
19,95	2,63	4,27	6,01	11,51	1,02	2,83
22,80	3,33	5,46	7,68	14,88	1,19	3,37
25,65	4,09	6,74	9,45	18,48	1,29	3,60
28,50	4,93	8,18	11,45	22,58	1,44	4,11
31,35	5,82	9,71	13,55	26,90	1,53	4,32
34,20	6,79	11,39	15,85	31,69	1,67	4,79
37,05	7,80	13,14	18,24	36,68	1,76	4,99
39,90	8,88	15,03	20,82	42,10	1,89	5,42
42,75	10,01	16,99	23,48	47,70	1,96	5,60
45,60	11,19	19,08	26,31	53,70	2,08	6,00
48,45	12,42	21,23	29,22	59,86	2,15	6,16
51,30	13,70	23,49	32,28	66,38	2,26	6,52
54,15	15,02	25,81	35,40	73,05	2,32	6,67
57,00	16,39	28,23	38,66	80,05	2,42	7,00

59,85	17,79	30,72	41,99	87,21	2,49	7,16
62,70	19,24	33,29	45,45	94,66	2,57	7,45
65,55	20,72	35,91	48,96	102,23	2,62	7,57
68,40	22,23	38,61	52,57	110,04	2,70	7,81
71,25	23,77	41,35	56,23	117,96	2,74	7,92
74,10	25,34	44,15	59,97	126,09	2,80	8,13
76,95	26,93	46,99	63,75	134,31	2,84	8,22
79,80	28,55	49,88	67,61	142,71	2,89	8,40
82,65	30,18	52,80	71,51	151,18	2,92	8,47
85,50	31,84	55,77	75,46	159,81	2,97	8,63
88,35	33,52	58,78	79,46	168,54	3,01	8,73
91,20	35,23	61,84	83,54	177,45	3,06	8,91
94,05	36,95	64,94	87,65	186,43	3,09	8,98
96,90	38,70	68,07	91,81	195,55	3,13	9,12
99,75	40,46	71,22	96,00	204,72	3,15	9,17
102,60	42,23	74,41	100,23	213,99	3,19	9,28
105,45	44,01	77,61	104,48	223,31	3,20	9,31
108,30	45,80	80,83	108,76	232,70	3,22	9,39
111,15	47,60	84,06	113,05	242,12	3,23	9,42
114,00	49,41	87,32	117,37	251,60	3,25	9,48
116,85	51,23	90,60	121,73	261,17	3,29	9,57
119,70	53,07	93,91	126,13	270,83	3,31	9,66
122,55	54,91	97,23	130,52	280,50	3,32	9,67
125,40	56,76	100,56	134,93	290,20	3,33	9,70
128,25	58,60	103,88	139,34	299,90	3,32	9,70
131,10	60,45	107,20	143,75	309,60	3,32	9,70
133,95	62,29	110,52	148,15	319,28	3,32	9,68
136,80	64,12	113,83	152,54	328,95	3,31	9,67
139,65	65,95	117,13	156,93	338,60	3,30	9,65
142,50	67,78	120,42	161,30	348,23	3,29	9,63

Quadro VI.30 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos com dois vãos de largura

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,19	0,21	0,32	0,35	0,21	0,35
5,70	0,37	0,42	0,63	0,70	0,21	0,35
8,55	0,56	0,64	0,94	1,04	0,22	0,34
11,40	0,78	0,89	1,30	1,44	0,25	0,40
14,25	1,06	1,21	1,75	1,96	0,32	0,52
17,10	1,37	1,58	2,24	2,53	0,36	0,57

19,95	1,69	1,95	2,72	3,09	0,37	0,56
22,80	2,03	2,35	3,24	3,69	0,40	0,60
25,65	2,42	2,81	3,84	4,40	0,46	0,70
28,50	2,83	3,30	4,47	5,13	0,49	0,74
31,35	3,24	3,79	5,06	5,84	0,49	0,70
34,20	3,68	4,31	5,69	6,58	0,52	0,74
37,05	4,18	4,92	6,42	7,45	0,61	0,87
39,90	4,72	5,56	7,19	8,38	0,65	0,93
42,75	5,26	6,21	7,95	9,28	0,65	0,90
45,60	5,82	6,89	8,73	10,22	0,68	0,94
48,45	6,44	7,64	9,59	11,27	0,75	1,04
51,30	7,09	8,42	10,49	12,35	0,78	1,08
54,15	7,74	9,20	11,37	13,41	0,78	1,06
57,00	8,41	10,02	12,28	14,51	0,82	1,10
59,85	9,15	10,92	13,29	15,74	0,90	1,23
62,70	9,93	11,87	14,34	17,02	0,95	1,28
65,55	10,71	12,81	15,37	18,28	0,94	1,26
68,40	11,50	13,78	16,42	19,57	0,97	1,28
71,25	12,36	14,82	17,54	20,94	1,04	1,37
74,10	13,24	15,89	18,68	22,34	1,07	1,40
76,95	14,12	16,96	19,81	23,72	1,07	1,38
79,80	15,01	18,05	20,94	25,12	1,09	1,39
82,65	15,95	19,19	22,12	26,57	1,14	1,45
85,50	16,91	20,36	23,32	28,05	1,17	1,48
88,35	17,88	21,54	24,53	29,54	1,18	1,49
91,20	18,87	22,74	25,76	31,05	1,21	1,51
94,05	19,90	24,00	27,02	32,61	1,26	1,56
96,90	20,95	25,28	28,28	34,18	1,28	1,57
99,75	21,99	26,55	29,54	35,73	1,27	1,55
102,60	23,05	27,83	30,79	37,28	1,28	1,55
105,45	24,13	29,15	32,05	38,85	1,32	1,57
108,30	25,23	30,47	33,31	40,42	1,33	1,57
111,15	26,32	31,79	34,56	41,97	1,32	1,55
114,00	27,42	33,13	35,81	43,53	1,33	1,56
116,85	28,55	34,50	37,10	45,14	1,37	1,61
119,70	29,69	35,88	38,39	46,75	1,38	1,61
122,55	30,82	37,26	39,68	48,35	1,38	1,60
125,40	31,96	38,63	40,93	49,91	1,37	1,57
128,25	33,09	40,00	42,17	51,47	1,37	1,55
131,10	34,22	41,37	43,40	52,99	1,36	1,53
133,95	35,34	42,72	44,61	54,51	1,36	1,52
136,80	36,46	44,07	45,79	56,00	1,34	1,49
139,65	37,57	45,40	46,97	57,47	1,34	1,47
142,50	38,68	46,73	48,11	58,91	1,33	1,44

Quadro VI.31 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos com três vãos de largura

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,08	0,09	0,19	0,19	0,09	0,19
5,70	0,17	0,17	0,41	0,43	0,09	0,24
8,55	0,26	0,27	0,65	0,68	0,09	0,25
11,40	0,36	0,37	0,87	0,91	0,10	0,23
14,25	0,46	0,48	1,06	1,11	0,11	0,20
17,10	0,57	0,59	1,24	1,30	0,11	0,19
19,95	0,68	0,71	1,46	1,53	0,11	0,22
22,80	0,78	0,82	1,74	1,83	0,11	0,30
25,65	0,88	0,92	2,06	2,17	0,11	0,35
28,50	0,99	1,04	2,37	2,51	0,11	0,34
31,35	1,11	1,17	2,63	2,79	0,13	0,28
34,20	1,25	1,31	2,87	3,04	0,14	0,25
37,05	1,38	1,45	3,14	3,33	0,14	0,28
39,90	1,50	1,58	3,50	3,71	0,13	0,38
42,75	1,62	1,70	3,90	4,15	0,12	0,44
45,60	1,74	1,83	4,29	4,58	0,13	0,43
48,45	1,87	1,97	4,61	4,92	0,14	0,35
51,30	2,00	2,11	4,88	5,21	0,14	0,29
54,15	2,13	2,25	5,18	5,52	0,14	0,31
57,00	2,26	2,39	5,57	5,94	0,14	0,42
59,85	2,38	2,52	6,02	6,44	0,13	0,50
62,70	2,51	2,65	6,45	6,93	0,13	0,49
65,55	2,64	2,79	6,82	7,32	0,14	0,40
68,40	2,77	2,94	7,13	7,65	0,15	0,33
71,25	2,91	3,08	7,46	8,00	0,14	0,35
74,10	3,03	3,22	7,88	8,46	0,13	0,45
76,95	3,15	3,34	8,35	8,98	0,12	0,52
79,80	3,26	3,46	8,81	9,49	0,12	0,51
82,65	3,37	3,58	9,19	9,90	0,13	0,42
85,50	3,49	3,71	9,52	10,25	0,13	0,35
88,35	3,62	3,85	9,89	10,65	0,14	0,40
91,20	3,75	3,99	10,35	11,15	0,14	0,50
94,05	3,87	4,12	10,85	11,71	0,13	0,56
96,90	3,99	4,24	11,35	12,26	0,12	0,55
99,75	4,10	4,36	11,77	12,72	0,12	0,46
102,60	4,20	4,48	12,13	13,10	0,11	0,38
105,45	4,30	4,59	12,49	13,49	0,11	0,39
108,30	4,40	4,70	12,91	13,95	0,11	0,46
111,15	4,49	4,79	13,38	14,46	0,10	0,51
114,00	4,58	4,89	13,84	14,98	0,10	0,51

116,85	4,67	4,99	14,26	15,43	0,10	0,46
119,70	4,75	5,08	14,62	15,83	0,09	0,40
122,55	4,83	5,17	14,99	16,22	0,09	0,39
125,40	4,90	5,25	15,40	16,67	0,08	0,44
128,25	4,97	5,32	15,82	17,13	0,07	0,46
131,10	5,03	5,39	16,23	17,58	0,07	0,45
133,95	5,08	5,45	16,58	17,97	0,06	0,39
136,80	5,12	5,49	16,88	18,30	0,05	0,33
139,65	5,16	5,54	17,19	18,63	0,05	0,33
142,50	5,21	5,60	17,53	19,00	0,06	0,37

6.7. TABELAS REFERENTES À ANÁLISE QUANTO AO TAMANHO DOS MÓDULOS DOS CONTRAVENTAMENTOS

Quadro VI.32 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos com pequenos módulos

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,04	0,04	0,09	0,09	0,04	0,09
5,70	0,07	0,07	0,19	0,19	0,03	0,10
8,55	0,11	0,11	0,29	0,29	0,04	0,10
11,40	0,15	0,15	0,40	0,41	0,04	0,11
14,25	0,19	0,20	0,51	0,52	0,04	0,12
17,10	0,24	0,24	0,63	0,65	0,04	0,12
19,95	0,28	0,28	0,75	0,77	0,04	0,12
22,80	0,32	0,33	0,88	0,91	0,05	0,13
25,65	0,37	0,37	1,01	1,04	0,05	0,13
28,50	0,41	0,42	1,15	1,18	0,05	0,14
31,35	0,46	0,47	1,28	1,32	0,05	0,14
34,20	0,50	0,51	1,42	1,46	0,05	0,14
37,05	0,55	0,56	1,57	1,61	0,05	0,15
39,90	0,60	0,61	1,72	1,77	0,05	0,16
42,75	0,65	0,66	1,87	1,92	0,05	0,15
45,60	0,70	0,71	2,02	2,07	0,05	0,15
48,45	0,75	0,76	2,17	2,23	0,05	0,15
51,30	0,80	0,81	2,31	2,38	0,05	0,15
54,15	0,84	0,86	2,47	2,53	0,05	0,16
57,00	0,89	0,91	2,62	2,69	0,05	0,15

59,85	0,94	0,95	2,76	2,84	0,05	0,15
62,70	0,98	1,00	2,91	2,98	0,05	0,15
65,55	1,03	1,04	3,04	3,12	0,04	0,14
68,40	1,07	1,08	3,18	3,26	0,04	0,14
71,25	1,11	1,13	3,31	3,40	0,04	0,14
74,10	1,15	1,17	3,44	3,53	0,04	0,13
76,95	1,18	1,20	3,56	3,65	0,04	0,12
79,80	1,22	1,24	3,67	3,77	0,03	0,11
82,65	1,25	1,27	3,77	3,88	0,03	0,11
85,50	1,27	1,29	3,87	3,97	0,03	0,10

Quadro VI.33 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com pequenos módulos

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,03	0,03	0,06	0,07	0,03	0,06
5,70	0,06	0,06	0,14	0,17	0,03	0,08
8,55	0,10	0,10	0,23	0,26	0,04	0,09
11,40	0,14	0,14	0,34	0,38	0,04	0,11
14,25	0,18	0,18	0,45	0,50	0,04	0,11
17,10	0,22	0,23	0,57	0,63	0,05	0,13
19,95	0,27	0,27	0,70	0,77	0,05	0,13
22,80	0,32	0,32	0,85	0,92	0,05	0,14
25,65	0,37	0,37	0,99	1,07	0,05	0,15
28,50	0,42	0,43	1,16	1,24	0,05	0,16
31,35	0,48	0,49	1,33	1,42	0,06	0,17
34,20	0,54	0,55	1,52	1,62	0,06	0,19
37,05	0,61	0,62	1,72	1,82	0,07	0,20
39,90	0,67	0,69	1,93	2,04	0,07	0,21
42,75	0,74	0,76	2,14	2,25	0,07	0,21
45,60	0,81	0,83	2,37	2,48	0,07	0,22
48,45	0,88	0,90	2,59	2,71	0,07	0,23
51,30	0,96	0,98	2,83	2,95	0,08	0,24
54,15	1,03	1,05	3,07	3,19	0,08	0,24
57,00	1,11	1,13	3,32	3,45	0,08	0,25
59,85	1,19	1,22	3,58	3,71	0,08	0,26
62,70	1,28	1,31	3,86	3,99	0,09	0,28
65,55	1,36	1,39	4,14	4,27	0,09	0,28
68,40	1,45	1,48	4,42	4,56	0,09	0,29

71,25	1,54	1,57	4,71	4,84	0,09	0,29
74,10	1,62	1,66	5,00	5,13	0,09	0,29
76,95	1,71	1,75	5,29	5,42	0,09	0,29
79,80	1,80	1,84	5,59	5,72	0,09	0,30
82,65	1,89	1,94	5,89	6,02	0,09	0,30
85,50	1,98	2,03	6,19	6,32	0,09	0,30
88,35	2,07	2,12	6,50	6,63	0,10	0,31
91,20	2,17	2,22	6,82	6,94	0,10	0,32
94,05	2,26	2,32	7,13	7,26	0,10	0,32
96,90	2,36	2,42	7,45	7,57	0,10	0,32
99,75	2,45	2,51	7,77	7,88	0,10	0,32
102,60	2,55	2,61	8,08	8,20	0,10	0,32
105,45	2,64	2,70	8,40	8,51	0,09	0,31
108,30	2,73	2,80	8,71	8,81	0,09	0,31
111,15	2,82	2,89	9,02	9,12	0,09	0,31
114,00	2,91	2,98	9,33	9,42	0,09	0,31
116,85	3,00	3,08	9,65	9,74	0,10	0,32
119,70	3,09	3,17	9,97	10,05	0,10	0,32
122,55	3,18	3,26	10,28	10,36	0,09	0,31
125,40	3,27	3,35	10,59	10,66	0,09	0,31
128,25	3,36	3,44	10,89	10,95	0,09	0,30
131,10	3,44	3,53	11,19	11,24	0,09	0,30
133,95	3,52	3,61	11,48	11,52	0,08	0,29
136,80	3,60	3,69	11,76	11,79	0,08	0,28
139,65	3,67	3,77	12,04	12,06	0,08	0,28
142,50	3,75	3,84	12,31	12,32	0,07	0,27

Quadro VI.34 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos e contraventamentos com grandes módulos

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,11	0,11	0,20	0,21	0,11	0,21
5,70	0,22	0,23	0,40	0,42	0,12	0,21
8,55	0,32	0,34	0,61	0,64	0,11	0,22
11,40	0,43	0,45	0,83	0,87	0,11	0,23
14,25	0,54	0,57	1,09	1,15	0,11	0,27
17,10	0,66	0,69	1,37	1,44	0,12	0,29
19,95	0,78	0,82	1,64	1,73	0,13	0,29
22,80	0,91	0,95	1,88	1,98	0,14	0,25
25,65	1,04	1,09	2,09	2,20	0,13	0,22
28,50	1,15	1,21	2,32	2,43	0,12	0,23

31,35	1,26	1,32	2,60	2,73	0,11	0,29
34,20	1,35	1,42	2,90	3,05	0,10	0,32
37,05	1,45	1,52	3,20	3,37	0,10	0,32
39,90	1,56	1,63	3,46	3,65	0,11	0,28
42,75	1,68	1,75	3,68	3,87	0,13	0,22
45,60	1,80	1,88	3,89	4,09	0,13	0,22
48,45	1,93	2,01	4,16	4,37	0,13	0,28
51,30	2,04	2,13	4,45	4,68	0,11	0,31
54,15	2,13	2,23	4,75	5,00	0,10	0,32
57,00	2,21	2,31	5,01	5,27	0,08	0,27
59,85	2,29	2,39	5,21	5,48	0,08	0,21
62,70	2,37	2,47	5,41	5,68	0,08	0,20
65,55	2,46	2,57	5,64	5,92	0,10	0,24
68,40	2,56	2,67	5,88	6,17	0,10	0,25
71,25	2,66	2,77	6,13	6,44	0,10	0,26
74,10	2,74	2,85	6,34	6,66	0,08	0,22
76,95	2,80	2,91	6,49	6,82	0,06	0,16
79,80	2,84	2,95	6,64	6,96	0,04	0,15
82,65	2,87	2,98	6,80	7,14	0,03	0,17
85,50	2,89	3,00	6,95	7,29	0,02	0,16

Quadro VI.35 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos e contraventamentos com grandes módulos

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,13	0,13	0,23	0,25	0,13	0,25
5,70	0,25	0,26	0,48	0,50	0,13	0,26
8,55	0,38	0,40	0,74	0,78	0,14	0,27
11,40	0,52	0,54	1,03	1,08	0,14	0,30
14,25	0,65	0,69	1,36	1,44	0,14	0,36
17,10	0,80	0,84	1,72	1,82	0,15	0,38
19,95	0,96	1,01	2,06	2,20	0,17	0,37
22,80	1,12	1,19	2,39	2,54	0,17	0,35
25,65	1,29	1,36	2,69	2,87	0,17	0,32
28,50	1,44	1,52	3,02	3,21	0,16	0,35
31,35	1,58	1,67	3,42	3,64	0,15	0,43
34,20	1,72	1,82	3,85	4,11	0,14	0,47
37,05	1,86	1,96	4,27	4,57	0,15	0,46
39,90	2,02	2,12	4,66	4,98	0,16	0,41
42,75	2,19	2,31	5,00	5,35	0,19	0,36
45,60	2,37	2,51	5,36	5,73	0,20	0,38
48,45	2,55	2,70	5,80	6,21	0,19	0,48

51,30	2,72	2,87	6,28	6,72	0,18	0,52
54,15	2,87	3,03	6,74	7,23	0,15	0,50
57,00	3,01	3,18	7,17	7,70	0,15	0,47
59,85	3,16	3,34	7,58	8,12	0,16	0,43
62,70	3,33	3,51	8,00	8,57	0,18	0,45
65,55	3,53	3,72	8,49	9,11	0,21	0,54
68,40	3,73	3,94	9,02	9,69	0,22	0,58
71,25	3,93	4,15	9,54	10,25	0,21	0,56
74,10	4,11	4,35	10,00	10,75	0,19	0,51
76,95	4,27	4,51	10,42	11,20	0,17	0,44
79,80	4,42	4,66	10,84	11,65	0,15	0,45
82,65	4,56	4,81	11,33	12,18	0,15	0,53
85,50	4,72	4,98	11,86	12,75	0,17	0,57
88,35	4,92	5,18	12,40	13,32	0,21	0,57
91,20	5,13	5,41	12,91	13,89	0,22	0,57
94,05	5,33	5,63	13,35	14,36	0,22	0,47
96,90	5,52	5,82	13,80	14,84	0,20	0,47
99,75	5,67	5,99	14,30	15,38	0,17	0,54
102,60	5,81	6,13	14,82	15,94	0,14	0,56
105,45	5,95	6,27	15,33	16,50	0,14	0,56
108,30	6,10	6,42	15,79	16,99	0,15	0,50
111,15	6,26	6,60	16,19	17,42	0,17	0,43
114,00	6,44	6,79	16,60	17,86	0,19	0,43
116,85	6,63	6,99	17,09	18,38	0,20	0,52
119,70	6,80	7,17	17,59	18,93	0,18	0,55
122,55	6,95	7,33	18,09	19,47	0,16	0,54
125,40	7,08	7,46	18,53	19,94	0,13	0,48
128,25	7,20	7,58	18,92	20,36	0,13	0,42
131,10	7,32	7,71	19,30	20,76	0,12	0,40
133,95	7,45	7,84	19,69	21,18	0,13	0,42
136,80	7,57	7,98	20,06	21,58	0,13	0,41
139,65	7,69	8,10	20,42	21,98	0,13	0,39
142,50	7,81	8,22	20,76	22,34	0,12	0,36

6.8. TABELAS REFERENTES À ANÁLISE QUANTO A DIMINUIÇÃO DOS CONTRAVENTAMENTOS AO LONGO DA ALTURA DA EDIFICAÇÃO

Quadro VI.36 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos com dois contraventamentos juntos

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,06	0,07	0,11	0,12	0,07	0,12
5,70	0,15	0,16	0,26	0,27	0,09	0,15
8,55	0,24	0,25	0,41	0,43	0,10	0,16
11,40	0,36	0,37	0,60	0,62	0,12	0,19
14,25	0,48	0,50	0,79	0,83	0,13	0,20
17,10	0,61	0,65	1,00	1,05	0,15	0,22
19,95	0,76	0,80	1,21	1,28	0,15	0,23
22,80	0,91	0,97	1,45	1,53	0,17	0,25
25,65	1,08	1,14	1,68	1,78	0,17	0,25
28,50	1,25	1,33	1,93	2,05	0,19	0,27
31,35	1,43	1,52	2,18	2,32	0,19	0,27
34,20	1,61	1,72	2,44	2,60	0,20	0,28
37,05	1,80	1,92	2,70	2,88	0,20	0,28
39,90	2,00	2,13	2,96	3,16	0,21	0,29
42,75	2,20	2,34	3,23	3,45	0,21	0,28
45,60	2,40	2,56	3,49	3,73	0,22	0,29
48,45	2,61	2,78	3,75	4,02	0,22	0,28
51,30	2,81	3,00	4,01	4,30	0,22	0,28
54,15	3,02	3,22	4,27	4,58	0,22	0,28
57,00	3,23	3,45	4,52	4,85	0,22	0,27
59,85	3,44	3,67	4,77	5,12	0,22	0,27
62,70	3,65	3,89	5,01	5,38	0,22	0,26
65,55	3,85	4,12	5,25	5,64	0,22	0,26
68,40	4,06	4,34	5,48	5,89	0,22	0,25
71,25	4,26	4,55	5,70	6,13	0,22	0,24
74,10	4,46	4,77	5,91	6,37	0,22	0,24
76,95	4,66	4,98	6,12	6,60	0,21	0,23
79,80	4,86	5,19	6,32	6,82	0,21	0,22
82,65	5,05	5,40	6,51	7,03	0,21	0,21
85,50	5,24	5,60	6,70	7,24	0,20	0,21

Quadro VI.37 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos com dois contraventamentos juntos

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,05	0,05	0,09	0,09	0,05	0,09
5,70	0,12	0,12	0,22	0,23	0,07	0,14
8,55	0,19	0,21	0,37	0,39	0,08	0,16
11,40	0,29	0,31	0,56	0,60	0,11	0,21
14,25	0,39	0,43	0,76	0,83	0,11	0,22
17,10	0,51	0,56	1,00	1,09	0,13	0,27
19,95	0,64	0,70	1,25	1,38	0,14	0,28
22,80	0,79	0,86	1,54	1,70	0,16	0,32
25,65	0,94	1,03	1,84	2,04	0,17	0,34
28,50	1,10	1,21	2,16	2,41	0,19	0,37
31,35	1,28	1,41	2,52	2,81	0,20	0,40
34,20	1,48	1,64	2,92	3,27	0,22	0,45
37,05	1,68	1,87	3,32	3,74	0,23	0,47
39,90	1,90	2,12	3,77	4,25	0,25	0,51
42,75	2,13	2,37	4,22	4,77	0,25	0,52
45,60	2,37	2,64	4,70	5,33	0,27	0,56
48,45	2,61	2,91	5,19	5,89	0,28	0,57
51,30	2,86	3,20	5,70	6,50	0,29	0,60
54,15	3,12	3,50	6,23	7,11	0,29	0,61
57,00	3,39	3,80	6,77	7,74	0,31	0,64
59,85	3,66	4,12	7,34	8,41	0,32	0,67
62,70	3,96	4,46	7,95	9,12	0,33	0,71
65,55	4,25	4,79	8,55	9,84	0,34	0,72
68,40	4,55	5,14	9,18	10,58	0,35	0,75
71,25	4,86	5,49	9,82	11,34	0,35	0,75
74,10	5,17	5,85	10,47	12,11	0,36	0,78
76,95	5,48	6,21	11,13	12,89	0,36	0,78
79,80	5,80	6,58	11,80	13,69	0,37	0,80
82,65	6,11	6,95	12,47	14,49	0,37	0,80
85,50	6,43	7,32	13,16	15,31	0,37	0,82
88,35	6,76	7,70	13,87	16,16	0,38	0,85
91,20	7,09	8,09	14,59	17,02	0,39	0,86
94,05	7,42	8,47	15,31	17,88	0,39	0,86
96,90	7,75	8,86	16,03	18,75	0,38	0,87
99,75	8,07	9,24	16,75	19,61	0,38	0,87
102,60	8,40	9,62	17,47	20,48	0,38	0,87
105,45	8,72	9,99	18,18	21,35	0,38	0,86
108,30	9,03	10,36	18,90	22,21	0,37	0,86
111,15	9,34	10,73	19,60	23,06	0,37	0,86
114,00	9,65	11,10	20,31	23,92	0,36	0,86

116,85	9,96	11,47	21,03	24,80	0,37	0,88
119,70	10,27	11,84	21,75	25,67	0,37	0,87
122,55	10,57	12,20	22,46	26,54	0,36	0,86
125,40	10,87	12,55	23,16	27,39	0,35	0,85
128,25	11,16	12,90	23,85	28,23	0,35	0,84
131,10	11,44	13,24	24,52	29,05	0,34	0,82
133,95	11,71	13,57	25,18	29,86	0,33	0,81
136,80	11,98	13,89	25,83	30,66	0,32	0,80
139,65	12,24	14,21	26,47	31,45	0,32	0,79
142,50	12,50	14,52	27,10	32,22	0,31	0,78

Quadro VI.38 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos com três contraventamentos juntos

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,05	0,05	0,09	0,09	0,05	0,09
5,70	0,09	0,09	0,19	0,19	0,05	0,10
8,55	0,13	0,14	0,29	0,29	0,04	0,10
11,40	0,17	0,18	0,40	0,41	0,04	0,11
14,25	0,21	0,22	0,51	0,52	0,04	0,12
17,10	0,25	0,26	0,63	0,65	0,04	0,12
19,95	0,30	0,30	0,76	0,78	0,04	0,14
22,80	0,34	0,34	0,90	0,93	0,04	0,15
25,65	0,37	0,38	1,04	1,07	0,04	0,15
28,50	0,41	0,42	1,19	1,22	0,04	0,15
31,35	0,44	0,45	1,33	1,37	0,03	0,15
34,20	0,47	0,48	1,49	1,53	0,03	0,16
37,05	0,50	0,51	1,65	1,70	0,03	0,17
39,90	0,53	0,54	1,81	1,87	0,03	0,17
42,75	0,55	0,57	1,97	2,03	0,02	0,17
45,60	0,57	0,59	2,13	2,20	0,02	0,17
48,45	0,59	0,60	2,29	2,37	0,02	0,17
51,30	0,60	0,61	2,45	2,53	0,01	0,16
54,15	0,60	0,62	2,61	2,69	0,01	0,16
57,00	0,60	0,62	2,76	2,85	0,00	0,16
59,85	0,60	0,61	2,91	3,00	0,00	0,15
62,70	0,59	0,60	3,05	3,15	-0,01	0,15
65,55	0,57	0,59	3,19	3,30	-0,01	0,14
68,40	0,55	0,57	3,33	3,44	-0,02	0,14
71,25	0,53	0,55	3,47	3,58	-0,02	0,14
74,10	0,51	0,52	3,60	3,72	-0,03	0,14

76,95	0,48	0,49	3,72	3,85	-0,03	0,13
79,80	0,44	0,45	3,84	3,97	-0,04	0,12
82,65	0,40	0,41	3,94	4,08	-0,04	0,11
85,50	0,35	0,37	4,04	4,18	-0,05	0,10

Quadro VI.39 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos com três contraventamentos juntos

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,04	0,04	0,07	0,07	0,04	0,07
5,70	0,07	0,08	0,15	0,15	0,04	0,09
8,55	0,11	0,12	0,24	0,25	0,04	0,09
11,40	0,16	0,16	0,35	0,36	0,05	0,11
14,25	0,21	0,21	0,46	0,47	0,05	0,12
17,10	0,26	0,26	0,59	0,60	0,05	0,13
19,95	0,31	0,31	0,72	0,74	0,05	0,14
22,80	0,36	0,37	0,86	0,89	0,06	0,15
25,65	0,41	0,43	1,01	1,05	0,06	0,15
28,50	0,47	0,49	1,17	1,22	0,06	0,17
31,35	0,54	0,55	1,34	1,40	0,07	0,18
34,20	0,60	0,62	1,54	1,60	0,07	0,20
37,05	0,67	0,69	1,73	1,81	0,07	0,21
39,90	0,74	0,77	1,94	2,03	0,07	0,22
42,75	0,81	0,84	2,15	2,26	0,07	0,23
45,60	0,88	0,91	2,38	2,50	0,07	0,24
48,45	0,95	0,99	2,61	2,74	0,07	0,24
51,30	1,02	1,06	2,85	3,00	0,08	0,25
54,15	1,10	1,14	3,09	3,25	0,08	0,26
57,00	1,17	1,22	3,34	3,52	0,08	0,27
59,85	1,25	1,30	3,61	3,81	0,08	0,29
62,70	1,33	1,38	3,89	4,11	0,09	0,30
65,55	1,41	1,47	4,18	4,42	0,08	0,30
68,40	1,49	1,55	4,47	4,73	0,08	0,31
71,25	1,57	1,64	4,76	5,04	0,08	0,31
74,10	1,65	1,72	5,06	5,36	0,08	0,32
76,95	1,72	1,80	5,36	5,69	0,08	0,32
79,80	1,79	1,87	5,67	6,01	0,08	0,33
82,65	1,87	1,95	5,97	6,34	0,08	0,33
85,50	1,94	2,03	6,28	6,68	0,08	0,33
88,35	2,01	2,11	6,61	7,03	0,08	0,35
91,20	2,09	2,19	6,94	7,39	0,08	0,36

94,05	2,16	2,26	7,27	7,74	0,08	0,36
96,90	2,23	2,34	7,60	8,10	0,07	0,36
99,75	2,29	2,41	7,94	8,46	0,07	0,36
102,60	2,35	2,47	8,27	8,81	0,07	0,36
105,45	2,41	2,53	8,60	9,17	0,06	0,35
108,30	2,46	2,59	8,92	9,52	0,06	0,35
111,15	2,52	2,65	9,25	9,87	0,06	0,35
114,00	2,56	2,70	9,57	10,22	0,05	0,35
116,85	2,61	2,76	9,91	10,58	0,06	0,36
119,70	2,66	2,81	10,24	10,94	0,05	0,36
122,55	2,71	2,86	10,57	11,30	0,05	0,35
125,40	2,75	2,90	10,89	11,64	0,04	0,35
128,25	2,78	2,94	11,21	11,99	0,04	0,34
131,10	2,81	2,97	11,52	12,32	0,03	0,33
133,95	2,83	3,00	11,82	12,65	0,03	0,33
136,80	2,86	3,03	12,12	12,97	0,02	0,32
139,65	2,87	3,05	12,41	13,28	0,02	0,31
142,50	2,89	3,06	12,69	13,59	0,02	0,31

Quadro VI.40 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos escalonados

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,05	0,05	0,10	0,10	0,05	0,10
5,70	0,10	0,11	0,21	0,22	0,05	0,12
8,55	0,15	0,16	0,33	0,34	0,05	0,12
11,40	0,20	0,20	0,45	0,47	0,05	0,13
14,25	0,24	0,25	0,58	0,60	0,05	0,13
17,10	0,28	0,29	0,71	0,73	0,04	0,13
19,95	0,31	0,32	0,82	0,84	0,03	0,11
22,80	0,33	0,34	0,94	0,96	0,02	0,12
25,65	0,35	0,36	1,05	1,08	0,02	0,12
28,50	0,36	0,37	1,18	1,21	0,02	0,13
31,35	0,40	0,41	1,32	1,37	0,04	0,15
34,20	0,44	0,45	1,48	1,53	0,04	0,16
37,05	0,48	0,49	1,64	1,70	0,04	0,17
39,90	0,51	0,53	1,81	1,88	0,04	0,18
42,75	0,55	0,57	1,97	2,06	0,03	0,17
45,60	0,57	0,59	2,13	2,23	0,03	0,17
48,45	0,59	0,62	2,29	2,40	0,02	0,17
51,30	0,61	0,63	2,44	2,56	0,01	0,17

54,15	0,61	0,64	2,59	2,72	0,01	0,16
57,00	0,63	0,66	2,75	2,89	0,02	0,17
59,85	0,71	0,75	3,06	3,23	0,09	0,34
62,70	0,82	0,87	3,43	3,63	0,12	0,40
65,55	0,94	0,99	3,81	4,04	0,13	0,40
68,40	1,07	1,12	4,20	4,46	0,13	0,42
71,25	1,20	1,26	4,61	4,90	0,14	0,44
74,10	1,33	1,40	5,01	5,34	0,14	0,44
76,95	1,45	1,53	5,40	5,77	0,13	0,42
79,80	1,56	1,65	5,78	6,18	0,12	0,41
82,65	1,67	1,76	6,14	6,57	0,11	0,39
85,50	1,77	1,86	6,49	6,94	0,11	0,37

Quadro VI.41 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos escalonados

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,04	0,04	0,07	0,07	0,04	0,07
5,70	0,07	0,08	0,15	0,15	0,04	0,09
8,55	0,11	0,12	0,24	0,25	0,04	0,09
11,40	0,16	0,17	0,35	0,36	0,05	0,11
14,25	0,21	0,21	0,46	0,48	0,05	0,12
17,10	0,26	0,27	0,59	0,61	0,05	0,13
19,95	0,31	0,32	0,72	0,75	0,05	0,14
22,80	0,36	0,38	0,86	0,90	0,06	0,15
25,65	0,41	0,43	1,01	1,06	0,06	0,16
28,50	0,47	0,49	1,17	1,23	0,06	0,17
31,35	0,52	0,55	1,32	1,40	0,06	0,17
34,20	0,57	0,61	1,49	1,58	0,06	0,18
37,05	0,63	0,67	1,67	1,77	0,06	0,19
39,90	0,68	0,73	1,86	1,97	0,06	0,20
42,75	0,74	0,79	2,05	2,18	0,06	0,21
45,60	0,79	0,85	2,25	2,40	0,06	0,22
48,45	0,84	0,91	2,45	2,63	0,06	0,22
51,30	0,90	0,97	2,67	2,87	0,06	0,24
54,15	0,99	1,07	2,95	3,17	0,10	0,31
57,00	1,10	1,20	3,27	3,53	0,13	0,35
59,85	1,24	1,35	3,63	3,94	0,15	0,41
62,70	1,39	1,51	4,03	4,38	0,17	0,45
65,55	1,54	1,68	4,43	4,84	0,17	0,46
68,40	1,70	1,86	4,86	5,32	0,18	0,48

71,25	1,86	2,04	5,29	5,82	0,18	0,49
74,10	2,03	2,23	5,74	6,33	0,19	0,51
76,95	2,19	2,42	6,19	6,85	0,19	0,52
79,80	2,36	2,62	6,66	7,38	0,19	0,54
82,65	2,53	2,81	7,12	7,93	0,19	0,54
85,50	2,70	3,01	7,60	8,48	0,19	0,55
88,35	2,86	3,19	8,06	9,01	0,19	0,54
91,20	3,02	3,38	8,53	9,57	0,19	0,55
94,05	3,18	3,56	9,00	10,12	0,19	0,55
96,90	3,35	3,76	9,50	10,71	0,20	0,59
99,75	3,61	4,07	10,22	11,55	0,30	0,84
102,60	3,94	4,44	11,06	12,55	0,37	1,00
105,45	4,27	4,82	11,94	13,58	0,39	1,03
108,30	4,64	5,24	12,89	14,70	0,42	1,12
111,15	5,02	5,67	13,85	15,84	0,43	1,14
114,00	5,42	6,13	14,87	17,06	0,46	1,21
116,85	5,84	6,62	15,97	18,35	0,49	1,30
119,70	6,29	7,12	17,09	19,69	0,51	1,34
122,55	6,73	7,63	18,22	21,03	0,51	1,34
125,40	7,18	8,14	19,36	22,38	0,51	1,35
128,25	7,62	8,65	20,48	23,72	0,51	1,34
131,10	8,06	9,15	21,61	25,06	0,50	1,33
133,95	8,49	9,64	22,72	26,38	0,49	1,32
136,80	8,92	10,13	23,81	27,68	0,49	1,30
139,65	9,34	10,61	24,90	28,97	0,48	1,29
142,50	9,75	11,08	25,97	30,24	0,47	1,27

6.9. TABELAS REFERENTES À ANÁLISE QUANTO À INTERAÇÃO ENTRE CONTRAVENTAMENTOS EM ÚNICO VÃO E EM GRANDE ESCALA

Quadro VI.42 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,12	0,13	0,21	0,23	0,13	0,23
5,70	0,27	0,30	0,52	0,59	0,17	0,36
8,55	0,45	0,51	0,90	1,03	0,20	0,44
11,40	0,67	0,76	1,37	1,60	0,25	0,57

14,25	0,91	1,04	1,91	2,24	0,28	0,64
17,10	1,19	1,37	2,53	3,00	0,33	0,76
19,95	1,49	1,73	3,21	3,84	0,36	0,83
22,80	1,84	2,14	4,00	4,81	0,41	0,98
25,65	2,21	2,58	4,84	5,86	0,44	1,05
28,50	2,62	3,07	5,77	7,02	0,49	1,17
31,35	3,04	3,58	6,75	8,25	0,51	1,22
34,20	3,50	4,14	7,80	9,57	0,55	1,33
37,05	3,99	4,73	8,92	10,99	0,59	1,41
39,90	4,52	5,36	10,13	12,52	0,64	1,54
42,75	5,06	6,02	11,38	14,11	0,66	1,59
45,60	5,63	6,71	12,70	15,79	0,69	1,68
48,45	6,21	7,42	14,05	17,51	0,71	1,71
51,30	6,81	8,16	15,44	19,29	0,73	1,79
54,15	7,43	8,91	16,87	21,12	0,75	1,83
57,00	8,05	9,68	18,33	23,00	0,77	1,87
59,85	8,68	10,45	19,81	24,88	0,77	1,88
62,70	9,32	11,23	21,29	26,79	0,78	1,91
65,55	9,96	12,01	22,78	28,70	0,78	1,91
68,40	10,60	12,79	24,28	30,62	0,78	1,92
71,25	11,25	13,58	25,79	32,56	0,79	1,94
74,10	11,89	14,36	27,30	34,49	0,78	1,93
76,95	12,52	15,14	28,79	36,41	0,78	1,92
79,80	13,15	15,91	30,27	38,30	0,77	1,90
82,65	13,77	16,67	31,73	40,17	0,76	1,87
85,50	14,38	17,42	33,18	42,03	0,75	1,85

Quadro VI.43 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos ao longo de um único vão

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,12	0,16	0,19	0,26	0,16	0,26
5,70	0,34	0,50	0,70	1,15	0,34	0,89
8,55	0,62	0,94	1,33	2,31	0,45	1,16
11,40	1,01	1,58	2,25	4,07	0,64	1,76
14,25	1,46	2,32	3,29	6,09	0,74	2,02
17,10	2,02	3,24	4,60	8,68	0,92	2,59
19,95	2,63	4,27	6,01	11,51	1,02	2,83
22,80	3,33	5,46	7,68	14,88	1,19	3,37
25,65	4,09	6,74	9,45	18,48	1,29	3,60
28,50	4,93	8,18	11,45	22,58	1,44	4,11

31,35	5,82	9,71	13,55	26,90	1,53	4,32
34,20	6,79	11,39	15,85	31,69	1,67	4,79
37,05	7,80	13,14	18,24	36,68	1,76	4,99
39,90	8,88	15,03	20,82	42,10	1,89	5,42
42,75	10,01	16,99	23,48	47,70	1,96	5,60
45,60	11,19	19,08	26,31	53,70	2,08	6,00
48,45	12,42	21,23	29,22	59,86	2,15	6,16
51,30	13,70	23,49	32,28	66,38	2,26	6,52
54,15	15,02	25,81	35,40	73,05	2,32	6,67
57,00	16,39	28,23	38,66	80,05	2,42	7,00
59,85	17,79	30,72	41,99	87,21	2,49	7,16
62,70	19,24	33,29	45,45	94,66	2,57	7,45
65,55	20,72	35,91	48,96	102,23	2,62	7,57
68,40	22,23	38,61	52,57	110,04	2,70	7,81
71,25	23,77	41,35	56,23	117,96	2,74	7,92
74,10	25,34	44,15	59,97	126,09	2,80	8,13
76,95	26,93	46,99	63,75	134,31	2,84	8,22
79,80	28,55	49,88	67,61	142,71	2,89	8,40
82,65	30,18	52,80	71,51	151,18	2,92	8,47
85,50	31,84	55,77	75,46	159,81	2,97	8,63
88,35	33,52	58,78	79,46	168,54	3,01	8,73
91,20	35,23	61,84	83,54	177,45	3,06	8,91
94,05	36,95	64,94	87,65	186,43	3,09	8,98
96,90	38,70	68,07	91,81	195,55	3,13	9,12
99,75	40,46	71,22	96,00	204,72	3,15	9,17
102,60	42,23	74,41	100,23	213,99	3,19	9,28
105,45	44,01	77,61	104,48	223,31	3,20	9,31
108,30	45,80	80,83	108,76	232,70	3,22	9,39
111,15	47,60	84,06	113,05	242,12	3,23	9,42
114,00	49,41	87,32	117,37	251,60	3,25	9,48
116,85	51,23	90,60	121,73	261,17	3,29	9,57
119,70	53,07	93,91	126,13	270,83	3,31	9,66
122,55	54,91	97,23	130,52	280,50	3,32	9,67
125,40	56,76	100,56	134,93	290,20	3,33	9,70
128,25	58,60	103,88	139,34	299,90	3,32	9,70
131,10	60,45	107,20	143,75	309,60	3,32	9,70
133,95	62,29	110,52	148,15	319,28	3,32	9,68
136,80	64,12	113,83	152,54	328,95	3,31	9,67
139,65	65,95	117,13	156,93	338,60	3,30	9,65
142,50	67,78	120,42	161,30	348,23	3,29	9,63

Quadro VI.44 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos e com contraventamentos em grande escala

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,15	0,17	0,45	0,50	0,17	0,50
5,70	0,31	0,34	0,88	0,98	0,18	0,48
8,55	0,47	0,51	1,33	1,47	0,17	0,49
11,40	0,63	0,69	1,77	1,95	0,18	0,48
14,25	0,79	0,86	2,19	2,41	0,17	0,47
17,10	0,95	1,04	2,49	2,73	0,18	0,32
19,95	1,11	1,21	2,61	2,86	0,17	0,13
22,80	1,29	1,41	2,73	2,98	0,20	0,12
25,65	1,51	1,64	2,94	3,19	0,23	0,21
28,50	1,72	1,86	3,29	3,57	0,22	0,37
31,35	1,91	2,06	3,82	4,15	0,20	0,58
34,20	2,08	2,24	4,55	4,97	0,18	0,82
37,05	2,27	2,45	5,45	5,97	0,21	1,01
39,90	2,46	2,64	6,26	6,86	0,20	0,89
42,75	2,62	2,81	6,82	7,48	0,17	0,62
45,60	2,73	2,93	7,10	7,77	0,11	0,29
48,45	2,80	3,00	7,20	7,87	0,07	0,10
51,30	2,86	3,06	7,16	7,82	0,07	-0,05
54,15	2,95	3,15	7,07	7,72	0,09	-0,10
57,00	3,06	3,27	7,08	7,72	0,12	0,00
59,85	3,18	3,40	7,23	7,87	0,13	0,15
62,70	3,35	3,57	7,67	8,35	0,17	0,48
65,55	3,55	3,78	8,47	9,23	0,22	0,88
68,40	3,80	4,05	9,58	10,44	0,26	1,21
71,25	4,05	4,31	10,75	11,72	0,27	1,27
74,10	4,25	4,52	11,63	12,67	0,21	0,95
76,95	4,37	4,65	12,12	13,19	0,13	0,52
79,80	4,43	4,71	12,29	13,28	0,06	0,08
82,65	4,46	4,74	12,40	13,28	0,03	0,00
85,50	4,45	4,73	12,41	13,29	-0,01	0,01

Quadro VI.81 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos e com contraventamentos em grande escala

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,06	0,07	0,21	0,22	0,07	0,22
5,70	0,13	0,14	0,43	0,45	0,07	0,24
8,55	0,20	0,21	0,67	0,71	0,07	0,25
11,40	0,28	0,30	0,99	1,05	0,08	0,34
14,25	0,37	0,40	1,41	1,53	0,10	0,48
17,10	0,51	0,56	1,98	2,18	0,16	0,65
19,95	0,72	0,80	2,67	2,96	0,24	0,77
22,80	1,01	1,12	3,34	3,71	0,33	0,76
25,65	1,37	1,53	3,94	4,37	0,40	0,65
28,50	1,76	1,95	4,46	4,93	0,43	0,56
31,35	2,13	2,36	4,96	5,45	0,41	0,52
34,20	2,47	2,72	5,36	5,85	0,36	0,40
37,05	2,75	3,02	5,63	6,11	0,30	0,26
39,90	2,97	3,24	5,84	6,31	0,22	0,20
42,75	3,11	3,37	6,06	6,54	0,14	0,22
45,60	3,17	3,41	6,41	6,93	0,04	0,39
48,45	3,13	3,35	6,97	7,58	-0,06	0,66
51,30	3,08	3,27	7,73	8,47	-0,08	0,89
54,15	3,05	3,23	8,59	9,47	-0,04	1,00
57,00	3,09	3,26	9,41	10,42	0,03	0,95
59,85	3,22	3,40	10,10	11,18	0,14	0,76
62,70	3,48	3,71	10,66	11,77	0,31	0,59
65,55	3,91	4,20	11,20	12,32	0,49	0,55
68,40	4,47	4,83	11,64	12,74	0,63	0,42
71,25	5,09	5,54	11,95	13,03	0,70	0,29
74,10	5,66	6,18	12,23	13,30	0,64	0,27
76,95	6,10	6,66	12,57	13,64	0,48	0,34
79,80	6,39	6,97	13,08	14,22	0,31	0,58
82,65	6,55	7,13	13,85	15,12	0,16	0,90
85,50	6,61	7,17	14,84	16,29	0,04	1,17
88,35	6,60	7,13	15,93	17,57	-0,05	1,29
91,20	6,50	6,98	16,91	18,70	-0,14	1,12
94,05	6,35	6,78	17,61	19,48	-0,20	0,79
96,90	6,22	6,62	18,06	19,94	-0,16	0,46
99,75	6,21	6,58	18,35	20,20	-0,04	0,26
102,60	6,31	6,69	18,48	20,26	0,11	0,07
105,45	6,55	6,95	18,53	20,25	0,26	-0,01
108,30	6,94	7,39	18,68	20,36	0,43	0,11

111,15	7,47	7,99	19,06	20,76	0,60	0,39
114,00	8,10	8,70	19,76	21,54	0,71	0,78
116,85	8,75	9,43	20,79	22,73	0,73	1,19
119,70	9,31	10,04	22,05	24,18	0,62	1,45
122,55	9,70	10,47	23,30	25,62	0,43	1,44
125,40	9,92	10,71	24,31	26,77	0,23	1,15
128,25	9,99	10,78	24,94	27,47	0,07	0,70
131,10	9,92	10,68	25,15	27,68	-0,10	0,21
133,95	9,71	10,45	25,16	27,68	-0,24	0,00
136,80	9,41	10,10	25,16	27,69	-0,34	0,00
139,65	9,45	10,15	25,16	27,69	0,05	0,00
142,50	9,46	10,16	25,16	27,69	0,01	0,00

Quadro VI.45 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 30 pavimentos com contraventamentos em único vão e em grande escala

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,07	0,07	0,16	0,17	0,07	0,17
5,70	0,16	0,16	0,37	0,38	0,10	0,22
8,55	0,28	0,30	0,64	0,67	0,14	0,29
11,40	0,42	0,44	0,95	1,00	0,15	0,33
14,25	0,53	0,56	1,21	1,28	0,12	0,28
17,10	0,65	0,68	1,45	1,53	0,12	0,25
19,95	0,76	0,79	1,60	1,69	0,12	0,16
22,80	0,87	0,92	1,80	1,91	0,12	0,21
25,65	1,01	1,06	2,15	2,27	0,14	0,37
28,50	1,14	1,20	2,51	2,66	0,14	0,39
31,35	1,27	1,33	2,79	2,95	0,14	0,30
34,20	1,40	1,46	3,09	3,27	0,13	0,31
37,05	1,52	1,59	3,45	3,64	0,13	0,38
39,90	1,64	1,72	3,81	4,02	0,13	0,38
42,75	1,75	1,83	4,20	4,43	0,11	0,41
45,60	1,84	1,92	4,55	4,81	0,09	0,38
48,45	1,91	2,00	4,80	5,08	0,08	0,26
51,30	2,00	2,09	5,00	5,29	0,09	0,21
54,15	2,12	2,22	5,18	5,48	0,13	0,19
57,00	2,25	2,35	5,39	5,71	0,13	0,23
59,85	2,35	2,45	5,72	6,06	0,10	0,35
62,70	2,44	2,55	6,07	6,43	0,10	0,37
65,55	2,54	2,66	6,39	6,76	0,10	0,33
68,40	2,65	2,77	6,73	7,12	0,11	0,36

71,25	2,76	2,88	7,11	7,52	0,12	0,40
74,10	2,87	2,99	7,45	7,87	0,11	0,35
76,95	2,97	3,10	7,77	8,20	0,10	0,33
79,80	3,06	3,19	8,04	8,48	0,09	0,28
82,65	3,14	3,28	8,22	8,68	0,09	0,20
85,50	3,23	3,37	8,35	8,81	0,09	0,13

Quadro VI.46 - Deslocamentos laterais para a estrutura de 50 pavimentos com contraventamentos em único vão e em grande escala

H (m)	Deslocamento lateral (cm)				Deslocamento relativo entre pisos (cm)	
	Direção X		Direção Y		Direção X	Direção Y
	1º Ordem	2º Ordem	1º Ordem	2º Ordem		
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,85	0,02	0,03	0,06	0,06	0,03	0,06
5,70	0,06	0,07	0,20	0,21	0,04	0,15
8,55	0,11	0,11	0,44	0,46	0,05	0,25
11,40	0,18	0,19	0,72	0,77	0,08	0,31
14,25	0,30	0,31	0,95	1,01	0,13	0,24
17,10	0,44	0,46	1,22	1,29	0,14	0,28
19,95	0,55	0,58	1,53	1,62	0,12	0,33
22,80	0,68	0,72	1,88	1,99	0,14	0,37
25,65	0,85	0,89	2,29	2,44	0,17	0,45
28,50	1,03	1,09	2,73	2,91	0,19	0,47
31,35	1,24	1,30	3,10	3,30	0,21	0,39
34,20	1,44	1,52	3,44	3,67	0,22	0,37
37,05	1,62	1,70	3,71	3,97	0,19	0,30
39,90	1,78	1,88	4,02	4,29	0,17	0,33
42,75	1,95	2,05	4,43	4,74	0,17	0,45
45,60	2,09	2,20	4,87	5,22	0,15	0,48
48,45	2,19	2,31	5,24	5,62	0,10	0,39
51,30	2,28	2,40	5,63	6,03	0,10	0,42
54,15	2,38	2,50	6,06	6,50	0,10	0,47
57,00	2,50	2,63	6,53	7,00	0,13	0,50
59,85	2,69	2,84	7,05	7,59	0,21	0,57
62,70	2,91	3,07	7,60	8,20	0,23	0,57
65,55	3,11	3,28	8,15	8,75	0,21	0,55
68,40	3,32	3,50	8,62	9,27	0,22	0,52
71,25	3,57	3,77	9,04	9,73	0,26	0,46
74,10	3,82	4,03	9,48	10,20	0,26	0,48
76,95	4,07	4,29	10,00	10,79	0,26	0,57
79,80	4,30	4,53	10,54	11,39	0,24	0,57
82,65	4,49	4,73	11,03	11,88	0,19	0,49
85,50	4,65	4,90	11,49	12,38	0,17	0,50

88,35	4,81	5,07	12,00	12,92	0,17	0,54
91,20	4,95	5,22	12,51	13,47	0,15	0,55
94,05	5,06	5,33	13,03	14,07	0,11	0,57
96,90	5,16	5,44	13,59	14,65	0,11	0,57
99,75	5,28	5,57	14,07	15,17	0,13	0,52
102,60	5,43	5,73	14,51	15,64	0,15	0,47
105,45	5,63	5,94	14,92	16,08	0,21	0,44
108,30	5,84	6,16	15,35	16,55	0,23	0,47
111,15	6,05	6,38	15,87	17,14	0,22	0,57
114,00	6,27	6,61	16,41	17,73	0,23	0,57
116,85	6,51	6,85	16,93	18,26	0,24	0,53
119,70	6,72	7,08	17,42	18,78	0,23	0,52
122,55	6,91	7,28	17,91	19,31	0,20	0,53
125,40	7,08	7,45	18,36	19,80	0,17	0,49
128,25	7,21	7,58	18,80	20,28	0,14	0,48
131,10	7,31	7,69	19,20	20,71	0,11	0,43
133,95	7,39	7,78	19,55	21,08	0,09	0,37
136,80	7,45	7,85	19,84	21,40	0,07	0,32
139,65	7,50	7,90	20,12	21,71	0,06	0,31
142,50	7,56	7,96	20,41	22,02	0,06	0,31

BIBLIOGRAFIA

- [1] VASCONCELOS, A. C. “O Concreto no Brasil”. São Paulo, PINI, 1º Edição, 1992.
- [2] AÇOMINAS. “Edifícios de Andares Múltiplos”. Belo Horizonte, Aço Minas Gerais. 4º Edição, 1989.
- [3] CHAUI, M. Convite à Filosofia. São Paulo, Editora Ática. 12º Edição, 2001.
- [4] BORGES, E. F. “São Paulo e a Origem dos Arranha-céus”. São Paulo, RG Editores. 1ª Edição, 1999.
- [5] TARANATH, B.S. “Structural Analysis and Design of Tall Building”. McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [6] MARGARIDO, A. F. “Arranjos Estruturais dos Edifícios em Aço”. Seminário de Edifícios de Estruturas Metálicas, EPUSP / ABCEM, 1986.
- [7] SALES, J. J. “Estudo do Projeto e da Construção de Edifícios de Andares Múltiplos com Estruturas em Aço”. Tese de Doutorado. São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1995.
- [8] VASCONCELOS FILHO, A. F. “Edifícios de Andares Múltiplos”. Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 1981.
- [9] SMITH, B.S. e COULL, A. “Tall Building Structures: Analysis and Design”. John Wiley & Sons, 1991.
- [10] AMBROSE, J. “Building Structures”. John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1993.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “NBR-6120 -Cargas para cálculo de estruturas de edificações”. Rio de Janeiro, ABNT, 1980.

- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “NBR-6123 - Forças devidas ao vento em edificações”. Rio de Janeiro, ABNT, 1988.
- [13] BLESSMANN, J. “Aerodinâmica das Construções”. Porto Alegre, UFRGS, 1983.
- [14] FONTE, A. O. C. “Notas de Aula do curso de Edifícios Altos”. Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Mestrado em Estruturas, 2001.
- [15] GAYLORD, C.N. e STALLMEYER, J.E. “Structural Engineering Handbook”. Nova York, McGraw-Hill. 4º Edição, 1997.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “NBR-14323 - Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio”. Rio de Janeiro, ABNT, 1999.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “NBR-8800 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios”. Rio de Janeiro, ABNT, 1988.
- [18] QUEIROZ, G. e PIMENTA, R.J. “Elementos das Estruturas Mistas Aço-Concreto”. Belo Horizonte, Editora O Lutador. 1ª Edição, 2001.
- [19] LOPES, F.A.F e OLIVEIRA, R.A. “Influência da rigidez à flexão das lajes na estabilidade das edificações em concreto armado”. 44º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, 2002.
- [20] METFORM. “Manual Técnico MetForm”. Betim, 2002.
- [21] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. “Load and resistance factor design specifications for structural building”. Chicago, 1999.
- [22]. COBRAPI. “Ligações em estruturas metálicas”. MANUAL DA CONSTRUÇÃO METÁLICA Vol. II, 1997.

- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “NBR-6118 - Projeto de estruturas de concreto”. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
- [24] SALOMON, C. H. e JOHNSON, J. E. “Steel Structures: design and behavior”. New York, 3rd Edition, 1990.
- [25] RAAD JÚNIOR, A. A. “Diretrizes para a Fabricação e Montagem das Estruturas Metálicas”. Dissertação de mestrado. Minas Gerais, Universidade Federal de Ouro Preto, 1999.
- [26] SAP 2000 - Non Linear Version 7.12 - Structural Analysis Program - Computers and Structures, Inc. 1995, Berkley University, CA 94704.
- [27] VANDERLI, M.A. “Análise de edifícios de andares múltiplos com estrutura metálica”. Dissertação de Mestrado. Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.
- [28] PFEIL, W. e PFEIL, M. S. “Estruturas de Aço: dimensionamento prático”. Rio de Janeiro, Editora Livros Técnicos e Científicos, 7^o Edição, 2000.
- [29] COBRAPI. “Edifícios de Pequeno Porte Estruturados em Aço”. MANUAL DA CONSTRUÇÃO METÁLICA Vol. IV, 1987.
- [30] MELO NETO, R. C. “Contribuição à Classificação dos Sistemas de Contraventamento e Métodos de Análise de Análises em Edifícios de Andares Múltiplos em Aço”. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, 1987.
- [31] FERREIRA, A. B .H. “Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa”. Rio de Janeiro, Editora Nova Fronteira, 1^o Edição, 1988.
- [32] SORIANO, H. L. e LIMA, S. S. “Análise de Estruturas em Computadores: Estruturas Reticuladas.” Volume I, UFRJ, 1993.