

**CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUNS MODELOS CLÁSSICOS PARA
ANÁLISE ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS DE ANDARES MÚLTIPLOS
SUJEITOS À AÇÃO DE FORÇAS LATERAIS**

Cristiane Barbosa Costa

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUNS MODELOS CLÁSSICOS
PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS DE ANDARES
MÚLTIPLOS SUJEITOS À AÇÃO DE FORÇAS LATERAIS"**

Cristiane Barbosa Costa Barros

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Alcebiades de Vasconcellos Filho
DEES - UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Roque Luiz da Silva Pitangueira
DEES - UFMG

Prof. Dr. Antônio Oscar Cavalcanti da Fonte
PUC - Recife

Belo Horizonte, 26 de maio de 2003

A minha amada mãe,
Eunice Barbosa Mendonça,
a grande incentivadora da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e todos, a Deus que me protege e me ilumina em todos os momentos.

Ao professor Alcebíades de Vasconcellos Filho, que orientou este trabalho com muita experiência e dedicação. Obrigada pela paciência, professor!

Ao George Belloni, pela disposição em sempre me auxiliar com o uso do programa para cálculo estrutural utilizado neste trabalho e pela co-orientação.

A minha família que sempre me apoiou e incentivou.

Ao Fernando de Barros pela compreensão e carinho que se fizeram presentes mesmo à distância.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG pela amizade, atenção e disponibilidade sempre que foi necessário.

Aos colegas do mestrado, pelo agradável convívio, pelas sugestões e colaboração, em especial aos amigos: Carla Montanari, Flávio Mateus, Késio Palácio, Silvia Pereira e Sirvanne Lima.

A Graça Leite por estar comigo nos momentos mais difíceis.

A Gleice Barros, Wanda Trindade e Jayth Chaves por acreditarem em mim e terem permitido que eu caminhasse em busca deste trabalho.

Aos amigos e professores do Estado do Amazonas, que me incentivaram nesta caminhada.

À TQS pelo software disponibilizado.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos	viii
Resumo	x
Abstract	xi
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	4
3 Estruturas Analisadas	14
4 Carregamento	20
5 Modelos Comparados	22
5.1 Modelo Pórticos Planos Independentes com Áreas de Influência (PPI-AI)	22
5.2 Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT)	29
5.3 Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA)	46
5.4 Modelo Pórtico Espacial (PE)	51
6 Análise dos Resultados da Estrutura 1	54
6.1 Cargas nas Fundações	54
6.2 Deslocamentos Laterais nos Pórticos	61
6.3 Momentos Fletores nos Pórticos	73
7 Análise dos Resultados da Estrutura 2	78
7.1 Cargas nas Fundações	78
7.2 Deslocamentos Laterais nos Pórticos e Pilares Isolados	84
7.3 Momentos Fletores nos Pórticos	97
8 Análise dos Resultados da Estrutura 3	103
8.1 Cargas nas Fundações	103

8.2	Deslocamentos Laterais nos Pórticos	109
8.3	Momentos Fletores nos Pórticos	122
9	Análise dos Resultados da Estrutura 4	129
9.1	Cargas nas Fundações	129
9.2	Deslocamentos Laterais nos Pórticos	135
9.3	Momentos Fletores nos Pórticos	151
10	Conclusões	162
	Bibliografia	167

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Forma do pavimento tipo da Estrutura 1	16
FIGURA 3.2 - Forma do pavimento tipo da Estrutura 2	17
FIGURA 3.3 - Forma do pavimento tipo da Estrutura 3	18
FIGURA 3.4 - Forma do pavimento tipo da Estrutura 4	19
FIGURA 4.1 - Esquema das forças, equivalentes à ação total do vento, aplicadas em cada laje na direção Y	21
FIGURA 5.1 - Esquema das áreas de influência da Estrutura 1	23
FIGURA 5.2 - Modelo Pórticos Planos Independentes com Áreas de Influência (PPI-AI) das Estruturas 1 e 2: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN)	24
FIGURA 5.3 - Modelo Pórticos Planos Independentes com Áreas de Influência (PPI-AI) da Estrutura 3: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN)	25
FIGURA 5.4 - Modelo Pórticos Planos Independentes com Áreas de Influência (PPI-AI) da Estrutura 4: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN)	26
FIGURA 5.5 - Esquema das forças atuantes na laje do topo da Estrutura 4	39
FIGURA 5.6 - Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT) da Estrutura 1: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN)	42
FIGURA 5.7 - Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT) da Estrutura 2: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN)	43
FIGURA 5.8 - Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT) da Estrutura 3: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN)	44
FIGURA 5.9 - Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT) da Estrutura 4: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN)	45

FIGURA 5.10 - Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA) da Estrutura 1: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN)	47
FIGURA 5.11 - Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA) da Estrutura 2: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN)	48
FIGURA 5.12 - Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA) da Estrutura 3: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN)	49
FIGURA 5.13 - Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA) da Estrutura 4: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN)	50
FIGURA 5.14 - Modelo Pórtico Espacial (PE) da Estrutura 1	52
FIGURA 5.15 - Modelo Pórtico Espacial (PE) da Estrutura 2	52
FIGURA 5.16 - Modelo Pórtico Espacial (PE) da Estrutura 3	53
FIGURA 5.17 - Modelo Pórtico Espacial (PE) da Estrutura 4	53
FIGURA 6.1 - Sentidos positivos para as cargas nas fundações da Estrutura 1	56
FIGURA 6.2 - Forças F_y nas fundações da Estrutura 1	57
FIGURA 6.3 - Forças F_z nas fundações da Estrutura 1	57
FIGURA 6.4 - Momentos M_x nas fundações da Estrutura 1	58
FIGURA 6.5 - Deslocamentos nodais Δ_y , Δ_z e Δ_{yz}	61
FIGURA 6.6 - Modelo PPI-AI da Estrutura 1: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	62
FIGURA 6.7 - Modelo PPI-CT da Estrutura 1: deslocamentos Δ_y no topo (em cm) ...	62
FIGURA 6.8 - Modelo PPA da Estrutura 1: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	63
FIGURA 6.9 - Modelo PE da Estrutura 1: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	63
FIGURA 6.10 - Modelo PPI-AI da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	65
FIGURA 6.11 - Modelo PPI-CT da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	66
FIGURA 6.12 - Modelo PPA da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	67
FIGURA 6.13 - Modelo PE da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	68
FIGURA 6.14 - Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	69
FIGURA 6.15 - Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	70

FIGURA 6.16 - Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 1: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m)	74
FIGURA 6.17 - Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 1: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m)	75
FIGURA 7.1 - Forças F_y nas fundações da Estrutura 2	80
FIGURA 7.2 - Forças F_z nas fundações da Estrutura 2	81
FIGURA 7.3 - Momentos M_x nas fundações da Estrutura 2	81
FIGURA 7.4 - Modelo PPI-AI da Estrutura 2: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	86
FIGURA 7.5 - Modelo PPI-CT da Estrutura 2: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	86
FIGURA 7.6 - Modelo PPA da Estrutura 2: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	87
FIGURA 7.7 - Modelo PE da Estrutura 2: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	87
FIGURA 7.8 - Modelo PPI-AI da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	88
FIGURA 7.9 - Modelo PPI-CT da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	89
FIGURA 7.10 - Modelo PPA da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	90
FIGURA 7.11 - Modelo PE da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm) .	91
FIGURA 7.12 - Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	92
FIGURA 7.13 - Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	93
FIGURA 7.14 - Modelos do Pilar Isolado P101 da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	94
FIGURA 7.15 - Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 2: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m)	98
FIGURA 7.16 - Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 2: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m)	99
FIGURA 8.1 - Forças F_y nas fundações da Estrutura 3	105
FIGURA 8.2 - Forças F_z nas fundações da Estrutura 3	106
FIGURA 8.3 - Momentos M_x nas fundações da Estrutura 3	106

FIGURA 8.4 - Modelo PPI-AI da Estrutura 3: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	111
FIGURA 8.5 - Modelo PPI-CT da Estrutura 3: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	111
FIGURA 8.6 - Modelo PPA da Estrutura 3: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	112
FIGURA 8.7 - Modelo PE da Estrutura 3: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	112
FIGURA 8.8 - Modelo PPI-AI da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	113
FIGURA 8.9 - Modelo PPI-CT da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	114
FIGURA 8.10 - Modelo PPA da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	115
FIGURA 8.11 - Modelo PE da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm) .	116
FIGURA 8.12 - Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	117
FIGURA 8.13 - Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	118
FIGURA 8.14 - Modelos do Pórtico 3 da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	119
FIGURA 8.15 - Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 3: diagramas dos momentos fletores M_x no vigaamento (em kN.m)	123
FIGURA 8.16 - Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 3: diagramas dos momentos fletores M_x no vigaamento (em kN.m)	124
FIGURA 8.17 - Modelos do Pórtico 3 da Estrutura 3: diagramas dos momentos fletores M_x no vigaamento (em kN.m)	125
FIGURA 9.1 - Forças F_y nas fundações da Estrutura 4	131
FIGURA 9.2 - Forças F_z nas fundações da Estrutura 4	132
FIGURA 9.3 - Momentos M_x nas fundações da Estrutura 4	132
FIGURA 9.4 - Modelo PPI-AI da Estrutura 4: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	137
FIGURA 9.5 - Modelo PPI-CT da Estrutura 4: deslocamentos Δ_y no topo (em cm) ...	137
FIGURA 9.6 - Modelo PPA da Estrutura 4: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	138
FIGURA 9.7 - Modelo PE da Estrutura 4: deslocamentos Δ_y no topo (em cm)	138

FIGURA 9.8 - Modelo PPI-AI da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	139
FIGURA 9.9 - Modelo PPI-CT da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	140
FIGURA 9.10 - Modelo PPA da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	141
FIGURA 9.11 - Modelo PE da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm) .	142
FIGURA 9.12 - Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	143
FIGURA 9.13 - Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	144
FIGURA 9.14 - Modelos do Pórtico 3 da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	145
FIGURA 9.15 - Modelos do Pórtico 4 da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	146
FIGURA 9.16 - Modelos do Pórtico 5 da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm)	147
FIGURA 9.17 - Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 4: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m)	153
FIGURA 9.18 - Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 4: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m)	154
FIGURA 9.19 - Modelos do Pórtico 3 da Estrutura 4: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m)	155
FIGURA 9.20 - Modelos do Pórtico 4 da Estrutura 4: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m)	156
FIGURA 9.21 - Modelos do Pórtico 5 da Estrutura 4: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m)	157

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 - Quinhões de carga nas Estruturas 1, 2, 3 e 4 no Modelo PPI-AI	28
TABELA 5.2 – Quinhões de carga na Estrutura 1 no Modelo PPI-CT	32
TABELA 5.3 – Quinhões de carga na Estrutura 2 no Modelo PPI-CT	35
TABELA 5.4 – Quinhões de carga na Estrutura 3 no Modelo PPI-CT	37
TABELA 5.5 – Quinhões de carga na Estrutura 4 no Modelo PPI-CT	41
TABELA 6.1 – Esforços nas fundações da Estrutura 1	55
TABELA 6.2 – Diferenças em % dos esforços nas fundações da Estrutura 1	59
TABELA 6.3 – Diferenças em % dos deslocamentos Δ_{yz} dos Pórticos 1 e 2 da Estrutura 1	71
TABELA 6.4 – Diferenças em % dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1 e 2 da Estrutura 1	76
TABELA 7.1 – Esforços nas fundações da Estrutura 2	79
TABELA 7.2 – Diferenças em % dos esforços nas fundações da Estrutura 2	82
TABELA 7.3 – Diferenças em % dos deslocamentos Δ_{yz} dos Pórticos 1 e 2 e do Pilar Isolado P101 da Estrutura 2	95
TABELA 7.4 – Diferenças em % dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1 e 2 da Estrutura 2	100
TABELA 8.1 – Esforços nas fundações da Estrutura 3	104
TABELA 8.2 – Diferenças em % dos esforços nas fundações da Estrutura 3	107
TABELA 8.3 – Diferenças em % dos deslocamentos Δ_{yz} dos Pórticos 1, 2 e 3 da Estrutura 3	120
TABELA 8.4 – Diferenças em % dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1, 2 e 3 da Estrutura 3	126
TABELA 9.1 – Esforços nas fundações da Estrutura 4	130
TABELA 9.2 – Diferenças em % dos esforços nas fundações da Estrutura 4	133
TABELA 9.3 – Diferenças em % dos deslocamentos Δ_{yz} dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 da Estrutura 4	149
TABELA 9.4 – Diferenças em % dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 da Estrutura 4	158

TABELA 10.1- Resumo das diferenças percentuais mínimas, médias e máximas de módulos das grandezas avaliadas	163
TABELA 10.2- Conceitos atribuídos aos modelos planos	164

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$A_{FACHADA}$	- área da fachada
AI_i	- área de influência do Pórtico i
$AI_i\%$	- quinhão de área de influência em porcentagem do Pórtico i
A,B,C,D,E	- conceitos de avaliação
E_c	- módulo de elasticidade do concreto
F_i	- força na mola nº i
F_{VENTO}	- força total do vento
F_x	- força na direção x
F_y	- força na direção y
F_z	- força na direção z
h	- altura da laje
K	- rigidez lateral total da estrutura
K_i	- rigidez lateral de pórtico ou pilar isolado nº i
$K_i\%$	- quinhão de rigidez lateral em porcentagem de pórtico ou pilar isolado nº i
Li	- laje nº i
M_{mm}	- média dos valores médios dos módulos das diferenças percentuais
M_x	- momento na direção x
M_y	- momento na direção y
M_z	- momento na direção z
NBR 6118	- Norma Brasileira sobre Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado
NBR 6123	- Norma Brasileira sobre Forças Devidas ao Vento em Edificações
PE	- Modelo Pórtico Espacial
P_i	- pilar nº i

P_i+P_j	- par de pilares isolados
Pórtico i	- pórtico nº i
PPA	- Modelo Pórticos Planos Alinhados
PPI-AI	- Modelo Pórticos Planos Independentes com Áreas de Influência
PPI-CT	- Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo
TQS [®]	- TQS Informática LTDA
V_E	- valor de grandeza no modelo espacial
$ V_E $	- valor absoluto de grandeza no modelo espacial
V_P	- valor de grandeza nos modelos planos
V_i	- viga nº i / quinhão de carga do vento de pórtico ou pilar isolado nº i
x	- direção x / eixo x
x_i	- abscissa do ponto de aplicação da força F_i
\bar{x}	- abscissa do ponto de aplicação da força F_{VENTO}
y	- direção y / eixo y
yz	- plano yz
z	- direção z / eixo z
Δ_i	- deslocamento do ponto de aplicação da força F_i
Δ_{TOPO}	- deslocamento lateral no topo do pórtico
Δ_y	- deslocamento horizontal na direção y
Δ_z	- deslocamento vertical na direção z
Δ_{yz}	- deslocamento no plano yz
$\Delta(V)\%$	- diferença percentual da grandeza V
θ	- rotação da laje do topo em torno de um eixo vertical
θ_z	- rotação da laje do topo em torno do eixo z
	- mola simulando pórtico

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo mostrar que as estruturas, quando calculadas com modelos diferentes, planos ou espaciais, através de um mesmo programa de cálculo estrutural, podem apresentar resultados bastante discrepantes entre si. Foram analisadas quatro estruturas espaciais distintas sob carregamento horizontal e cada uma foi calculada através de quatro modelos diferentes. Destes, três são planos e um tridimensional. O modelo tridimensional foi tomado como base para comparação com os demais modelos por ser o mais sofisticado e, portanto, o que mais se aproxima do comportamento real da estrutura. Neste modelo admitiu-se a existência de diafragmas no nível de cada piso. Foi usada a teoria elástica linear para análise comparativa entre os modelos adotados. Os modelos foram processados através de um programa para cálculo estrutural de uso comercial. As cargas aplicadas na estrutura foram calculadas de acordo com as recomendações da norma brasileira que trata sobre forças devidas ao vento em edificações. Após efetuada a análise das estruturas propostas foram, em seguida, verificadas as diferenças entre os resultados obtidos por intermédio dos quatro modelos. Nesse contexto, procurou-se explicar as possíveis causas das igualdades ou discrepâncias observadas entre os resultados obtidos. Em seguida, discutiu-se quais os modelos que melhor avaliaram os esforços nas estruturas. Desta forma, tentou-se conscientizar o profissional de engenharia estrutural no sentido de ser cauteloso no modelamento de uma estrutura, pois ele corre o risco de desconsiderar nos modelos planos efeitos que o modelo tridimensional mostrou serem importantes e, conseqüentemente, utilizar em seus cálculos resultados de qualidade duvidosa.

Palavras-chave: modelo estrutural, modelo plano, modelo espacial, edifício alto, modelagem estrutural, pórtico plano, pórtico espacial.

ABSTRACT

The present work aims to show that the use of different structural models, either plane or spatial, for a structure leads to different results when using the same computational analysis tool. Four different structural models – three planar and one spatial - were used to analyze each of four different three-dimensional structures carrying only horizontal loads. The spatial structural model was taken as reference to compare the results of the other three plane models since it is more complex and therefore, provides a more accurate simulation of the actual behavior of the structure. All four models considered the linear elastic behavior of the structures. Furthermore, the spatial structural model considered the existence of diaphragms in each floor. A commercial structural analysis software was used to perform the analysis of the four structures by using each of the four models. The loads applied to the structures were computed according to the recommendations of the current Brazilian code that refers to wind loads on structures. The data analysis showed differences among the results. After evaluating the results, potential causes for the similarities and discrepancies among the results were identified and the models that provided the best results were discussed. The findings of this study showed that structural engineers must be careful when modeling structures by using plane models since these models do not consider important three-dimensional effects and consequently, they might lead to unreliable structural analysis results.

Keywords: structural model, plane model, spatial model, tall building, structural modeling, plane frame, spatial frame.

1

INTRODUÇÃO

Neste trabalho, não se tem a intenção de apresentar nada de novo na fronteira do conhecimento a respeito da análise estrutural. Pretende-se, isso sim, chamar a atenção sobre assunto que é conhecido, mas que muitos profissionais não dão a devida importância, seja por falta de conhecimento, de prática de projeto ou mesmo por negligência.

O objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações solicitantes em uma estrutura, ou seja, calcular os deslocamentos, esforços e tensões ao longo dessa estrutura.

As estruturas têm como função principal a transmissão das cargas verticais que as solicitam para o solo. No entanto, em edifícios de andares múltiplos as forças horizontais merecem uma atenção especial na análise estrutural (VASCONCELLOS FILHO, 1981). A propósito, a norma NBR-6118/80 afirma que:

“Será exigida a consideração da ação do vento nas estruturas em que esta ação possa produzir efeitos estáticos ou dinâmicos importantes e obrigatoriamente no caso de estruturas com nós deslocáveis, nas quais a altura seja maior que 4 vezes a largura menor; ou em que, numa dada direção, o número de filas de pilares seja inferior a 4.”

Por esta afirmação, entende-se que podem existir edifícios de 25 andares nos quais a ação do vento é um efeito secundário da mesma maneira que existem edifícios de 15 andares onde esta ação, se não considerada, pode colocar em risco a estabilidade da estrutura.

A ação do vento influencia de maneira significativa a escolha do sistema estrutural a ser adotado, e o trabalho analítico torna-se maior e mais difícil. Além disso, o engenheiro calculista deve conciliar as questões estruturais com as exigências arquitetônicas e com o conforto dos futuros usuários.

O projeto de uma edificação para resistir à ação do vento deve garantir à estrutura estabilidade e segurança, além de assegurar que não haja deslocamentos laterais excessivos que possam causar danos significativos à construção, com conseqüentes problemas de manutenção ou desconforto dos ocupantes.

A análise dos esforços em edifícios de andares múltiplos geralmente leva o engenheiro a idealizar um modelo estrutural que mais se aproxime da realidade. Quanto maior a complexidade da estrutura, maior atenção deve ser dada ao seu modelamento.

O tipo de sistema estrutural a ser utilizado em edifícios de andares múltiplos será escolhido em função de vários fatores, mas sempre respeitando-se a capacidade da estrutura de resistir aos esforços horizontais (STAFFORD SMITH e COULL, 1991).

Dependendo dos recursos disponíveis pelo profissional, como por exemplo microcomputadores e programas para cálculos estruturais, a concepção de um modelo mais fiel ao real comportamento da estrutura pode ser realizada.

Atualmente, existem microcomputadores e programas de análise estrutural que permitem, na maioria das vezes, a concepção de modelos estruturais mais sofisticados. Isto permite ao projetista de estruturas liberar-se do ônus do trabalho numérico e dedicar mais seu tempo à concepção estrutural, com conseqüente aperfeiçoamento do projeto.

Um dos principais motivos da elaboração deste trabalho é mostrar que uma mesma estrutura, sujeita a cargas horizontais, pode ser analisada através de diversos modelos estruturais.

Todavia, deve-se ser criterioso na escolha destes modelos porque seus resultados podem apresentar valores bastante discrepantes (PEREZ, 1999).

Têm-se adotado, de maneira geral, modelos que transformam a estrutura tridimensional de um edifício em um conjunto de subestruturas bidimensionais que interagem entre si (PEREZ, 1999). Em vista desses procedimentos, pode-se questionar o seguinte: em quais situações uma estrutura pode ser analisada bidimensionalmente, sem que se tenha que preocupar com sua análise tridimensional? Esta não é uma questão simples de ser respondida e exige do engenheiro estrutural grande conhecimento de teoria das estruturas e prática de projeto (LIN e STOTESBURY, 1981).

No presente trabalho são analisadas quatro estruturas simples, distintas entre si. A Estrutura 1 possui dois planos verticais de simetria. A Estrutura 2 também possui dois planos verticais de simetria. Ela difere da Estrutura 1 pelo acréscimo de oito pilares isolados não pertencentes aos painéis verticais enrijecidos na direção em que o vento atua. A Estrutura 3 possui apenas um plano de simetria e nela foi incluído um núcleo estrutural. A Estrutura 4 é assimétrica.

Cada uma das estruturas mencionadas anteriormente foi analisada através de quatro modelos estruturais distintos, que são de uso corrente nos escritórios de projeto. Três modelos são bidimensionais e um modelo é tridimensional.

Pretende-se neste trabalho:

- comparar os resultados obtidos e procurar explicar as possíveis causas das igualdades ou diferenças;
- mostrar que a análise feita através de modelos bidimensionais nem sempre apresenta resultados que traduzem o que está ocorrendo na estrutura;
- identificar as situações, nos casos estudados, em que o modelo bidimensional é satisfatório ou não.

2

Revisão Bibliográfica

Antes do advento do computador (década de 60 no Brasil) os modelos estruturais eram bastante simplificados a fim de tornarem viáveis as análises feitas manualmente. A respeito de tais modelos, existem inúmeros trabalhos e livros escritos que datam do início do século XX.

Posteriormente, a partir da década de 50, começaram a ser publicados artigos sugerindo o uso de modelos mais sofisticados. Isto passou a ser possível em razão do crescente uso e desenvolvimento de computadores. Desta forma, os modelos passaram a ser mais realistas quanto ao comportamento estrutural.

Neste trabalho, a pesquisa bibliográfica realizada limitou-se às quatro últimas décadas.

No caso de análise de edifícios de andares múltiplos, a maioria dos artigos apresentados limita-se a sugerir novos modelos de análise estrutural sendo pouquíssimos os artigos escritos com o objetivo de comparar resultados obtidos na análise de uma mesma estrutura através de modelos diferentes.

Este fato justifica o presente trabalho e a seguir passa-se a comentar sucintamente alguns trabalhos e livros consultados ao longo da elaboração desta dissertação.

STAMATO e STAFFORD SMITH (1968) apresentaram um trabalho onde foi desenvolvido um processo de análise de estruturas de edifícios elevados que podem ser transformadas em um conjunto de painéis verticais bidimensionais dispostos em planos ortogonais ou oblíquos. Mostraram um exemplo com comentários e comparações entre três diferentes modelos sujeitos ao mesmo carregamento horizontal conforme sejam desprezadas ou não as interações ou os deslocamentos nas interseções dos painéis. O exemplo também apresenta a importante contribuição dos painéis transversais (mesas), quando transferem para si parcelas consideráveis das solicitações dos painéis paralelos ao vento (almas). Nenhum carregamento vertical foi considerado. Após a comparação entre os modelos, os autores observaram diferenças pronunciadas entre os resultados obtidos através do processamento entre os três modelos. Assim sendo, este estudo mostrou que podem existir resultados discrepantes ao se analisar uma mesma estrutura através de diferentes modelos.

SANTOS FILHO (1970) analisou um edifício com sete andares no qual as vigas, pilares e cada parede do núcleo estrutural foram modelados com elementos de barra de pórtico espacial. As lajes foram modeladas com elementos triangulares de placa. O trabalho limitou-se à análise e modelagem do edifício em elementos finitos, não havendo nenhuma comparação com resultados de outros modelos.

STAMATO (1971) analisou estruturas de edifícios elevados, abordando o critério elástico para a distribuição das cargas do vento entre os diversos painéis verticais de contraventamento, travados horizontalmente entre si ao nível das lajes entre andares. Afirmou que o critério por área de influência é falho e que, mesmo com um cálculo convencional que substitua a complexidade do problema tridimensional, é necessário estabelecer um critério de distribuição da carga levando em conta a rigidez dos painéis. Para isto, o autor apresentou dois exemplos de modelos estruturais: um compatibilizado no topo e outro compatibilizado nos andares. Foram apresentados dois exemplos numéricos distintos, porém, nenhuma comparação entre os resultados foi realizada.

STAMATO (1972) descreveu e classificou alguns processos numéricos existentes, na época, para a análise elástica de estruturas tridimensionais de edifícios elevados sob a ação de carregamento horizontal. Teceu comentários sobre processos contínuos, processos discretos simplificados e processos discretos refinados. Concluiu chamando a atenção para que, além do estudo numérico dos esforços e deslocamentos que ocorrem em um edifício analisado

tridimensionalmente, é de grande importância a presença de um profissional experiente. Entretanto, não fez nenhuma comparação entre modelos estruturais.

KHAN (1972) comentou sobre a possibilidade da construção de edifícios ultra-altos em concreto armado em áreas urbanas onde o aço é relativamente caro. Apresentou um exemplo bastante esbelto no qual salienta que o deslocamento lateral do edifício pode ser demasiadamente perceptível para os usuários, o que poderá torná-lo inabitável, apesar de ser estruturalmente adequado. Neste caso, o autor sugere um modelo no qual todo o contorno do edifício é encurvado, à semelhança de uma casca, caso se queira aumentar o número de andares. Entretanto, nenhuma comparação numérica entre modelos foi realizada.

FINTEL (1974) afirmou que a modelagem estrutural depende, entre outros fatores, da importância do projeto e da altura do edifício. Apresentou vários sistemas estruturais, bem como os diversos esforços solicitantes a que as estruturas podem ser submetidas e descreveu em detalhes três tipos básicos de sistemas estruturais: pórticos, paredes estruturais e tubos. Para o autor, o sistema de estabilização lateral para resistir ao carregamento horizontal pode ser formado por qualquer um destes três tipos de sistema estrutural, sejam eles individuais ou combinados. Nota-se a preocupação de Fintel com a qualidade dos resultados obtidos já que modelos inadequados podem gerar resultados inadequados, mas nenhum processamento dos modelos propostos foi apresentado, para uma comparação de resultados.

KHAN (1974) explicou que no início do século XX edifícios em concreto armado eram limitados a apenas alguns poucos edifícios altos. Naquela época o sistema estrutural adotado era o de pórtico com vigas e pilares, o que tornava as construções dos edifícios altos mais caras e, em consequência, inviável economicamente. Dessa forma, ocorreu uma tendência natural para o desenvolvimento de novos sistemas estruturais que pudessem ser analisados através de modelos mais refinados. Para exemplificar, houve o surgimento de estruturas tubulares, mais especificamente de tubos aporticados. O autor discorreu sobre o comportamento do sistema tubular aporticado além de apresentar um modelo de pórtico plano para analisar o tubo aporticado. Todavia, o autor não fez nenhuma comparação numérica entre modelos planos e espaciais.

FUSCO (1976) afirmou que a complexidade dos modelos depende dos conhecimentos do projetista e dos recursos disponíveis para o seu cálculo e ressaltou que o projetista tem

limitações quanto às simplificações que pode admitir, pois elas não devem ignorar o comportamento real da estrutura como um todo. A adequação dos modelos estruturais adotados na etapa de análise da estrutura deve ser comprovada ao se realizar uma síntese estrutural, etapa indispensável do projeto, mesmo que seja feita de forma simplista. Explicou que, de modo geral, a maneira mais espontânea de se chegar ao modelamento estrutural de uma construção é através da análise das cargas que a solicitam. Este modelamento é feito empregando-se o projeto arquitetônico como sistema de referência. No entanto, o autor não fez nenhuma análise comparativa entre os resultados de modelos distintos para uma mesma estrutura.

CÂMARA JÚNIOR (1978) analisou os esforços em estruturas de edifícios contendo vigas e pilares de várias formas geométricas e com posições relativas quaisquer nos pavimentos, dotadas ou não de apoios elásticos, submetidas a carregamentos verticais e laterais e a recalques dos apoios. Admitiu a existência de lajes diafragmas no nível de cada piso. Para isto, foi desenvolvido um programa para computadores que utiliza o conceito de deslocamentos de conjunto de andares e efetua a montagem em blocos do sistema de equações de equilíbrio da estrutura. Entretanto, o autor não fez nenhuma análise, para uma mesma estrutura, através de diferentes modelos.

Na Coletânea Técnica do Uso do Aço para Edifícios de Andares Múltiplos – AÇOMINAS-SIDERBRÁS (1979) chamou-se a atenção para diversas cargas originadas de diversos fatores, para que o projetista possa conceber um edifício seguro e adequado aos fins a que se propõe. Além disso, foram apresentados diversos sistemas estruturais existentes à época. Afirmou-se que a escolha adequada do sistema estrutural depende de três fatores: cargas a serem consideradas, propriedades dos materiais a serem empregados na construção e solicitações na estrutura, decorrentes da transmissão das cargas através dos elementos estruturais até o solo. Entretanto, não foi realizada nenhuma comparação entre resultados de uma mesma estrutura analisada por diferentes modelos.

LIN e STOTESBURY (1981) salientaram que os profissionais de arquitetura e engenharia devem atuar em conjunto e que isto é um dos fatores importantes na concepção de bons sistemas estruturais. Afirmaram que em geral o sistema estrutural de um edifício de andares múltiplos é composto de subsistemas horizontais e verticais. Explicaram que os subsistemas horizontais precisam ser suportados pelos subsistemas verticais e que, por outro lado, os

subsistemas verticais não são muito estáveis por si próprios, por serem freqüentemente esbeltos no tocante a uma ou a ambas dimensões da seção transversal. Assim sendo, deve-se combinar estes subsistemas criteriosamente a fim de obter um sistema estrutural eficiente. Os autores apresentaram diversos exemplos de sistemas estruturais. No entanto, nenhuma comparação de resultados numéricos foi feita para modelos distintos utilizados no cálculo de um mesmo sistema estrutural.

VASCONCELLOS FILHO (1981) comentou sobre carregamentos e ações solicitantes que geralmente são usados na análise estrutural e apresentou sistemas e modelos estruturais usuais, simplificados e mais realistas. Explicou que após o lançamento de uma estrutura deve ser adotado um modelo estrutural capaz de representá-la adequadamente. Foram discutidas hipóteses simplificadoras e, dentre elas, a de se analisar a estrutura imaginando-a pronta ao se aplicar o carregamento vertical (sabe-se que a estrutura não é feita de uma só vez e que boa parte do carregamento já a solicita antes dela estar concluída). Acrescentou que a ação do carregamento horizontal (vento) torna-se mais importante quando o edifício está totalmente construído. Ainda neste trabalho, o autor discutiu sua posição contrária à de alguns profissionais que recusam-se a utilizar modelos estruturais mais realistas. Foram feitas análises estruturais para dois pórticos planos com 16 e 26 andares, respectivamente, através de três modelos distintos. Após as comparações entre os resultados, observaram-se divergências entre eles. Com isto, o autor mostrou que os resultados podem apresentar valores bastante discrepantes, ao se analisar uma mesma estrutura através de modelos diferentes.

SORIANO (1983) apresentou um trabalho no qual afirma ser praticamente impossível modelar de forma exata as estruturas de edifícios altos porque muitos aspectos podem ser considerados, mas cita o modelo tridimensional como muito versátil e capaz de considerar diversos detalhes estruturais. Neste trabalho, SORIANO apresentou dois exemplos de aplicação de modelo tridimensional utilizando dois edifícios reais. O primeiro exemplo, um edifício esbelto com 72 m de altura e relação de aspecto 7, foi analisado tridimensionalmente utilizando o programa apresentado em FONTE (1972). O segundo exemplo, um edifício de 69,15 m de altura, também foi analisado tridimensionalmente utilizando, neste caso, o programa apresentado em CÂMARA JÚNIOR (1978). Também fez referência ao sistema computacional ATEEL, destinado à análise tridimensional de edifícios altos.

SUSSEKIND (1984) explicou que as estruturas devem ser concebidas de modo a poderem resistir às ações horizontais e verticais a que possam estar submetidas ao longo de sua existência e que, além disto, independente do número de pavimentos e das dimensões em planta, seus sistemas de contraventamento devem ser estudados e adequadamente calculados. Propôs um modelo para análise de estruturas de edifícios, onde as lajes são consideradas com rigidez infinita no plano horizontal e a repartição das ações horizontais entre os sistemas de contraventamento é feita em função da rigidez de cada um deles. Porém, nenhuma comparação de resultados entre modelos distintos que representem um mesmo sistema estrutural foi realizada.

TARANATH (1988) salientou que a engenharia estrutural de edifícios altos requer o uso de diferentes sistemas estruturais para edifícios de diferentes alturas. Discutiu em detalhes sistemas estruturais verticais e horizontais para estruturas metálicas, estruturas em concreto e estruturas mistas. O autor também apresentou exemplos de modelos para a análise estrutural que vão desde modelos simplificados, como por exemplo o Método do Portal, até modelos mais refinados que utilizam o Método dos Elementos Finitos. Através de exemplos, mostrou preocupação com os resultados obtidos através desses modelos. Todavia, não fez nenhuma comparação entre resultados obtidos com modelos diferentes utilizados na análise de um mesmo sistema estrutural.

KRIPKA (1990) fez comentários a respeito da importância da ação do vento para a escolha do sistema estrutural a ser adotado, quando os esforços gerados pelas cargas laterais são significativos em relação aos esforços gerados pelo carregamento vertical. Analisou a consideração da seqüência de carregamento e construção na análise de edifícios, bem como as formas de melhor simular esta seqüência. Explicou que a ação do vento é menor para uma etapa intermediária de construção do que na estrutura completa, uma vez que ela aumenta com a altura da edificação. Salientou que programas com considerável grau de sofisticação efetuam a análise supondo que a estrutura só é solicitada após estar concluída. No caso das cargas verticais, todavia, a situação é bem diferente da que ocorre com a ação do vento. Neste contexto, o autor desenvolveu um programa para análise tanto pelo procedimento convencional como pelo procedimento incremental construtivo, sendo que este último permite a obtenção dos esforços finais e esforços de uma determinada etapa da construção. Utilizou dois edifícios reais (11 e 23 andares) e dois pórticos planos fictícios (4 e 36 andares). Verificou que o procedimento convencional de análise conduz a resultados pouco confiáveis,

pois a comparação entre resultados com o modelo seqüencial apresenta valores discrepantes. Desta forma, mostrou que em uma mesma estrutura calculada através de modelos distintos pode-se obter resultados diferentes.

STAFFORD SMITH e COULL (1991) afirmaram que modelos estruturais simplificados conduzem a análises rápidas nos estágios preliminares do projeto mas que para estágios finais e intermediários estas análises devem ser mais detalhadas e mais exatas. Ressaltaram que é muito raro, se não impossível, a construção de edifícios usando um único material e, desta forma, descreveram em detalhes vários modelos e sistemas estruturais para estruturas em concreto armado, estruturas metálicas e estruturas mistas. Salientaram que a escolha de um modelo estrutural adequado conduz a resultados de boa qualidade. Os autores apresentaram diversos modelos estruturais que vão desde os mais simples, no qual os cálculos podem ser realizados manualmente, até modelos estruturais mais sofisticados que necessitam do uso de microcomputadores. Entretanto não foi feito nenhum estudo comparando resultados obtidos através de modelos distintos para uma mesma estrutura.

FONTE (1992) estudou a análise geometricamente não-linear de edifícios altos em concreto armado, através de modelo tridimensional. Chamou a atenção para a necessidade e a viabilidade de realizar análises não-lineares em projetos de edifícios altos no Brasil. Explicou que a análise de estruturas de edifícios pode ser feita através de modelos bidimensionais (pórticos planos) ou tridimensionais (pórticos espaciais com laje) e fez a implementação computacional de um programa para análise geometricamente não-linear de estruturas tridimensionais de edifícios. Analisou o comportamento não-linear de quatro estruturas de edifícios em concreto armado que foram projetadas de acordo com a prática da engenharia convencional. Cada exemplo foi analisado através de três modelos distintos. Mostrou que podem ocorrer diferenças significativas nos resultados obtidos.

CORRÊA (1993) estudou estruturas de concreto e enfatizou que a análise estrutural deve ser feita com um modelo realista, capaz de representar com nitidez e segurança o desenvolvimento das ações solicitantes, desde o ponto de aplicação das cargas até as fundações da estrutura. Analisou algumas estruturas através de modelos distintos e mostrou que podem ocorrer discrepâncias entre os resultados. Salientou que o projetista de estruturas deve ser bastante cauteloso na simplificação das estruturas e lembrou que, na realidade, elas funcionam como elemento solidário. Esta conscientização é fundamental para que os

resultados correspondam ao comportamento real da estrutura. Sobre sistemas estruturais para resistir ao carregamento horizontal, afirmou que é bastante usual, na prática, uma concepção estrutural baseada em painéis planos e que tal procedimento pode ser adotado se houver simetria do carregamento e da estrutura ao longo de toda sua altura. Quando isso não ocorre, o autor recomenda a utilização de um sistema estrutural tridimensional. Ressaltou que alguns projetistas, muitas vezes, fazem uso de programas de cálculo estrutural sem informação e habilitação suficientes para o uso da ferramenta empregada. Discutiu conceitos básicos sobre a estrutura de um edifício alto e seus elementos constituintes fundamentais. Em seguida comentou sobre as idealizações a serem feitas para que a estrutura real possa ser representada por um modelo estrutural adequado. Utilizou o Método dos Elementos Finitos para a discretização do sistema estrutural e implementação do modelo que simula o comportamento da estrutura.

LARANJEIRAS (1993) afirmou que cerca de metade dos defeitos verificados nas construções tem sua origem na fase de projeto e, entre vários pontos e aspectos, citou como um dos pontos críticos o modelamento equivocado da estrutura para efeito de análise de esforços e de deformações. Por exemplo, é um equívoco desconsiderar as diferenças de modelamento sob carregamentos horizontais e verticais, ou tratar como planas estruturas com efeitos tridimensionais relevantes. Entretanto, nenhuma comparação entre modelos foi realizada.

FRANCO e ISYUMOV (1997) apresentaram um trabalho sobre a ação do vento atuando em um edifício alto de 155 m de altura em construção na cidade de São Paulo (Torre Norte do Centro Empresarial Nações Unidas – CENU). Três enfoques distintos foram considerados na análise: a) duas análises aleatórias simplificadas, baseadas em normas técnicas nas quais apenas um modo fundamental de vibração é considerado; b) uma análise determinística no domínio do tempo na qual 20 funções sintéticas de excitação do vento são aplicadas a um modelo matemático completo da estrutura; c) um estudo experimental em túnel-de-vento em um modelo físico rígido na escala de 1:400, seguido de uma análise numérica em dois modelos estruturais. Os resultados destas análises são comparados entre si. A informação experimental obtida é também brevemente discutida em termos de pressões e sucções locais do vento bem como as condições do vento ao nível do solo.

PEREZ (1999) estudou as diferenças entre os resultados dos esforços calculados, em uma mesma estrutura de edifício alto, através de nove modelos estruturais diferentes, sendo cinco

para carregamento vertical e quatro para carregamento lateral (vento). A análise foi feita através de um mesmo programa para cálculo estrutural. Apresentou uma ampla e detalhada análise comparativa dos resultados obtidos a fim de explicar as possíveis causas das igualdades ou diferenças observadas entre os resultados obtidos com os diversos modelos. Chamou a atenção para alguns aspectos importantes na elaboração de modelos estruturais que não representam adequadamente o comportamento real da estrutura e que, como consequência, podem apresentar resultados de qualidade duvidosa.

CIFÚ et al. (2000) ressaltaram que estão disponíveis no mercado programas que permitem a elaboração de modelos estruturais complexos, sem restrições quanto a sua caracterização geométrica, quanto ao comportamento dos materiais e quanto ao tipo de carregamento. Em face do exposto, em seu trabalho os autores procuraram alertar para os cuidados básicos a serem tomados na elaboração de modelos estruturais e na interpretação de seus resultados, principalmente quando são utilizados os grandes sistemas computacionais dirigidos à engenharia de estruturas. Para isto, foram estudados diversos exemplos e observados resultados com valores conflitantes. Desta maneira, Cifú et al. salientaram que cuidados na elaboração e interpretação dos modelos, capacidade e experiência profissional devem ser requisitos sempre presentes, que conduzem necessariamente a resultados mais confiáveis e seguros.

ASSIS (2001) desenvolveu um programa computacional para análise elástica de estruturas tridimensionais de edifícios de andares múltiplos em estrutura metálica. A teoria de 2º ordem é levada em conta simplificada considerando-se o efeito $P-\Delta$, por meio do modelo de carga lateral equivalente, e o efeito $M-\theta$. O programa permite que sejam adotados diversos sistemas estruturais capazes de resistirem às ações de forças laterais e verticais. Foi feita uma análise comparativa de resultados obtidos através do programa do autor com os fornecidos por um programa comercial largamente utilizado. No entanto, nenhum estudo de comparação entre modelos foi realizado.

DAVENPORT (2002) fez uma retrospectiva sobre o tratamento dado às ações do vento desde a década de 50 até os dias atuais. Comentou que a preocupação com os carregamentos laterais nas estruturas cresceu com o surgimento de edifícios muito altos. Essa preocupação aumentou, inicialmente, com as vibrações observadas nas estruturas e, conseqüentemente, com o desconforto dos ocupantes dos edifícios, devido à desagradável percepção humana.

Aliás, a influência das ações do vento tornou-se fator limitante para a concepção de edifícios. O autor salienta que a análise das ações do vento depende de vários fatores, tais como tamanho, forma, peso, altura e posição do edifício. Devido a estes fatores, o autor relembra que foram necessários sistemas estruturais mais adequados para resistir às ações do vento, uma vez que as estruturas tornavam-se cada vez mais esbeltas. Entretanto, nenhum estudo relacionado à comparação entre diferentes modelos para uma mesma estrutura foi realizado.

3

ESTRUTURAS ANALISADAS

Para este estudo, são utilizadas quatro estruturas distintas, em concreto armado, com pavimento tipo conforme mostrado nas FIG. 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente. Tratam-se de estruturas simples para facilitar a comparação entre os modelos estruturais analisados. As Estruturas 1, 2 e 3 possuem relação de aspecto 4 sendo que na Estrutura 4 a relação de aspecto varia de 2,7 a 8. Estes valores são comuns em estruturas de concreto armado. Admite-se para o módulo de elasticidade do concreto o valor $E_c = 21 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$.

Os edifícios suportados por estas estruturas têm 16 pavimentos tipos, com pé-direito de 3 metros. Para simplificar a análise dos resultados, não são incluídos pilotis e subsolo.

Todos os pilares são considerados engastados na fundação.

a) *Estrutura 1* - o exame da FIG. 3.1 mostra que a estrutura do edifício possui dois planos verticais de simetria e é composta de:

- onze pilares com dimensões 20 cm x 60 cm e quatro pilares com dimensões 60 cm x 20 cm;
- oito vigas com dimensões 20 cm x 60 cm, em cada pavimento;
- oito lajes com 10 cm de espessura, em cada pavimento.

b) *Estrutura 2* - o exame da FIG. 3.2 mostra que a estrutura do edifício possui dois planos verticais de simetria e é composta de:

- dezenove pilares com dimensões 20 cm x 60 cm e quatro pilares com dimensões 60 cm x 20 cm;
- oito vigas com dimensões 20 cm x 60 cm, em cada pavimento;
- oito lajes com 10 cm de espessura, em cada pavimento.

c) *Estrutura 3* - o exame da FIG. 3.3 mostra que a estrutura do edifício possui um plano vertical de simetria e é composta de:

- onze pilares com dimensões 20 cm x 60 cm e quatro pilares com dimensões 60 cm x 20 cm;
- oito vigas com dimensões 20 cm x 60 cm, em cada pavimento;
- oito lajes com 10 cm de espessura, em cada pavimento;
- um núcleo estrutural composto de três paredes com 20 cm de espessura.

d) *Estrutura 4* - o exame da FIG. 3.4 mostra que a estrutura do edifício não possui plano de simetria e é composta de:

- onze pilares com dimensões 20 cm x 60 cm e quatro pilares com dimensões 60 cm x 20 cm;
- nove vigas com dimensões 20 cm x 60 cm, em cada pavimento;
- sete lajes com 10 cm de espessura, em cada pavimento.

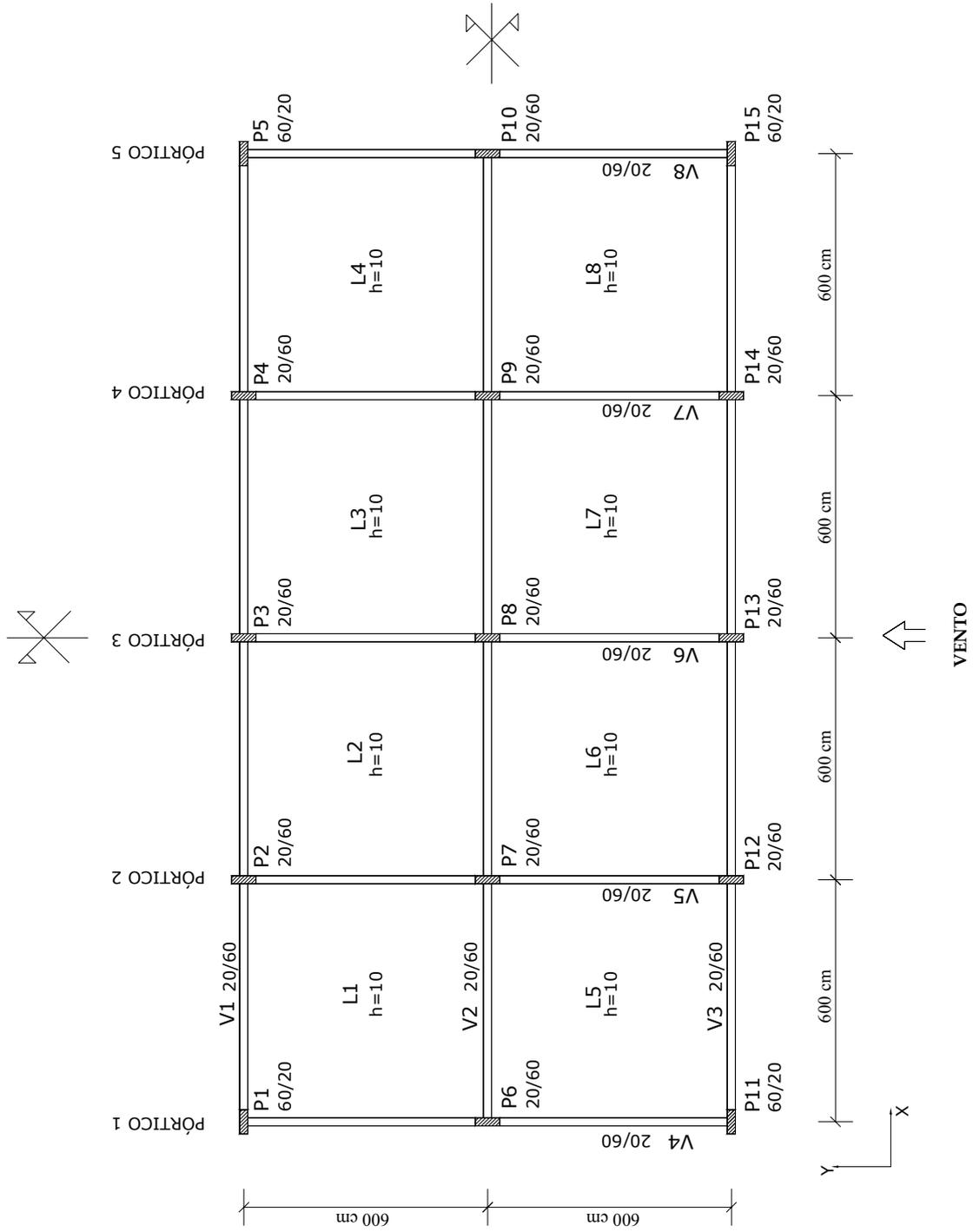


FIGURA 3.1 – Forma do pavimento tipo da Estrutura 1.

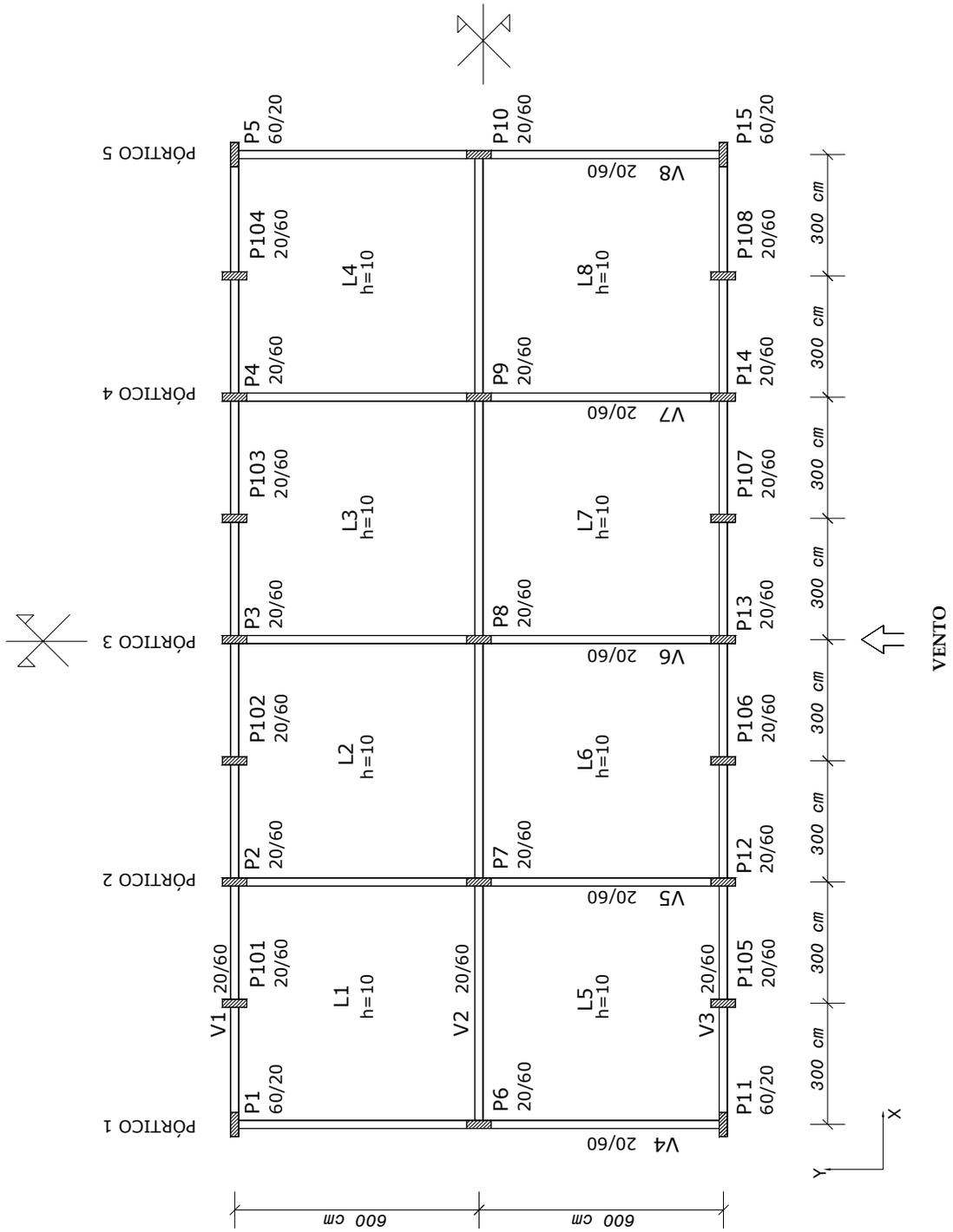


FIGURA 3.2 – Forma do pavimento tipo da Estrutura 2.

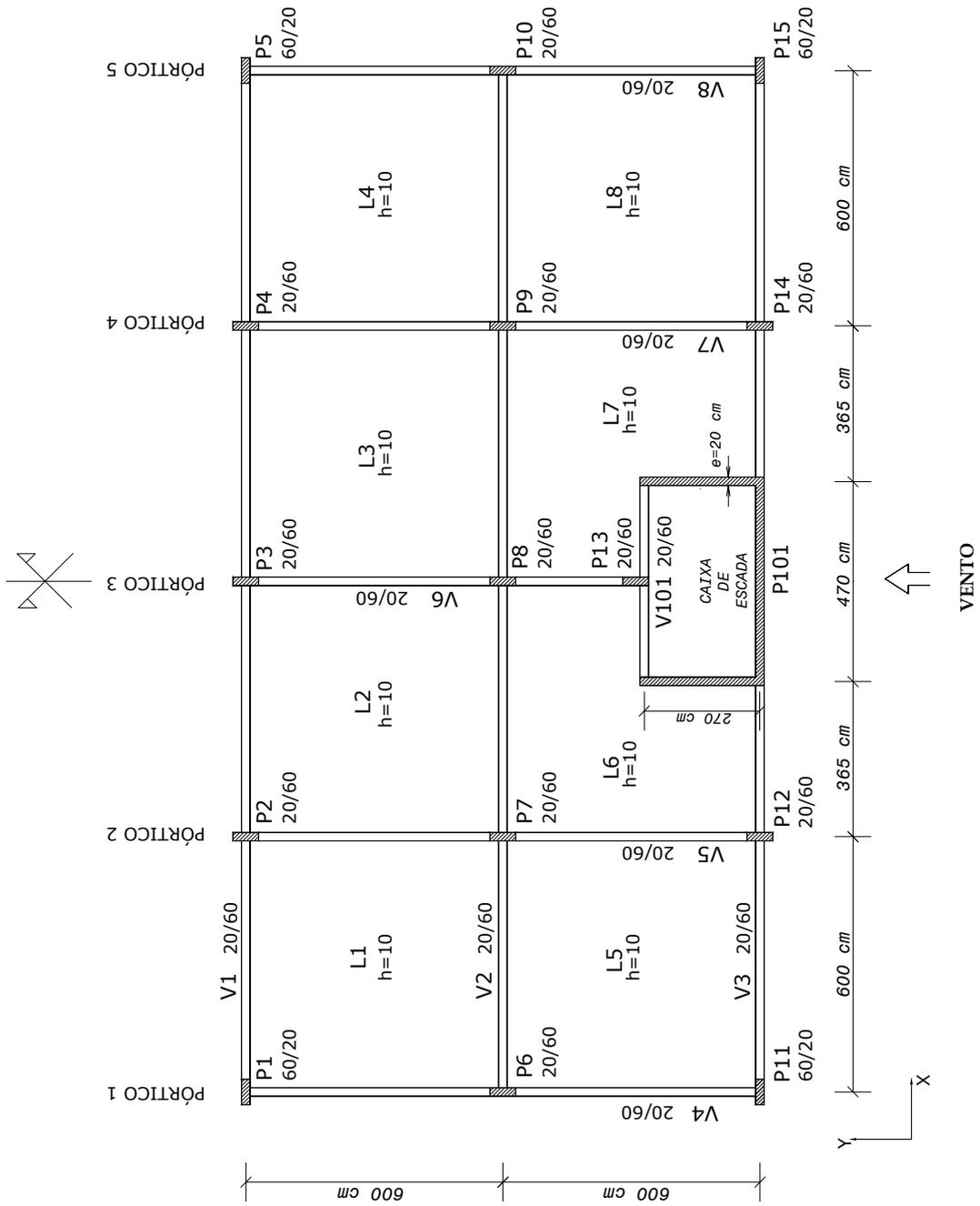


FIGURA 3.3 – Forma do pavimento tipo da Estrutura 3.

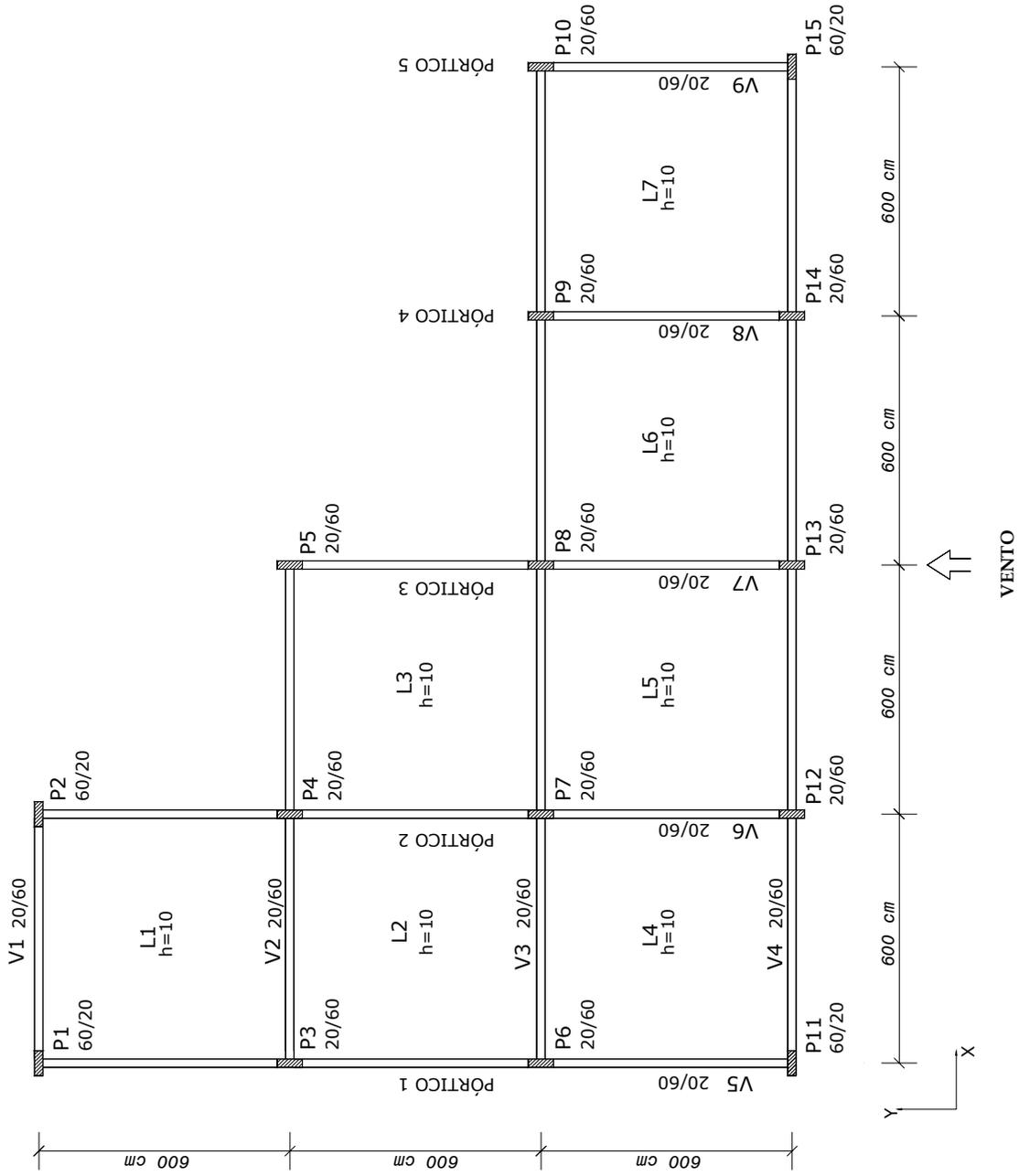


FIGURA 3.4 – Forma do pavimento tipo da Estrutura 4.

4

CARREGAMENTO

Para efeito de comparação dos modelos, são irrelevantes os valores adotados para as forças laterais aplicadas às Estruturas 1, 2, 3 e 4.

Assim sendo, as forças consideradas são provenientes da ação do vento, todas de natureza estática, e foram obtidas automaticamente pelo programa TQS[®] em função de parâmetros previamente estabelecidos, de acordo com a NBR 6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações.

Pela própria natureza deste trabalho, é considerado que todas as estruturas sofrem a ação de forças laterais apenas na direção Y. Isto porque a ação do vento na direção X seria analisada de forma análoga à da direção Y.

Na FIG. 4.1 estão mostradas as forças equivalentes à ação do vento, aplicadas nas 16 lajes dos quatro edifícios.

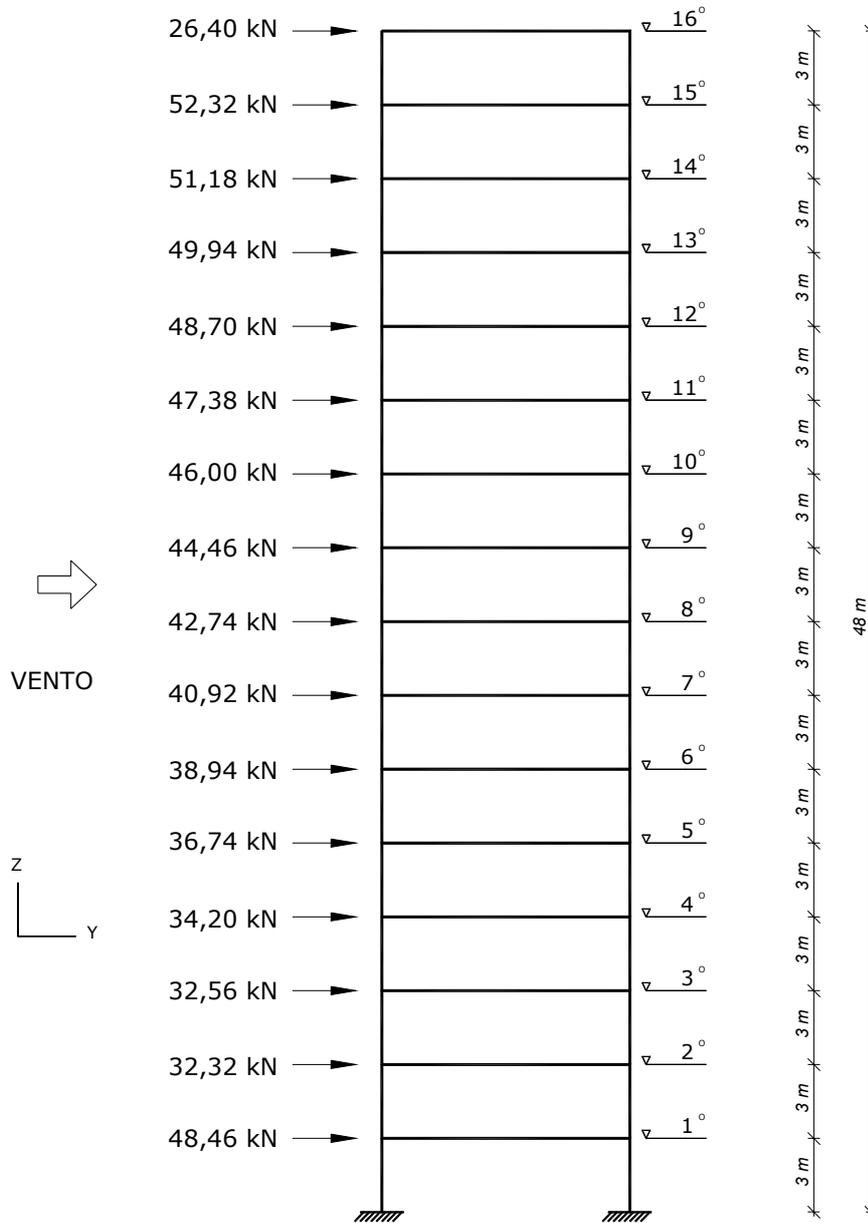


FIGURA 4.1 – Esquema das forças, equivalentes à ação total do vento, aplicadas em cada laje na direção Y.

Somando-se as força da FIG. 4.1 vê-se que a força total do vento é igual $F_{\text{VENTO}} = 673,26 \text{ kN}$.

5

MODELOS COMPARADOS

Admite-se a análise elástica-linear em todos os cálculos comparativos feitos a seguir. Nesta análise é desprezada a contribuição das deformações de cisalhamento.

Existem vários modelos que podem ser usados para a análise do carregamento horizontal que atua em uma estrutura (PEREZ, 1999). Neste trabalho são analisados e comparados quatro modelos usuais em projetos estruturais, a saber (VASCONCELLOS FILHO, 1981):

- Modelo Pórticos Planos Independentes com Áreas de Influência (PPI-AI);
- Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT);
- Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA);
- Modelo Pórtico Espacial (PE).

5.1 - Modelo Pórticos Planos Independentes com Áreas de Influência (PPI-AI)

Neste modelo, admite-se que apenas os pórticos planos paralelos ao plano YZ resistem à ação do vento na direção Y. Núcleos estruturais e pilares isolados, se for o caso, também podem colaborar nesta resistência.

A contribuição dos pilares isolados, na Estrutura 2, é desprezada.

Na Estrutura 3, o núcleo estrutural (caixa de escada) é incorporado ao Pórtico 3.

Cada pórtico trabalha isoladamente.

Neste modelo o vigeamento transversal na direção X não tem qualquer influência nos resultados obtidos.

Para facilitar a determinação das áreas de influência, a forma do pavimento tipo da Estrutura 1 está mostrada na FIG. 5.1.

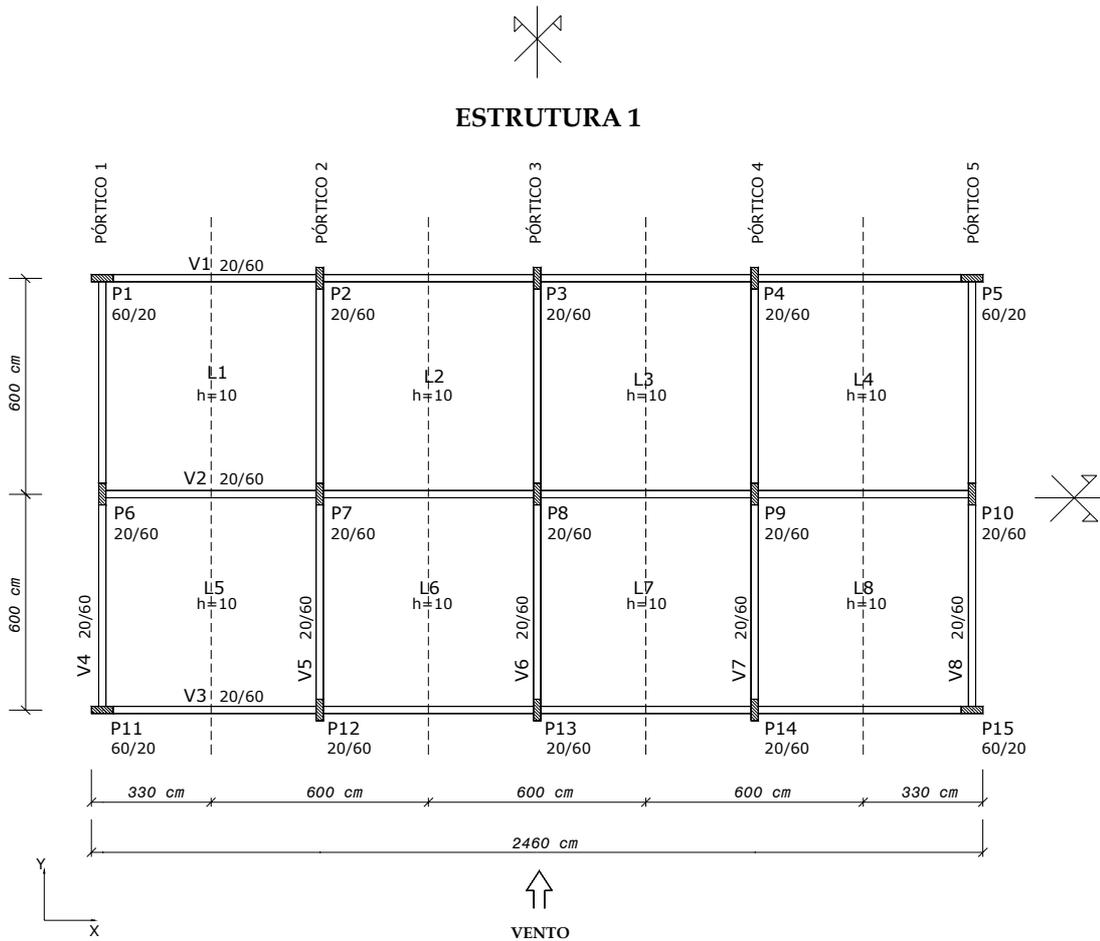


FIGURA 5.1 – Esquema das áreas de influência da Estrutura 1.

Todas as elevações referentes ao Modelo Pórticos Planos Independentes com Áreas de Influência (PPI-AI), estão representadas nas FIG. 5.2, 5.3 e 5.4.

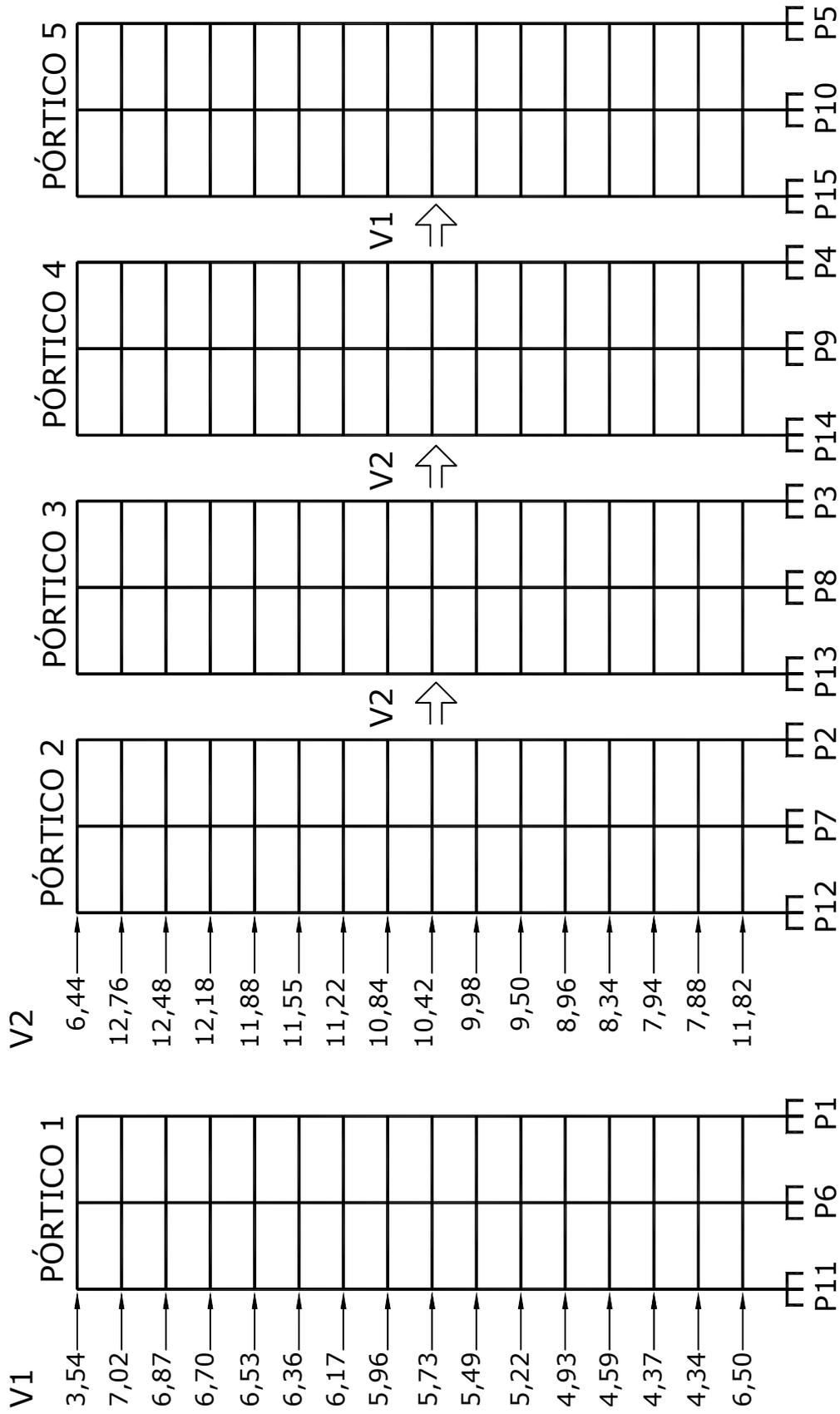


FIGURA 5.2 – Modelo Pórticos Planos Independentes com Áreas de Influência (PPI-AI) das Estruturas 1 e 2: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN).

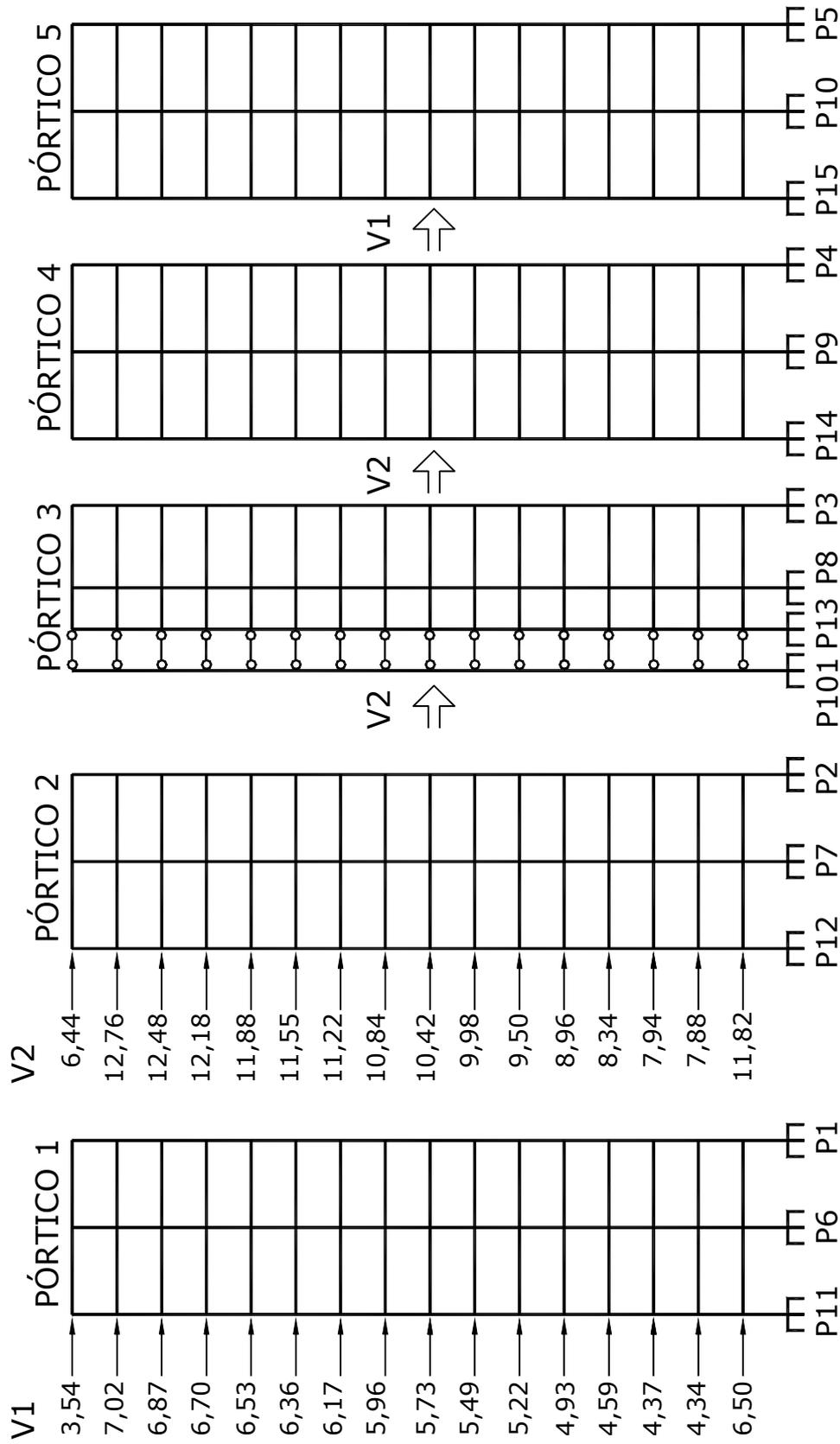


FIGURA 5.3 – Modelo Pórticos Planos Independentes com Áreas de Influência (PPI-AI) da Estrutura 3: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN).

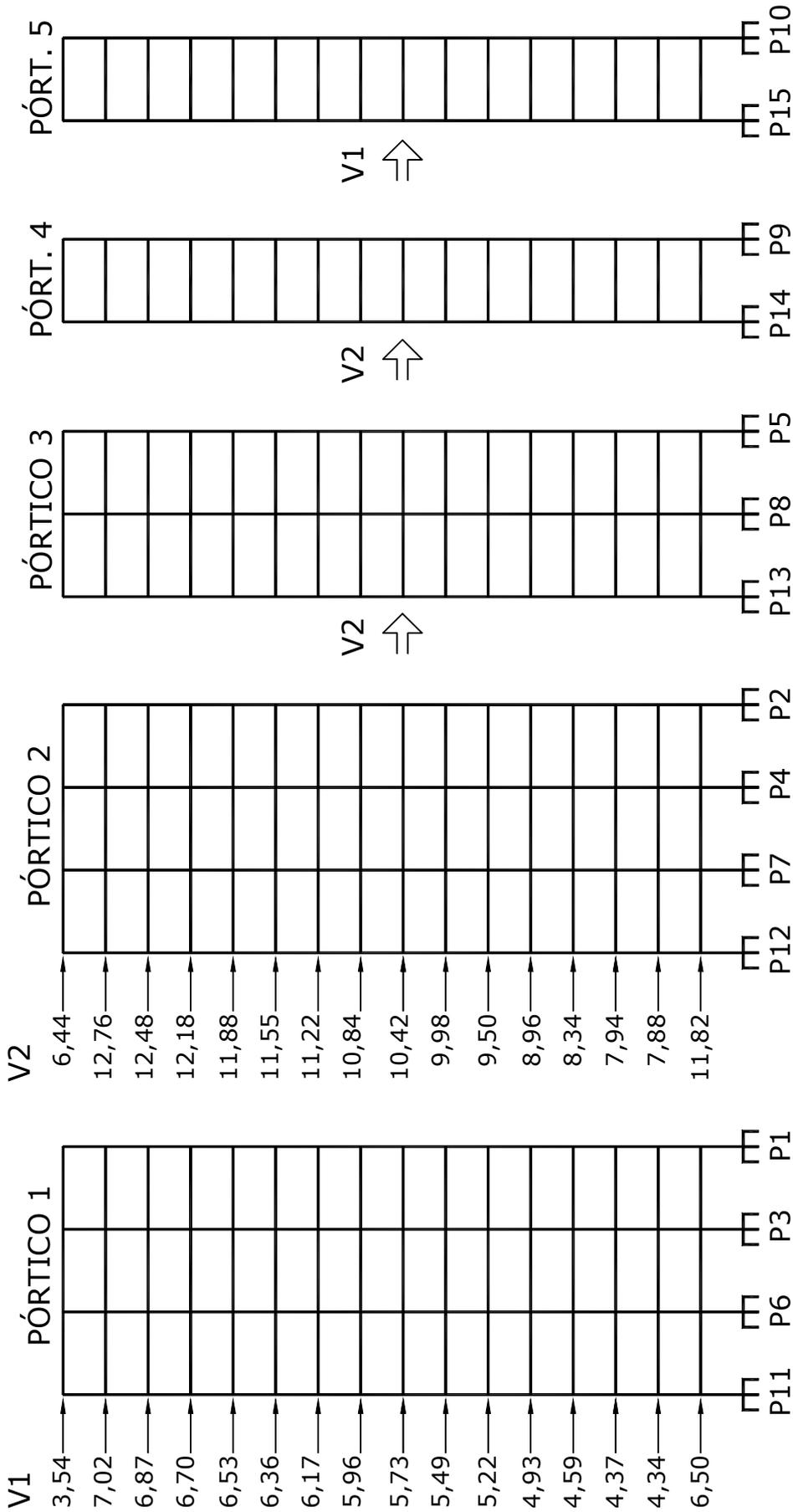


FIGURA 5.4 – Modelo Pórticos Planos Independentes com Áreas de Influência (PPI-AI) da Estrutura 4: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN).

V1, V2, V3, V4 e V5 nas figuras do Modelo PPI-AI representam, respectivamente, os quinhões de carga do vento que os pórticos Pórtico 1, Pórtico 2, Pórtico 3, Pórtico 4 e Pórtico 5 recebem em função de suas áreas de influência.

A seguir, apresenta-se uma memória de cálculo resumida para determinação de V1, V2, V3, V4 e V5 na Estrutura 1. Esta memória foi organizada de acordo com as Notas de Aula sobre Técnicas Aproximadas de Análise de Edifícios Altos (VASCONCELLOS FILHO, 2001).

Para os cálculos apresentados a seguir, deve-se referir à FIG. 5.1. Note-se que a altura total da Estrutura 1 é de 48 m.

→ cálculo das áreas de influência AI_i dos Pórticos i:

$$AI_1 = 3,30 \times 48,00 = 158,40 \text{ m}^2$$

$$AI_2 = 6,00 \times 48,00 = 288,00 \text{ m}^2$$

$$AI_3 = 6,00 \times 48,00 = 288,00 \text{ m}^2$$

Por simetria,

$$AI_4 = AI_2 = 288,00 \text{ m}^2$$

$$AI_5 = AI_1 = 158,40 \text{ m}^2$$

→ cálculo da área da fachada $A_{FACHADA}$ do edifício:

$$A_{FACHADA} = 24,60 \times 48,00 = 1180,80 \text{ m}^2$$

→ cálculo dos quinhões de área de influência em porcentagem $AI_i\%$ dos Pórticos i:

$$AI_i\% = (AI_i/A_{FACHADA}) \times 100\%$$

$$AI_1\% = (158,40/1180,80) \times 100,00\% = 13,41\%$$

$$AI_2\% = (288,00/1180,80) \times 100,00\% = 24,39\%$$

$$AI_3\% = (288,00/1180,80) \times 100,00\% = 24,39\%$$

Por simetria,

$$AI_4\% = AI_2\% = 24,39\%$$

$$AI_5\% = AI_1\% = 13,41\%$$

→ cálculo dos quinhões de carga do vento V_i dos Pórticos i :

$$\text{quinhão de carga } V_i = A_i \% \times (\text{ação total do vento})$$

(ação total do vento) \Rightarrow ver FIG. 4.1

$$\text{quinhão de carga } V_1 = 0,1341 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\text{quinhão de carga } V_2 = 0,2439 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\begin{aligned} \text{quinhão de carga } V_3 &= 0,2439 \times (\text{ação total do vento}) = \\ &= \text{quinhão de carga } V_2 \end{aligned}$$

Por simetria,

$$\text{quinhão de carga } V_4 = \text{quinhão de carga } V_2$$

$$\text{quinhão de carga } V_5 = \text{quinhão de carga } V_1$$

Examinando as FIG. 5.2, 5.3 e 5.4, constata-se que os quinhões de carga do vento nas Estruturas 2, 3 e 4 são idênticos aos da Estrutura 1.

Na TAB. 5.1 são mostrados os quinhões de carga do vento V_1 e V_2 .

TABELA 5.1 – Quinhões de carga nas Estruturas 1, 2, 3 e 4 no Modelo PPI-AI.

Laje	Ação Total do Vento (kN)	Quinhão V1 (kN)	Quinhão V2 (kN)
16°	26,40	3,54	6,44
15°	52,32	7,02	12,76
14°	51,18	6,87	12,48
13°	49,94	6,70	12,18
12°	48,70	6,53	11,88
11°	47,38	6,36	11,55
10°	46,00	6,17	11,22
9°	44,46	5,96	10,84
8°	42,74	5,73	10,42
7°	40,92	5,49	9,98
6°	38,94	5,22	9,50
5°	36,74	4,93	8,96
4°	34,20	4,59	8,34
3°	32,56	4,37	7,94
2°	32,32	4,34	7,88
1°	48,46	6,50	11,82

5.2 - Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT)

Neste modelo, admite-se que apenas os pórticos planos paralelos ao plano YZ resistem à ação do vento na direção Y. Núcleos estruturais e pilares isolados, se for o caso, também podem colaborar nesta resistência.

Na Estrutura 2, os pilares isolados são unidos aos pares por barras bi-rotuladas de grande rigidez axial.

Na Estrutura 3, o núcleo estrutural (caixa de escada) é incorporado ao Pórtico 3.

Cada pórtico trabalha isoladamente assim como os pares de pilares isolados ligados por barras bi-rotuladas.

Neste modelo o vigeamento transversal na direção X não tem qualquer influência nos resultados obtidos.

Todas as elevações referentes ao Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT) estão representadas nas FIG. 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9.

V1, V2, V3, V4, V5 e V6, nas figuras do Modelo PPI-CT, representam os quinhões de carga do vento que cada pórtico e par de pilares isolados recebem em função de sua rigidez lateral e da compatibilização dos deslocamentos laterais no topo.

A seguir, apresenta-se uma memória de cálculo resumida para determinação dos quinhões de carga V_i em cada estrutura. Esta memória foi organizada de acordo com as Notas de Aula sobre Técnicas Aproximadas de Análise de Edifícios Altos (VASCONCELLOS FILHO, 2001). Note-se que esta memória é um caso particular da memória relativa à Estrutura 4, a ser vista, desde que se faça $\theta = 0$ na FIG. 5.5.

a) Estrutura 1:

→ cálculo do coeficiente de rigidez K_1 do Pórtico 1:

F_{VENTO} = força lateral total do vento = soma das forças da FIG. 4.1

Δ_{TOPO} = deslocamento lateral no topo do Pórtico 1, sujeito à ação total do vento, obtido processando-se este pórtico

K_1 = rigidez lateral do Pórtico 1

$$F_{\text{VENTO}} = 673,26 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{TOPO}} = 0,43337 \text{ m}$$

$$F_{\text{VENTO}} = K_1 \times \Delta_{\text{TOPO}} \therefore K_1 = F_{\text{VENTO}}/\Delta_{\text{TOPO}}$$

$$K_1 = 673,26/0,43337 = 1553,54 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K_2 do Pórtico 2:

$$F_{\text{VENTO}} = 673,26 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{TOPO}} = 0,27775 \text{ m}$$

$$F_{\text{VENTO}} = K_2 \times \Delta_{\text{TOPO}} \therefore K_2 = F_{\text{VENTO}}/\Delta_{\text{TOPO}}$$

$$K_2 = 673,26/0,27775 = 2423,98 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K_3 do Pórtico 3:

$$F_{\text{VENTO}} = 673,26 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{TOPO}} = 0,27775 \text{ m}$$

$$F_{\text{VENTO}} = K_3 \times \Delta_{\text{TOPO}} \therefore K_3 = F_{\text{VENTO}}/\Delta_{\text{TOPO}}$$

$$K_3 = 673,26/0,27775 = 2423,98 \text{ kN/m}$$

→ cálculo dos coeficientes de rigidez K_4 e K_5 dos Pórticos 4 e 5, respectivamente:

Por simetria,

$$K_4 = K_2 = 2423,98 \text{ kN/m}$$

$$K_5 = K_1 = 1553,54 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K total da Estrutura 1:

$$K = \Sigma K_i = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5$$

$$K = 1553,54 + 2423,98 + 2423,98 + 2423,98 + 1553,54 = 10379,02 \text{ kN/m}$$

→ cálculo dos quinhões de rigidez em porcentagem $K_i\%$ dos Pórticos 1 e 5:

$$K_i\% = (K_i/\Sigma K_i) \times 100\%$$

$$K_1\% = (1553,54/10379,02) \times 100\% = 14,97\%$$

Por simetria,

$$K_5\% = K_1\% = 14,97\%$$

→ cálculo dos quinhões de rigidez em porcentagem $K_i\%$ dos Pórticos 2 e 4:

$$K_2\% = (2423,98/10379,02) \times 100\% = 23,35\%$$

Por simetria,

$$K_4\% = K_2\% = 23,35\%$$

→ cálculo do quinhão de rigidez em porcentagem $K_3\%$ do Pórtico 3:

$$K_3\% = (2423,98/10379,02) \times 100\% = 23,35\%$$

→ cálculo dos quinhões de carga do vento V_i dos Pórticos i :

$$\text{quinhão de carga } V_i = K_i\% \times (\text{ação total do vento})$$

(ação total do vento) \Rightarrow ver FIG. 4.1

$$\text{quinhão de carga } V_1 = 0,1497 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\text{quinhão de carga } V_2 = 0,2335 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\text{quinhão de carga } V_3 = 0,2335 \times (\text{ação total do vento}) =$$

$$= \text{quinhão de carga } V_2$$

Por simetria,

$$\text{quinhão de carga } V_4 = \text{quinhão de carga } V_2$$

$$\text{quinhão de carga } V_5 = \text{quinhão de carga } V_1$$

Na TAB. 5.2 são mostrados os quinhões de carga do vento V1 e V2.

TABELA 5.2 – Quinhões de carga na Estrutura 1 no Modelo PPI-CT.

Laje	Ação Total do Vento (kN)	Quinhão V1 (kN)	Quinhão V2 (kN)
16°	26,40	3,95	6,16
15°	52,32	7,83	12,22
14°	51,18	7,66	11,95
13°	49,94	7,48	11,66
12°	48,70	7,29	11,37
11°	47,38	7,09	11,06
10°	46,00	6,89	10,74
9°	44,46	6,65	10,38
8°	42,74	6,40	9,98
7°	40,92	6,13	9,55
6°	38,94	5,83	9,09
5°	36,74	5,50	8,58
4°	34,20	5,12	7,98
3°	32,56	4,87	7,60
2°	32,32	4,84	7,55
1°	48,46	7,25	11,32

b) Estrutura 2:

→ cálculo dos coeficientes de rigidez K_1 e K_5 dos Pórticos 1 e 5:

Estes coeficientes de rigidez são idênticos aos dos Pórticos 1 e 5 da Estrutura 1,

$$K_1 = K_5 = 1553,54 \text{ kN/m}$$

→ cálculo dos coeficientes de rigidez K_2 , K_3 e K_4 dos Pórticos 2, 3 e 4:

Estes coeficientes de rigidez são idênticos aos dos Pórticos 2, 3 e 4 da Estrutura 1,

$$K_2 = K_3 = K_4 = 2423,98 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K_{101} do par de Pilares Isolados (P101+P105):

$$F_{\text{VENTO}} = 673,26 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{TOPO}} = 73,05670 \text{ m}$$

$$F_{\text{VENTO}} = K_{101} \times \Delta_{\text{TOPO}} \therefore K_{101} = F_{\text{VENTO}}/\Delta_{\text{TOPO}}$$

$$K_{101} = 673,26/73,05670 = 9,21 \text{ kN/m}$$

→ cálculo dos coeficientes de rigidez K_{102} , K_{103} e K_{104} dos pares de Pilares Isolados (P102+P106), (P103+P107) e (P104+P108), respectivamente:

Por simetria,

$$K_{102} = K_{103} = K_{104} = K_{101} = 9,21 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K total da Estrutura 2:

$$K = \sum K_i = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_{101} + K_{102} + K_{103} + K_{104}$$

$$K = 1553,54 + 2423,98 + 2423,98 + 2423,98 + 1553,54 + 9,21 + 9,21 + 9,21 + 9,21$$

$$K = 10415,86 \text{ kN/m}$$

→ cálculo dos quinhões de rigidez em porcentagem $K_i\%$ dos Pórticos 1 e 5:

$$K_i\% = (K_i/\sum K_i) \times 100\%$$

$$K_1\% = (1553,54/10415,86) \times 100\% = 14,91\%$$

Por simetria,

$$K_5\% = K_1\% = 14,91\%$$

→ cálculo dos quinhões de rigidez em porcentagem $K_i\%$ dos Pórticos 2 e 4:

$$K_2\% = (2423,98/10415,86) \times 100\% = 23,27\%$$

Por simetria,

$$K_4\% = K_2\% = 23,27\%$$

→ cálculo do quinhão de rigidez em porcentagem $K_3\%$ do Pórtico 3:

$$K_3\% = (2423,98/10415,86) \times 100\% = 23,27\%$$

→ cálculo dos quinhões de rigidez em porcentagem $K_{(P_i+P_j)\%}$ dos pares de Pilares Isolados (P101+P105), (P102+P106), (P103+P107) e (P104+P108):

$$K_{(P101+P105)\%} = (9,21/10415,86) \times 100\% = 0,09\%$$

Por simetria,

$$K_{(P102+P106)}\% = K_{(P103+P107)}\% = K_{(P104+P108)}\% = K_{(P101+P105)}\% = 0,09\%$$

→ cálculo dos quinhões de carga do vento V_i dos Pórticos i:

$$\text{quinhão de carga } V_i = K_i\% \times (\text{ação total do vento})$$

(ação total do vento) \Rightarrow ver FIG. 4.1

$$\text{quinhão de carga } V_1 = 0,1491 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\text{quinhão de carga } V_2 = 0,2327 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\text{quinhão de carga } V_3 = 0,2327 \times (\text{ação total do vento}) =$$

$$= \text{quinhão de carga } V_2$$

Por simetria,

$$\text{quinhão de carga } V_4 = \text{quinhão de carga } V_2$$

$$\text{quinhão de carga } V_5 = \text{quinhão de carga } V_1$$

→ cálculo do quinhão de carga do vento V_6 dos pares de Pilares Isolados (P101+P105), (P102+P106), (P103+P107) e (P104+P108):

$$\text{quinhão de carga } V_6 = 0,0009 \times (\text{ação total do vento})$$

(ação total do vento) \Rightarrow ver FIG. 4.1

Na TAB. 5.3 são mostrados os quinhões de carga do vento V1, V2 e V6.

TABELA 5.3 – Quinhões de carga na Estrutura 2 no Modelo PPI-CT.

Laje	Ação Total do Vento (kN)	Quinhão V1 (kN)	Quinhão V2 (kN)	Quinhão V6 (kN)
16°	26,40	3,94	6,14	0,02
15°	52,32	7,80	12,17	0,05
14°	51,18	7,63	11,91	0,05
13°	49,94	7,45	11,62	0,04
12°	48,70	7,26	11,33	0,04
11°	47,38	7,06	11,02	0,04
10°	46,00	6,86	10,70	0,04
9°	44,46	6,63	10,34	0,04
8°	42,74	6,37	9,94	0,04
7°	40,92	6,10	9,52	0,04
6°	38,94	5,80	9,06	0,03
5°	36,74	5,48	8,55	0,03
4°	34,20	5,10	7,96	0,03
3°	32,56	4,85	7,58	0,03
2°	32,32	4,82	7,52	0,03
1°	48,46	7,22	11,28	0,04

c) Estrutura 3:

→ cálculo dos coeficientes de rigidez K_1 e K_5 dos Pórticos 1 e 5:

Estes coeficientes de rigidez são idênticos aos dos Pórticos 1 e 5 da Estrutura 1,

$$K_1 = K_5 = 1553,54 \text{ kN/m}$$

→ cálculo dos coeficientes de rigidez K_2 e K_4 dos Pórticos 2 e 4:

Estes coeficientes de rigidez são idênticos aos dos Pórticos 2 e 4 da Estrutura 1,

$$K_2 = K_4 = 2423,98 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K_3 do Pórtico 3:

$$F_{\text{VENTO}} = 673,26 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{TOPO}} = 0,14010 \text{ m}$$

$$F_{\text{VENTO}} = K_3 \times \Delta_{\text{TOPO}} \therefore K_3 = F_{\text{VENTO}}/\Delta_{\text{TOPO}}$$

$$K_3 = 673,26/0,14010 = 4805,57 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K total da Estrutura 3:

$$K = \Sigma K_i = 2K_1 + 2K_2 + K_3 = 2(1553,54) + 2(2423,98) + (4805,57)$$

$$K = 12760,61 \text{ kN/m}$$

→ cálculo dos quinhões de rigidez em porcentagem $K_i\%$ dos Pórticos 1 e 5:

$$K_i\% = (K_i/\Sigma K_i) \times 100\%$$

$$K_1\% = (1553,54/12760,61) \times 100\% = 12,17\%$$

Por simetria,

$$K_5\% = K_1\% = 12,17\%$$

→ cálculo dos quinhões de rigidez em porcentagem $K_i\%$ dos Pórticos 2 e 4:

$$K_2\% = (2423,98/12760,61) \times 100\% = 19,00\%$$

Por simetria,

$$K_4\% = K_2\% = 19,00\%$$

→ cálculo do quinhão de rigidez em porcentagem $K_3\%$ do Pórtico 3:

$$K_3\% = (4805,57/12760,61) \times 100\% = 37,66\%$$

$$K_3\% = 37,66\%$$

→ cálculo dos quinhões de carga do vento V1, V2, V3, V4 e V5:

$$\text{quinhão de carga } V_i = K_i\% \times (\text{ação total do vento})$$

$$(\text{ação total do vento}) \Rightarrow \text{ver FIG. 4.1}$$

$$\text{quinhão de carga } V1 = 0,1217 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\text{quinhão de carga } V2 = 0,1900 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\text{quinhão de carga } V3 = 0,3766 \times (\text{ação total do vento})$$

Por simetria,

$$\text{quinhão de carga } V4 = \text{quinhão de carga } V2$$

$$\text{quinhão de carga } V5 = \text{quinhão de carga } V1$$

Na TAB. 5.4 são mostrados os quinhões de carga do vento V1, V2 e V3.

TABELA 5.4 – Quinhões de carga na Estrutura 3 no Modelo PPI-CT.

Laje	Ação Total do Vento (kN)	Quinhão V1 (kN)	Quinhão V2 (kN)	Quinhão V3 (kN)
16°	26,40	3,21	5,02	9,94
15°	52,32	6,37	9,94	19,70
14°	51,18	6,23	9,72	19,27
13°	49,94	6,08	9,49	18,81
12°	48,70	5,93	9,25	18,34
11°	47,38	5,77	9,00	17,84
10°	46,00	5,60	8,74	17,32
9°	44,46	5,41	8,45	16,74
8°	42,74	5,20	8,12	16,09
7°	40,92	4,98	7,77	15,41
6°	38,94	4,74	7,40	14,66
5°	36,74	4,47	6,98	13,84
4°	34,20	4,16	6,50	12,88
3°	32,56	3,96	6,19	12,26
2°	32,32	3,93	6,14	12,17
1°	48,46	5,90	9,21	18,25

d) Estrutura 4:

→ cálculo do coeficiente de rigidez K_1 do Pórtico 1:

$$F_{\text{VENTO}} = 673,26 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{TOPO}} = 0,23501 \text{ m}$$

$$F_{\text{VENTO}} = K_1 \times \Delta_{\text{TOPO}} \therefore K_1 = F_{\text{VENTO}}/\Delta_{\text{TOPO}}$$

$$K_1 = 673,26/0,23501 = 2864,81 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K_2 do Pórtico 2:

$$F_{\text{VENTO}} = 673,26 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{TOPO}} = 0,20148 \text{ m}$$

$$F_{\text{VENTO}} = K_2 \times \Delta_{\text{TOPO}} \therefore K_2 = F_{\text{VENTO}}/\Delta_{\text{TOPO}}$$

$$K_2 = 673,26/0,20148 = 3341,57 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K_3 do Pórtico 3:

$$F_{\text{VENTO}} = 673,26 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{TOPO}} = 0,27764 \text{ m}$$

$$F_{\text{VENTO}} = K_3 \times \Delta_{\text{TOPO}} \therefore K_3 = F_{\text{VENTO}}/\Delta_{\text{TOPO}}$$

$$K_3 = 673,26/0,27764 = 2424,94 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K_4 do Pórtico 4:

$$F_{\text{VENTO}} = 673,26 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{TOPO}} = 0,62986 \text{ m}$$

$$F_{\text{VENTO}} = K_4 \times \Delta_{\text{TOPO}} \therefore K_4 = F_{\text{VENTO}}/\Delta_{\text{TOPO}}$$

$$K_4 = 673,26/0,62986 = 1068,90 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K_5 do Pórtico 5:

$$F_{\text{VENTO}} = 673,26 \text{ kN}$$

$$\Delta_{\text{TOPO}} = 0,90601 \text{ m}$$

$$F_{\text{VENTO}} = K_5 \times \Delta_{\text{TOPO}} \therefore K_5 = F_{\text{VENTO}}/\Delta_{\text{TOPO}}$$

$$K_5 = 673,26/0,90601 = 743,10 \text{ kN/m}$$

→ cálculo do coeficiente de rigidez K total da Estrutura 4:

$$K = \Sigma K_i = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5$$

$$K = 2864,81 + 3341,57 + 2424,94 + 1068,90 + 743,10$$

$$K = 10443,33 \text{ kN/m}$$

A seguir, apresenta-se na FIG.5.5 um esquema das forças atuantes na laje do topo da Estrutura 4, a partir do qual são determinados os quinhões de carga do vento V_i nos pórticos (VASCONCELLOS FILHO, 2001), onde:

 = molas simulando os pórticos

$F_i = F_1, F_2, F_3, F_4$ e F_5 = forças nas molas

$\Delta_i = \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$ e Δ_5 = encurtamentos das molas

= deslocamentos dos pontos de aplicação das forças F_i

θ = rotação da laje do topo

$x_i = x_1, x_2, x_3, x_4$ e x_5 = abscissas dos pontos de aplicação das forças F_i

$K_i = K_1, K_2, K_3, K_4$ e K_5 = rigidezes das molas

= rigidezes laterais dos pórticos

\bar{x} = abscissa do ponto de aplicação da força F_{VENTO}

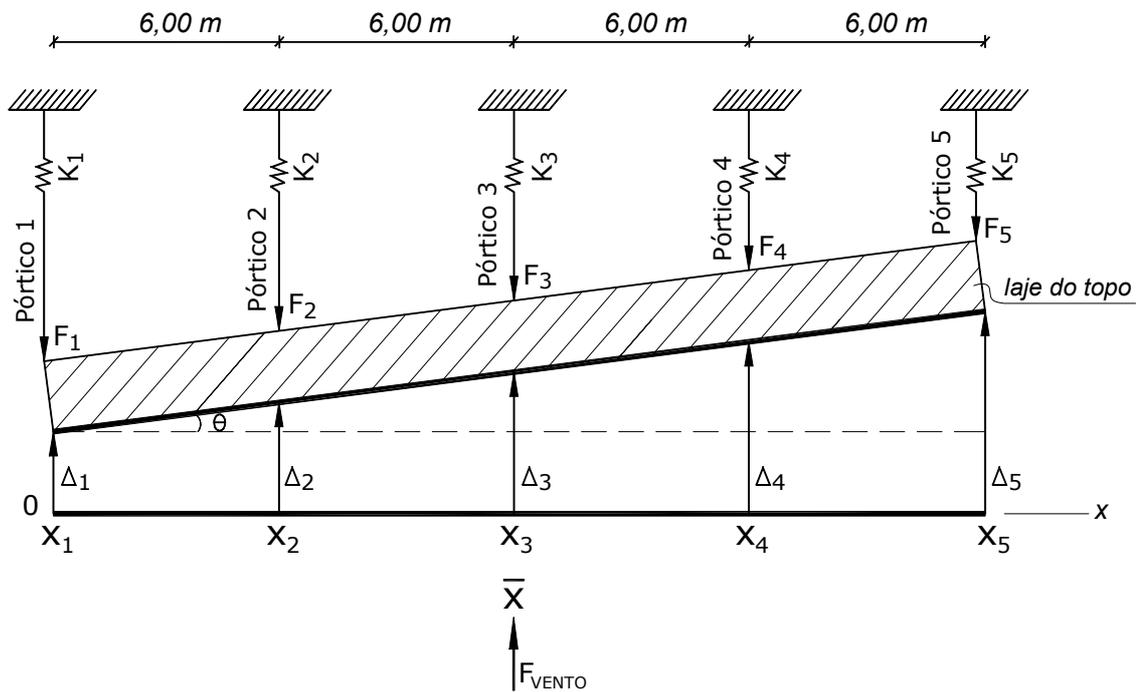


FIGURA 5.5 – Esquema das forças atuantes na laje do topo da Estrutura 4.

→ determinação de Δ_1 e θ :

$$\Delta_1 = \frac{F_{VENTO} (I - M \bar{x})}{(KI - M^2)}$$

$$\theta = \frac{F_{VENTO} (M - \bar{x}K)}{(M^2 - IK)}$$

onde,

$$I = K_2 x_2^2 + K_3 x_3^2 + K_4 x_4^2 + K_5 x_5^2$$

$$M = K_2 x_2 + K_3 x_3 + K_4 x_4 + K_5 x_5$$

substituindo os valores literais pelos numéricos, tem-se:

$$I = 3341,57 \times (6)^2 + 2424,94 \times (12)^2 + 1068,90 \times (18)^2 + 743,10 \times (24)^2$$

$$I = 1243837,08 \text{ kN.m}$$

$$M = 3341,57 \times (6) + 2424,94 \times (12) + 1068,90 \times (18) + 743,10 \times (24)$$

$$M = 86223,30 \text{ kN}$$

$$\Delta_1 = \frac{673,26(1243837,08 - 86223,30 \times 12)}{(10443,33 \times 1243837,08 - 86223,30^2)} = 0,02534810 \text{ m}$$

$$\theta = \frac{673,26(86223,30 - 12 \times 10443,33)}{(86223,30^2 - 1243837,08 \times 10443,33)} = 0,00473818 \text{ rad}$$

→ cálculo das parcelas F_i da carga total do vento aplicadas a cada pórtico:

$$F_1 = K_1 \times \Delta_1$$

$$F_2 = K_2 \times \Delta_2 = K_2 \times (\Delta_1 + \theta x_2)$$

$$F_3 = K_3 \times \Delta_3 = K_3 \times (\Delta_1 + \theta x_3)$$

$$F_4 = K_4 \times \Delta_4 = K_4 \times (\Delta_1 + \theta x_4)$$

$$F_5 = K_5 \times \Delta_5 = K_5 \times (\Delta_1 + \theta x_5)$$

substituindo os valores literais pelos numéricos, tem-se:

$$F_1 = 2864,81 \times (0,02534810) = 72,62 \text{ kN}$$

$$F_2 = 3341,57 \times (0,02534810 + 0,00473818 \times 6) = 179,70 \text{ kN}$$

$$F_3 = 2424,94 \times (0,02534810 + 0,00473818 \times 12) = 199,34 \text{ kN}$$

$$F_4 = 1068,90 \times (0,02534810 + 0,00473818 \times 18) = 118,26 \text{ kN}$$

$$F_5 = 743,10 \times (0,02534810 + 0,00473818 \times 24) = 103,34 \text{ kN}$$

→ cálculo dos quinhões de rigidez em porcentagem $K_i\%$ dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente:

$$K_i\% = (F_i / F_{\text{VENTO}}) \times 100\%$$

$$K_1\% = (72,62 / 673,26) \times 100\% = 10,79\%$$

$$K_2\% = (179,70/673,26) \times 100\% = 26,69\%$$

$$K_3\% = (199,34/673,26) \times 100\% = 29,61\%$$

$$K_4\% = (118,26/673,26) \times 100\% = 17,57\%$$

$$K_5\% = (103,34/673,26) \times 100\% = 15,35\%$$

→ cálculo dos quinhões de carga do vento V_i dos Pórticos i :

$$\text{quinhão de carga } V_i = K_i\% \times (\text{ação total do vento})$$

(ação total do vento) \Rightarrow ver FIG. 4.1

$$\text{quinhão de carga } V_1 = 0,1079 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\text{quinhão de carga } V_2 = 0,2669 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\text{quinhão de carga } V_3 = 0,2961 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\text{quinhão de carga } V_4 = 0,1757 \times (\text{ação total do vento})$$

$$\text{quinhão de carga } V_5 = 0,1535 \times (\text{ação total do vento})$$

Na TAB. 5.5 são apresentados os quinhões de carga do vento V_1 , V_2 , V_3 , V_4 e V_5 .

TABELA 5.5 – Quinhões de Carga na Estrutura 4 no Modelo PPI-CT.

Laje	Ação Total do Vento (kN)	Quinhão V1 (kN)	Quinhão V2 (kN)	Quinhão V3 (kN)	Quinhão V4 (kN)	Quinhão V5 (kN)
16°	26,40	2,85	7,05	7,82	4,64	4,05
15°	52,32	5,64	13,96	15,49	9,19	8,03
14°	51,18	5,52	13,66	15,15	8,99	7,86
13°	49,94	5,39	13,33	14,79	8,77	7,66
12°	48,70	5,25	13,00	14,42	8,56	7,47
11°	47,38	5,11	12,64	14,03	8,32	7,27
10°	46,00	4,96	12,28	13,62	8,08	7,06
9°	44,46	4,80	11,87	13,16	7,81	6,82
8°	42,74	4,61	11,41	12,65	7,51	6,56
7°	40,92	4,41	10,92	12,12	7,19	6,28
6°	38,94	4,20	10,39	11,53	6,84	5,98
5°	36,74	3,96	9,80	10,88	6,45	5,64
4°	34,20	3,69	9,13	10,13	6,01	5,25
3°	32,56	3,51	8,69	9,64	5,72	5,00
2°	32,32	3,49	8,63	9,57	5,68	4,96
1°	48,46	5,23	12,93	14,35	8,51	7,44

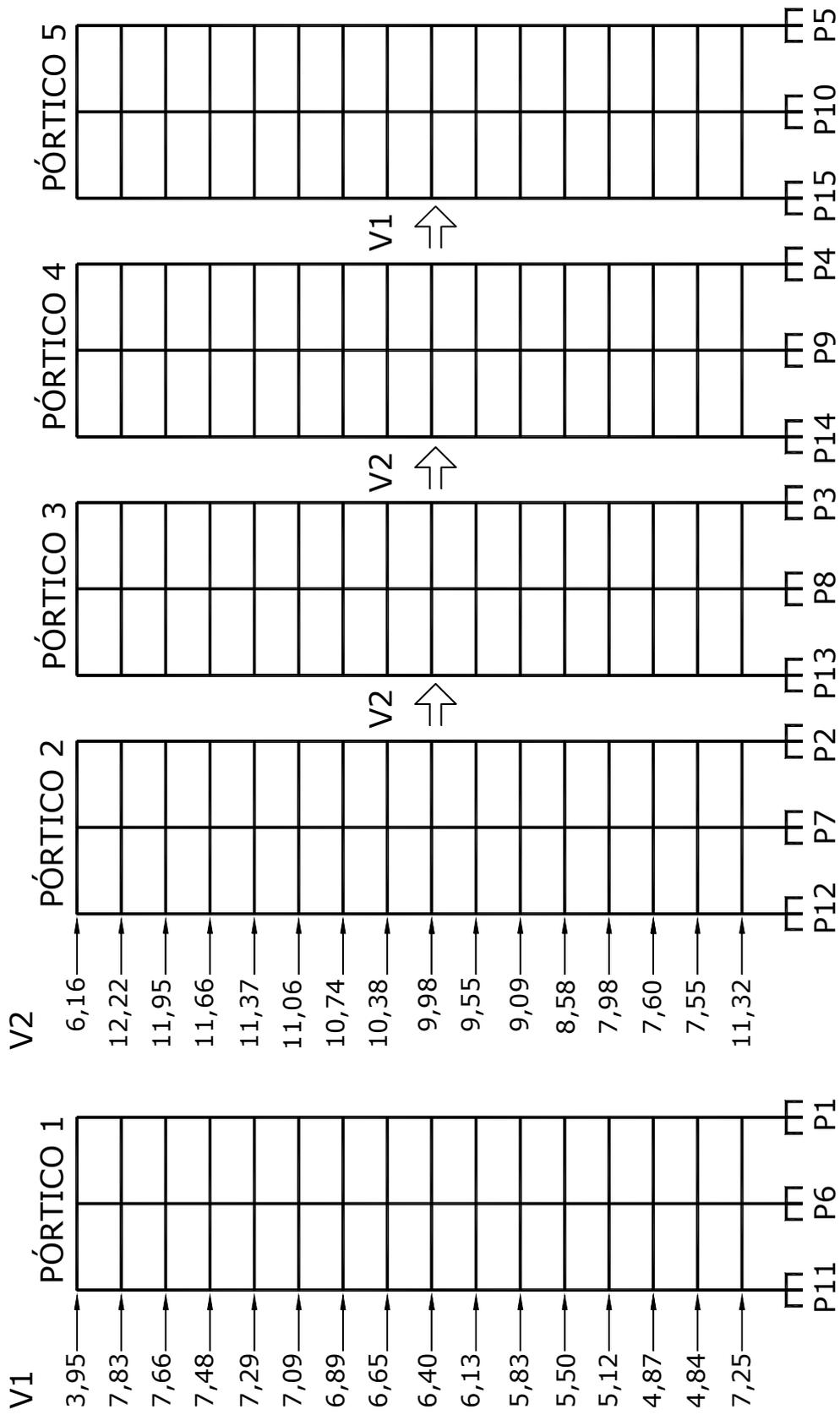


FIGURA 5.6 – Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT) da Estrutura 1: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN).

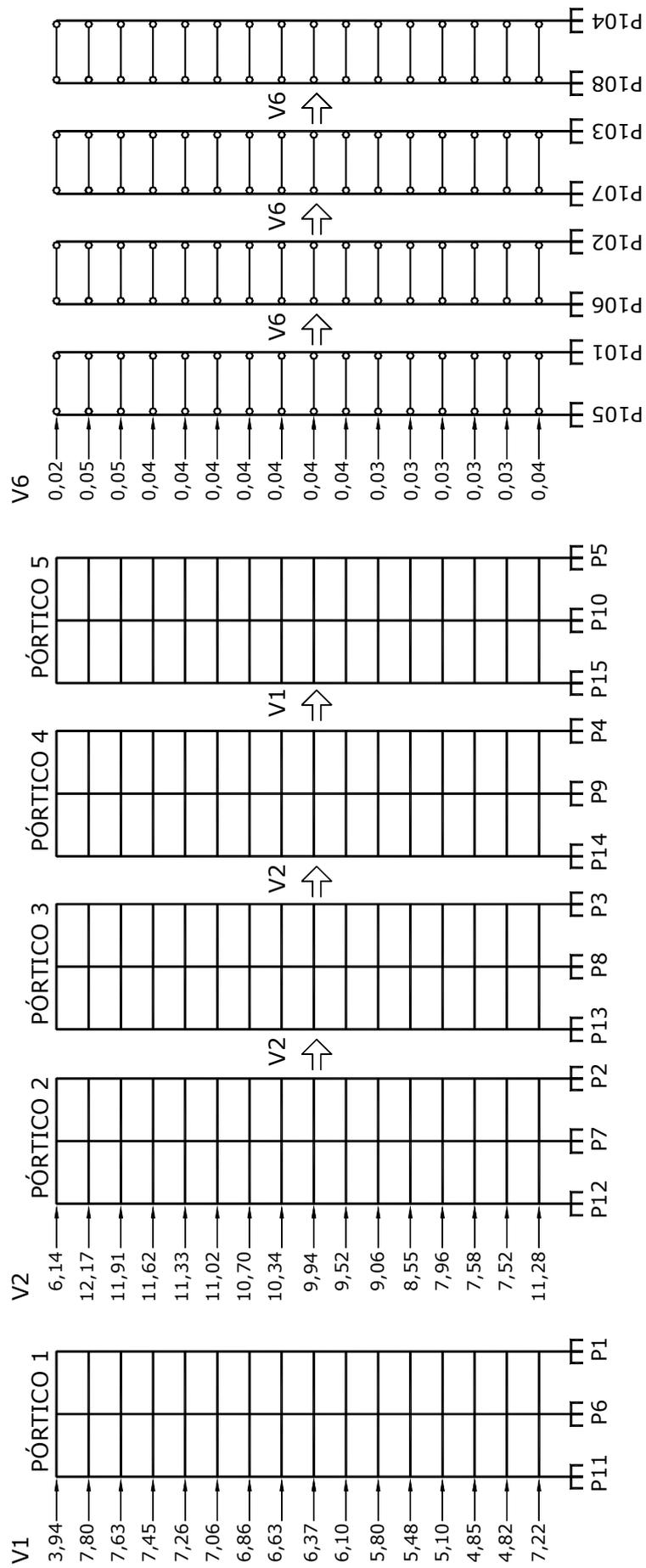


FIGURA 5.7 – Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT) da Estrutura 2: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN).

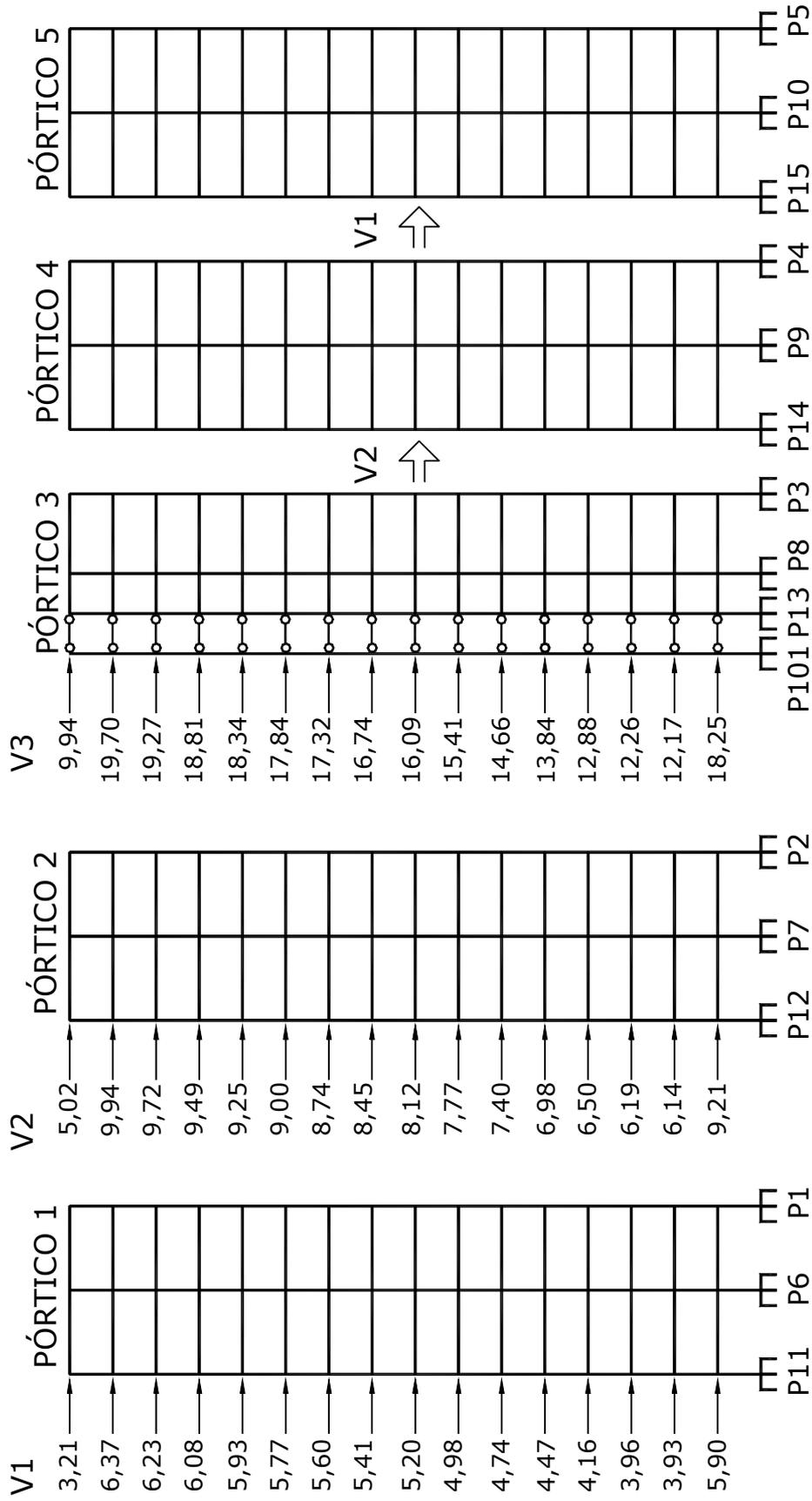


FIGURA 5.8 – Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT) da Estrutura 3: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN).

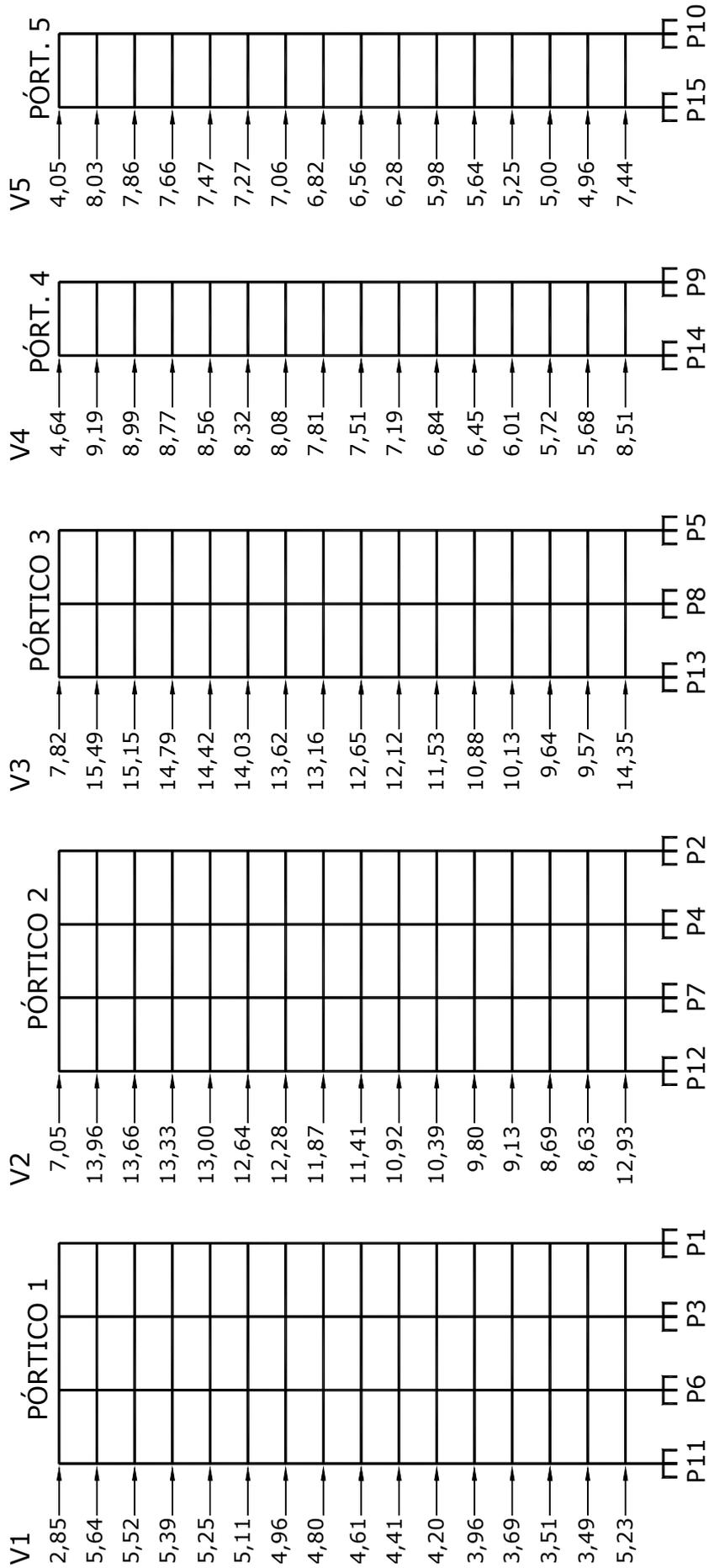


FIGURA 5.9 – Modelo Pórticos Planos Independentes Compatibilizados no Topo (PPI-CT) da Estrutura 4: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN).

5.3 - Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA)

Todas as elevações referentes ao Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA) estão representadas nas FIG. 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13.

Neste modelo, admite-se que apenas os pórticos planos paralelos ao plano YZ resistem à ação do vento na direção Y. Núcleos estruturais e pilares isolados, quando for o caso, também podem colaborar nesta resistência.

Conseqüentemente, também neste modelo, o vigamento transversal na direção X não tem qualquer influência nos resultados obtidos.

Na Estrutura 3, o núcleo estrutural (caixa de escada) é incorporado ao Pórtico 3.

As barras bi-rotuladas simulam, em cada andar, as lajes que são supostas muito rígidas no seu plano.

Admite-se que as vigas têm grande rigidez axial.

Pórticos, núcleos e pilares isolados são alinhados e unidos entre si, em todos os andares, por barras bi-rotuladas de grande rigidez axial.

Desta forma, os pórticos, núcleo e pilares isolados trabalham em conjunto e tem-se compatibilidade dos deslocamentos laterais em todos os andares.

A carga total do vento é aplicada no Pórtico 1 dos Modelos PPA das Estruturas 1, 2, 3 e 4 mostrados nas FIG. 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13.

As barras bi-rotuladas, que simulam as lajes, obrigam os demais pórticos, núcleo e pilares isolados a entrarem simultaneamente em carga.

Logo, as parcelas da carga total em cada pórtico, núcleo e pilar isolado são obtidas automaticamente ao se analisar este modelo.

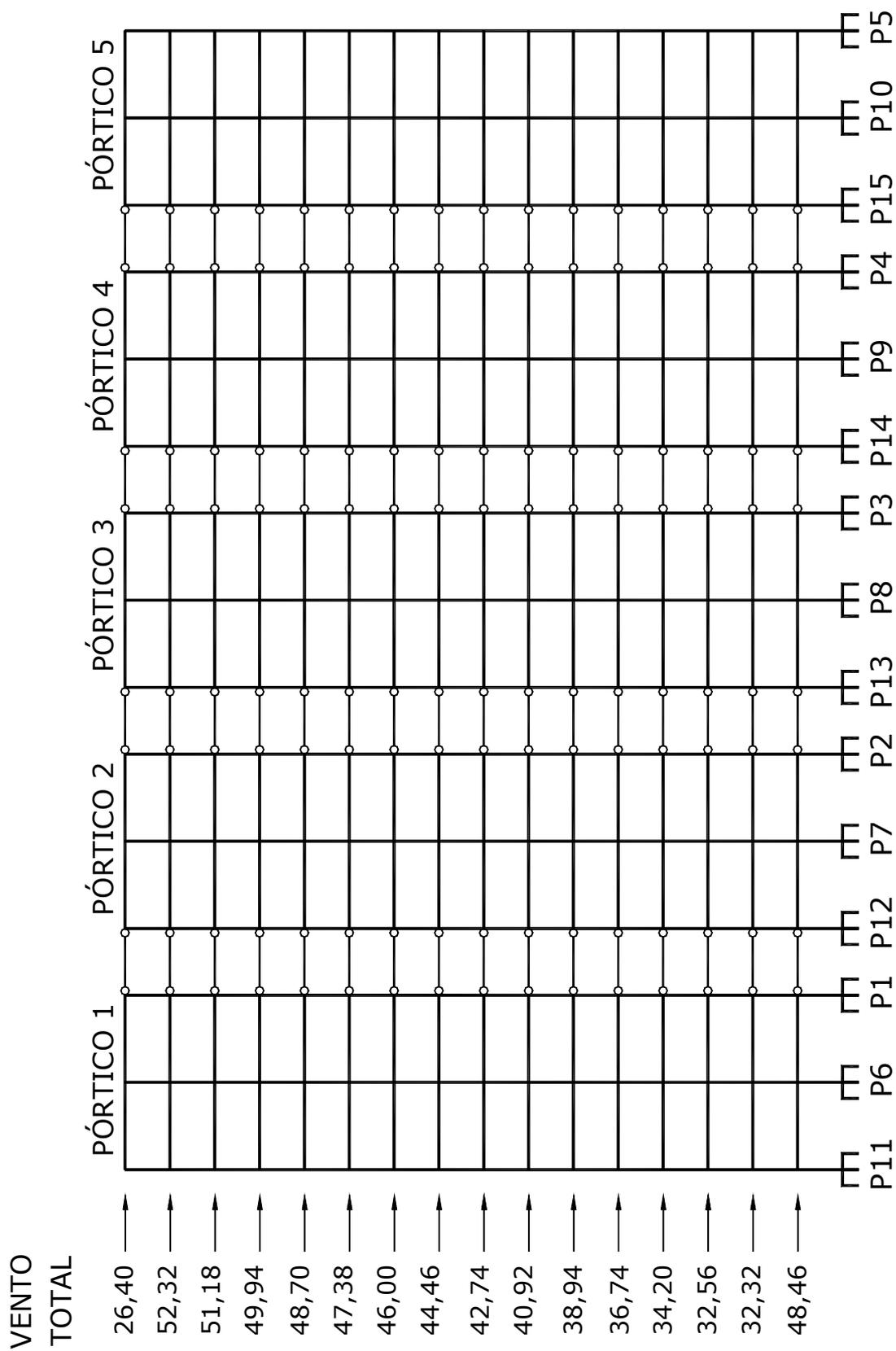


FIGURA 5.10 – Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA) da Estrutura 1: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN).

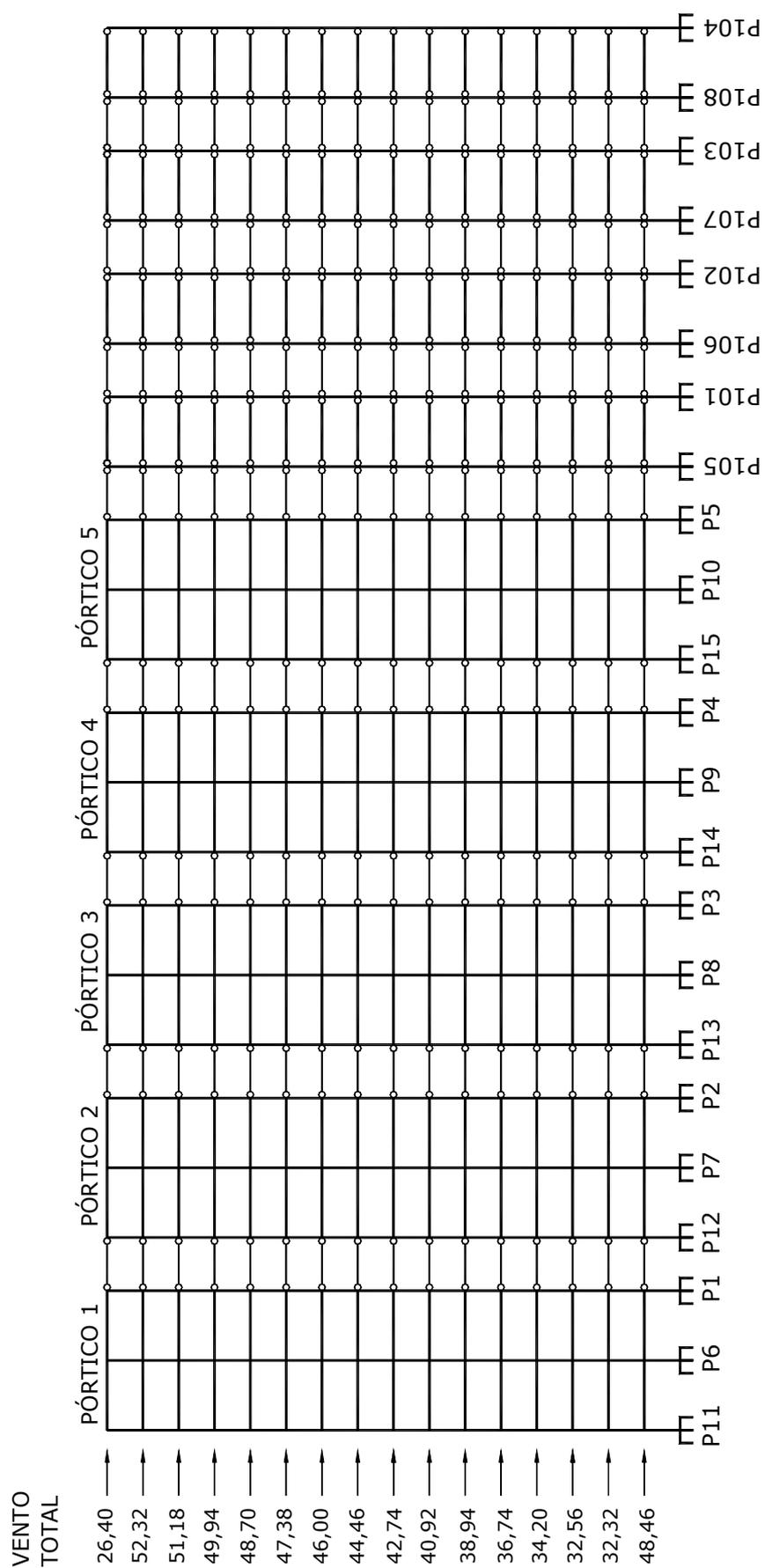


FIGURA 5.11 – Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA) da Estrutura 2: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN).

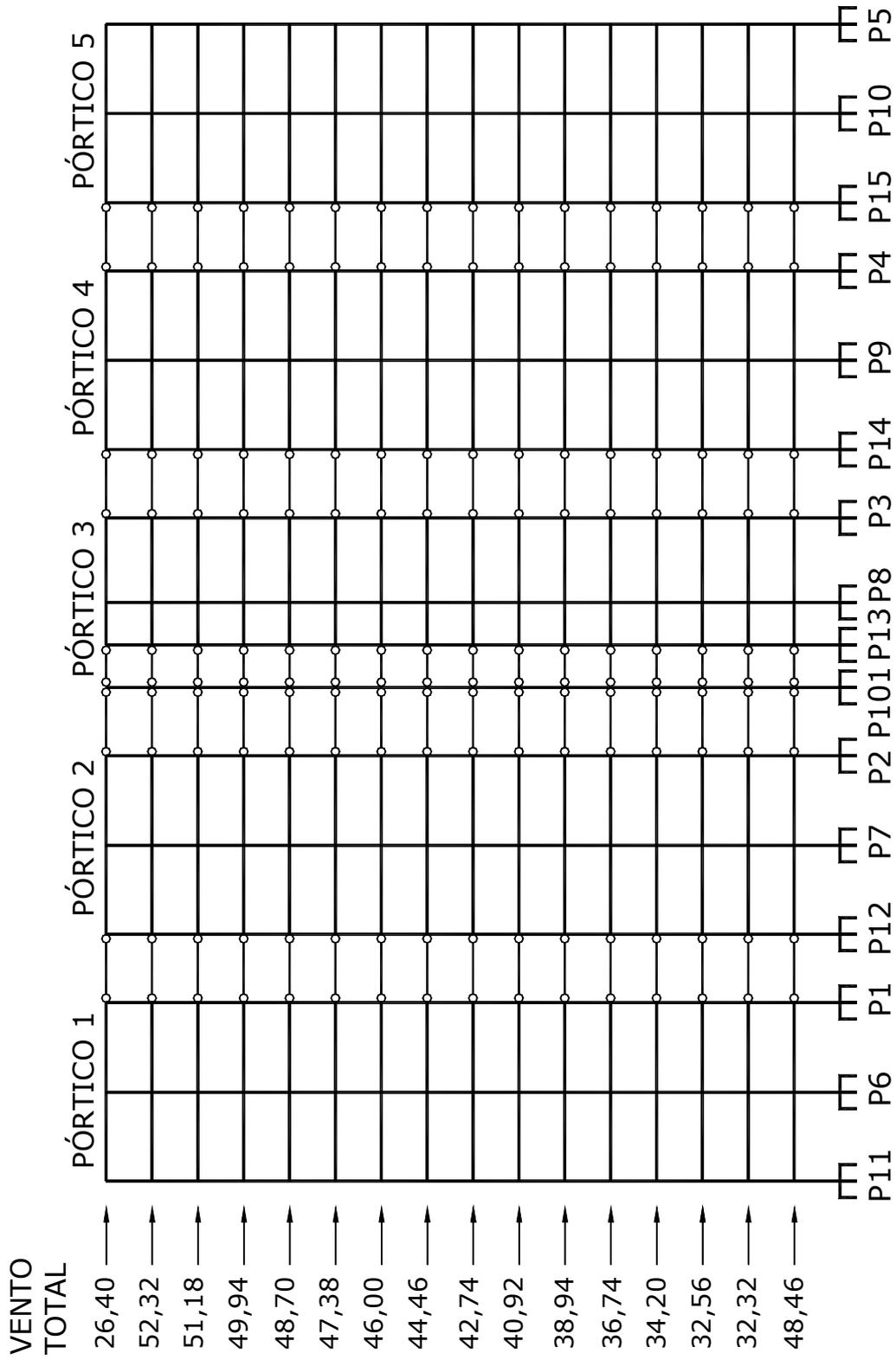


FIGURA 5.12 – Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA) da Estrutura 3: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN).

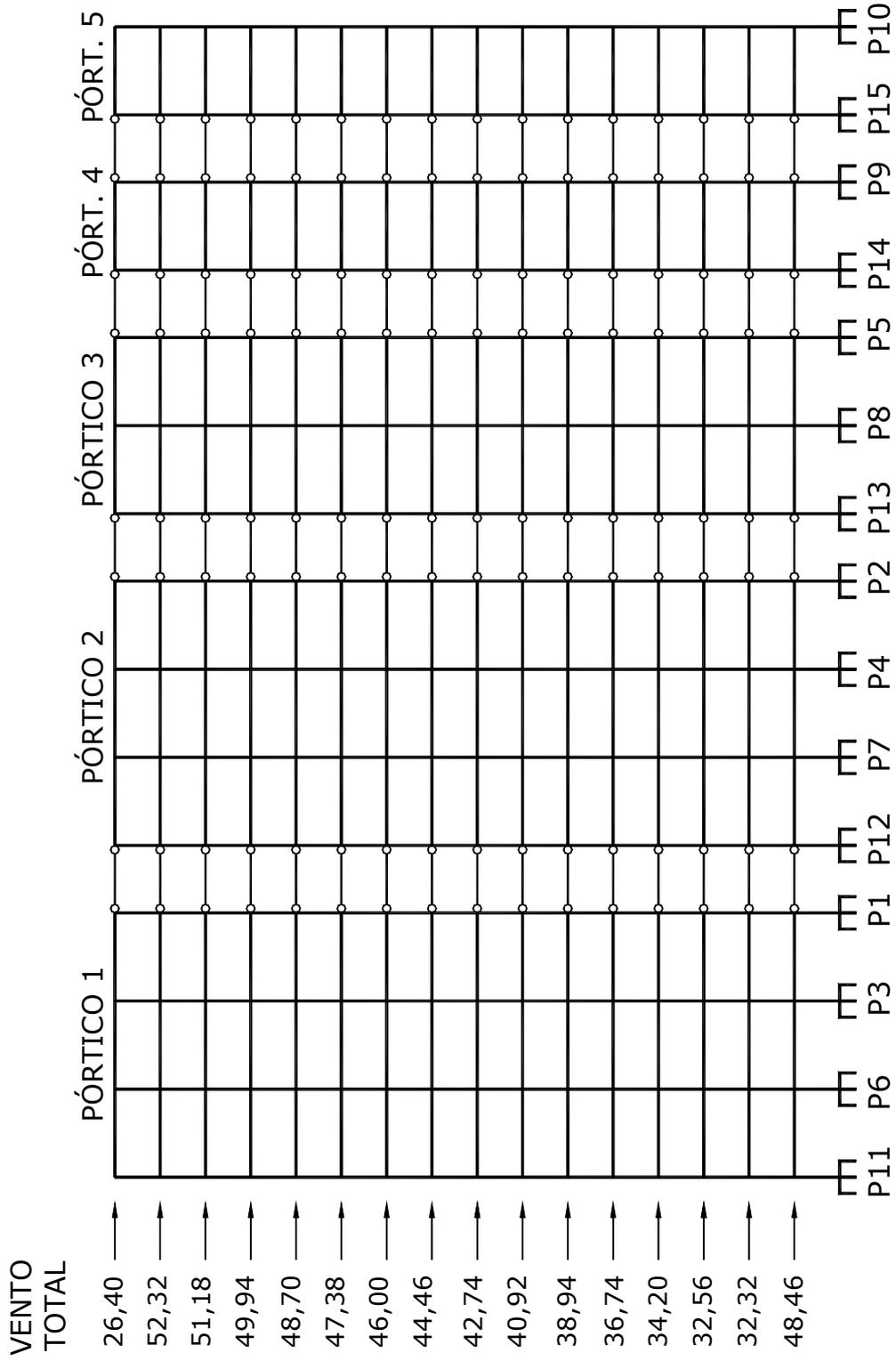


FIGURA 5.13 – Modelo Pórticos Planos Alinhados (PPA) da Estrutura 4: elevação dos pórticos e esquema do carregamento (em kN).

5.4 - Modelo Pórtico Espacial (PE)

Agora, o vigamento transversal na direção X tem influência nos resultados obtidos, o que não ocorre nos modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA.

Este vigamento em conjunto com os pilares e núcleo dão origem a pórticos planos paralelos ao plano XZ.

O conjunto dos pórticos planos paralelos aos planos XZ e YZ forma uma estrutura reticulada tridimensional denominada pórtico espacial.

As lajes são simuladas por diafragmas supostos muito rígidos no seu plano e muito flexíveis transversalmente a ele.

O Modelo Pórtico Espacial (PE) resulta da ação conjunta da estrutura reticulada tridimensional com os diafragmas horizontais.

A carga do vento é aplicada na direção Y.

Todas as elevações referentes ao Modelo Pórtico Espacial (PE) estão representadas nas FIG. 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17.

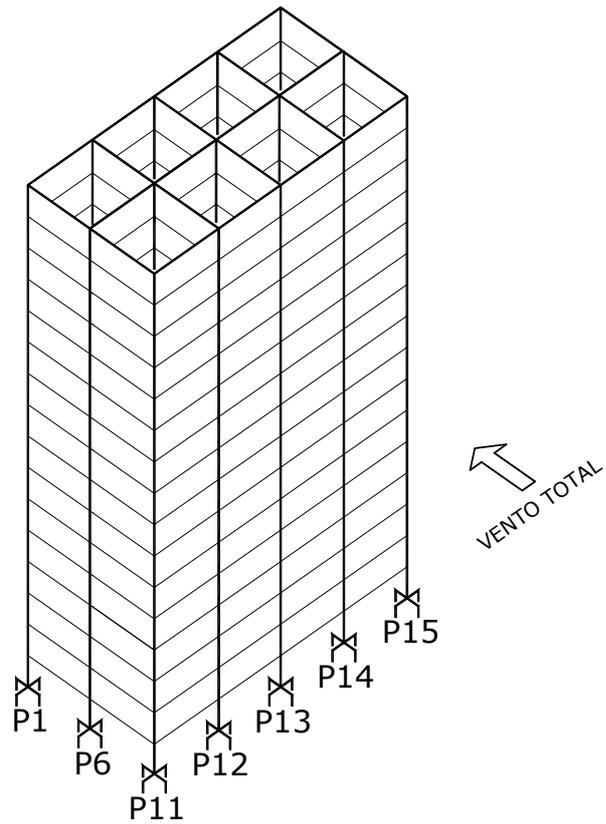


FIGURA 5.14 – Modelo Pórtico Espacial (PE) da Estrutura 1.

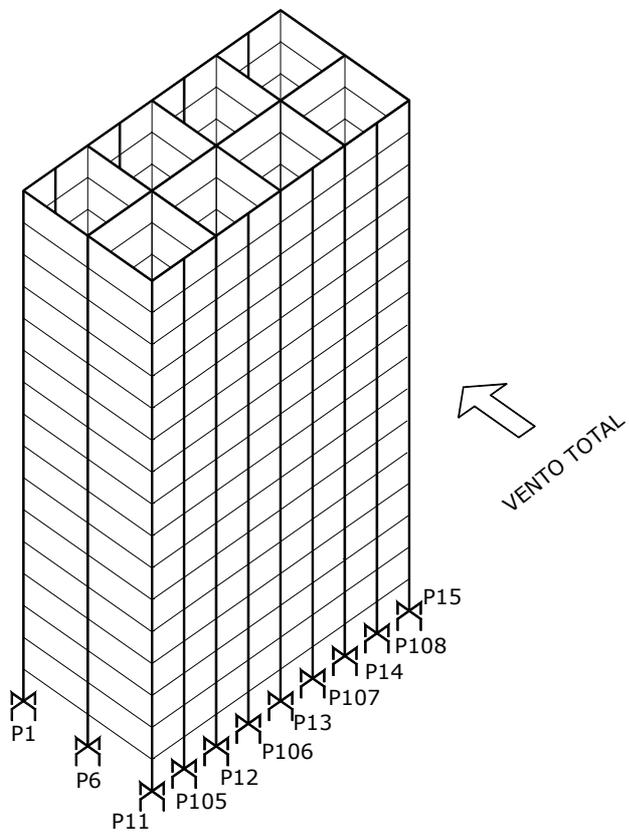


FIGURA 5.15 – Modelo Pórtico Espacial (PE) da Estrutura 2.

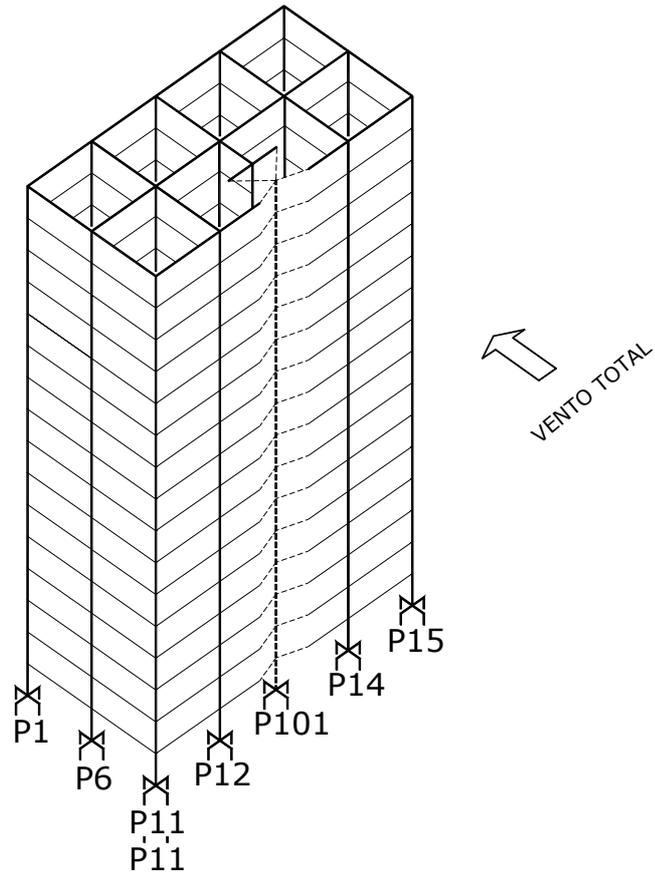


FIGURA 5.16 – Modelo Pórtico Espacial (PE) da Estrutura 3.

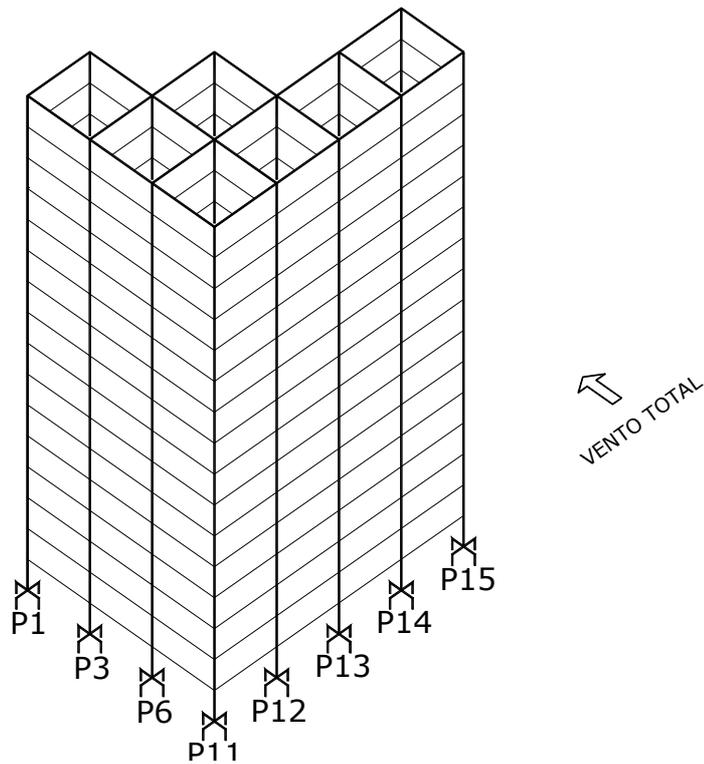


FIGURA 5.17 – Modelo Pórtico Espacial (PE) da Estrutura 4.

6

Análise dos Resultados da Estrutura 1

Neste capítulo, são feitas análises comparativas dos resultados obtidos através dos processamentos realizados para a Estrutura 1.

Os resultados comparados são:

- cargas na fundação;
- deslocamentos laterais nos pórticos;
- momentos fletores no vigamento dos pórticos.

6.1 - Cargas nas Fundações

Na TAB. 6.1, são apresentados os valores dos esforços nas fundações da Estrutura 1 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

F_y , F_z e M_x são cargas nas fundações que serão analisadas na Estrutura 1 e significam, respectivamente:

F_y – força na direção y;

TABELA 6.1 - Esforços nas fundações da Estrutura 1.

PILAR	MODELO PPI-AI			MODELO PPI-CT			MODELO PPA			MODELO PE		
	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x
P1=P5	12,80	184,95	-19,88	14,18	206,38	-22,18	11,99	206,19	-18,68	11,97	218,30	-18,66
P2=P4	48,98	333,01	-108,33	46,89	318,80	-103,71	50,71	318,98	-110,95	50,64	305,81	-110,81
P3	48,98	333,01	-108,33	46,89	318,80	-103,71	50,71	318,98	-110,95	50,58	321,21	-110,74
P6=P10	64,74	0,00	-128,44	72,23	0,00	-143,31	58,46	0,00	-118,70	58,52	0,00	-118,81
P7=P9	66,17	0,00	-125,52	63,35	0,00	-120,17	68,03	0,00	-128,27	68,16	0,00	-128,43
P8	66,17	0,00	-125,52	63,35	0,00	-120,17	68,03	0,00	-128,27	68,10	0,00	-128,37
P11=P15	12,80	-184,95	-19,88	14,28	-206,38	-22,18	11,99	-206,19	-18,68	11,98	-218,30	-18,68
P12=P14	48,98	-333,01	-108,33	46,89	-318,80	-103,71	50,71	-318,98	-110,95	50,71	-305,82	-110,94
P13	48,98	-333,01	-108,33	46,89	-318,80	-103,71	50,71	-318,98	-110,95	50,64	-321,21	-110,85

F_z – força na direção z;

M_x – momento na direção x.

Os sentidos considerados positivos para as cargas nas fundações da Estrutura 1 estão mostrados na FIG. 6.1.

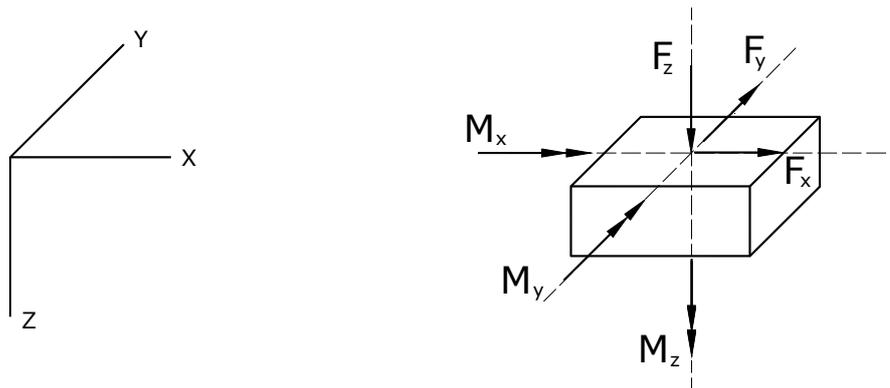
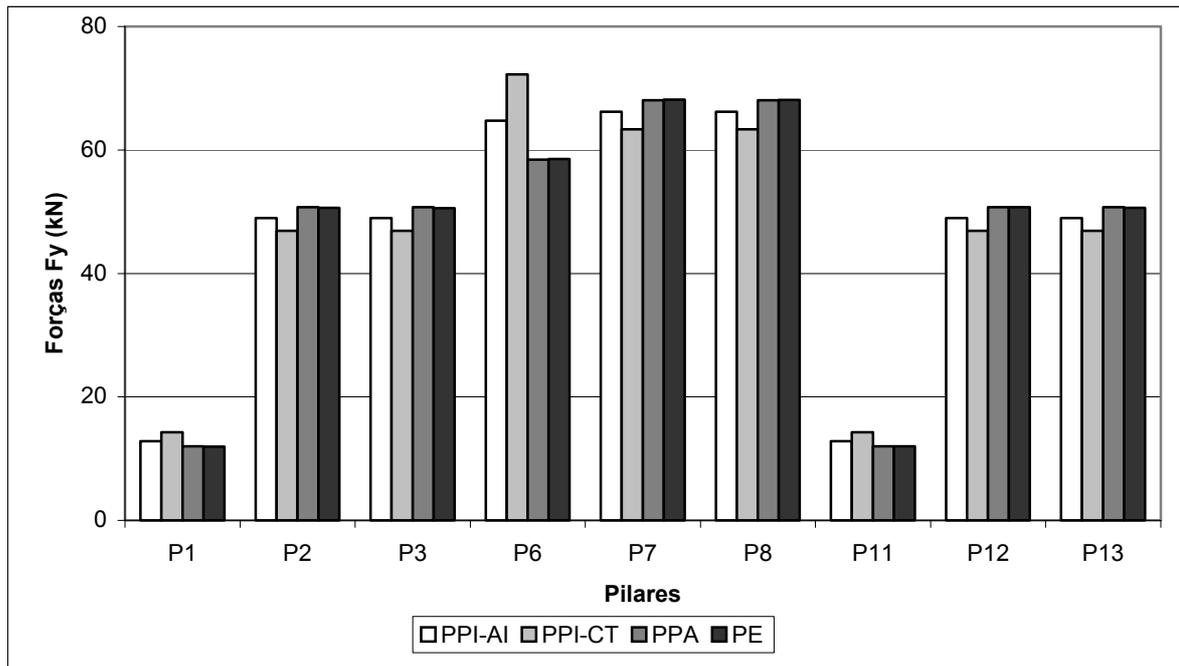
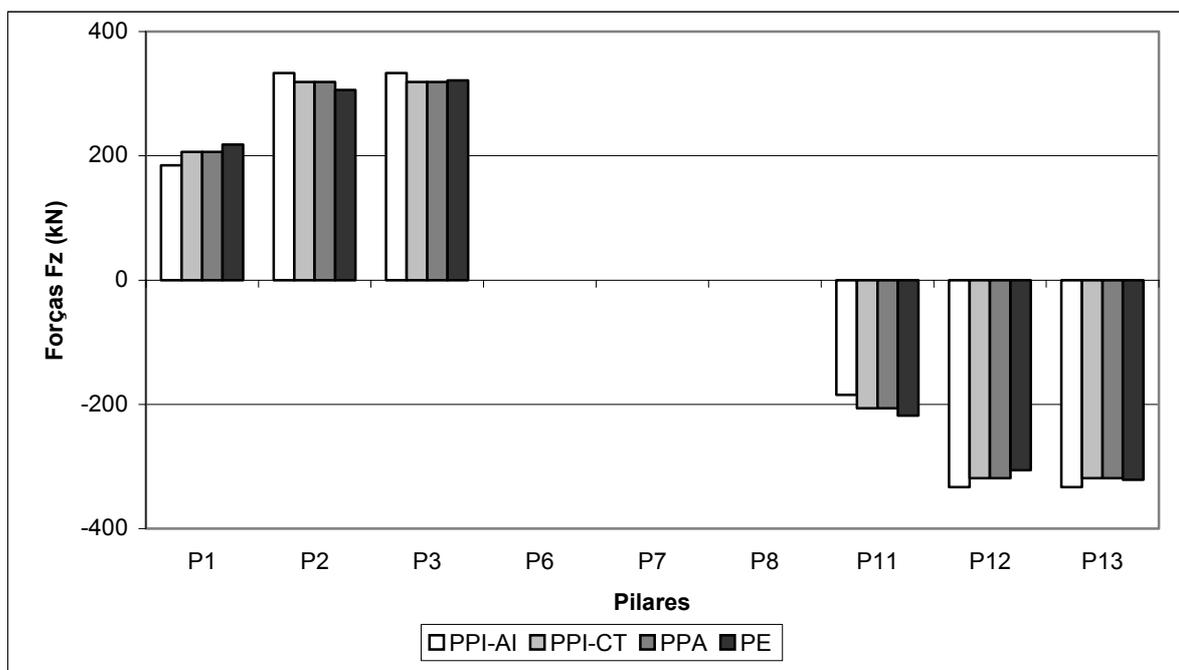


FIGURA 6.1 – Sentidos positivos para as cargas nas fundações da Estrutura 1.

Os valores de F_x , M_y e M_z são sempre nulos para os modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA. Por este motivo, não são apresentados na TAB. 6.1.

Para uma melhor visualização, os valores dos esforços nas fundações da Estrutura 1 da TAB. 6.1 estão representados na forma de gráficos nas FIG. 6.2, 6.3 e 6.4. Devido à simetria alguns pilares não aparecem nos gráficos.

FIGURA 6.2 – Forças F_y nas fundações da Estrutura 1.FIGURA 6.3 – Forças F_z nas fundações da Estrutura 1.

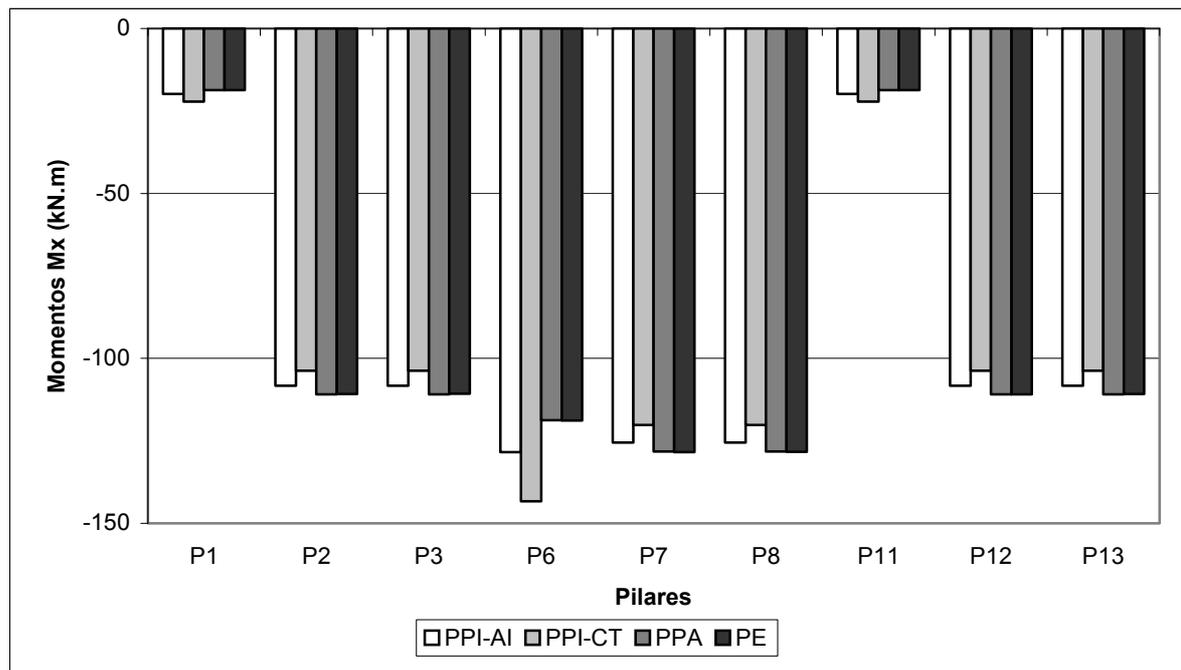


FIGURA 6.4 – Momentos M_x nas fundações da Estrutura 1.

A seguir, na TAB. 6.2 são apresentadas as diferenças percentuais dos esforços nas fundações da Estrutura 1 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE. Os valores destas diferenças percentuais são obtidos através da expressão:

$$\Delta(V)\% = \frac{V_P - V_E}{|V_E|} \times 100\% \quad (6.1)$$

onde,

$\Delta(V)\%$ = diferença percentual da grandeza V ;

V_P = valor das grandezas nos modelos planos (PPI-AI, PPI-CT ou PPA);

V_E = valor das grandezas no modelo espacial (PE);

$|V_E|$ = valor absoluto das grandezas no modelo espacial (PE).

O Modelo PE é tomado como referência, entre os quatro modelos existentes neste trabalho, por ser o que mais se aproxima do real comportamento da Estrutura 1.

TABELA 6.2 – Diferenças em % dos esforços nas fundações da Estrutura 1.

PILAR	$\Delta(F_y)\%$			$\Delta(F_z)\%$			$\Delta(M_x)\%$		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
P1=P5	6,93	19,30	0,17	-15,28	-5,46	-5,55	-6,54	-18,86	-0,11
P2=P4	-3,28	-7,41	0,14	8,89	4,25	4,31	2,24	6,41	-0,13
P3	-3,16	-7,30	0,26	3,67	-0,75	-0,69	2,18	6,35	-0,19
P6=P10	10,63	23,43	-0,10	0,00	0,00	0,00	-8,11	-20,62	0,09
P7=P9	-2,92	-7,06	-0,19	0,00	0,00	0,00	2,27	6,43	0,12
P8	-2,83	-6,98	-0,10	0,00	0,00	0,00	2,22	6,39	0,08
P11=P15	6,84	19,20	0,08	15,28	5,46	5,55	-6,42	-18,74	0,00
P12=P14	-3,41	-7,53	0,00	-8,89	-4,24	-4,30	2,35	6,52	-0,01
P13	-3,28	-7,41	0,14	-3,67	0,75	0,69	2,27	6,44	-0,09

Na Tabela 6.2, observa-se que:

- a) as forças F_y , Modelo PPI-AI, apresentam módulo máximo das diferenças percentuais de 10,63% que são observadas nos pilares P6 e P10;
- b) as forças F_y , Modelo PPI-CT, apresentam módulos máximos das diferenças percentuais de 23,43%, também em P6 e P10;
- c) as forças F_y , Modelo PPA, apresentam módulos das diferenças percentuais que não ultrapassam 0,3%;
- d) as forças F_z , Modelo PPI-AI, apresentam resultados com diferenças percentuais, em valor absoluto, de aproximadamente 15%, em P1, P5, P11 e P15;
- e) as forças F_z , Modelo PPI-CT, apresentam diferenças percentuais pequenas, inferiores a 6% em valor absoluto, também nos pilares P1, P5, P11 e P15;
- f) as forças F_z , Modelo PPA, também apresentam diferenças percentuais pequenas, inferiores a 6% em valor absoluto, nos pilares P1, P5, P11 e P15;

- g) os momentos M_x , Modelo PPI-AI, apresentam módulos das diferenças percentuais pequenos que não ultrapassam 9%;
- h) os momentos M_x , Modelo PPI-CT, apresentam módulos das diferenças percentuais que alcançam valores de aproximadamente 21%, nos pilares P6 e P10;
- i) os momentos M_x , Modelo PPA, apresentam módulos das diferenças percentuais pequenos que não ultrapassam 0,2%, tornando-se desprezíveis.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar as cargas nas fundações da Estrutura 1, pode-se afirmar que:

- a) o Modelo PPI-AI apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 11% para F_y , 16% para F_z e 8% para M_x ; sendo pequenos, estes resultados podem passar a impressão de que o modelo avaliou corretamente os esforços nas fundações, já que o maior módulo é de aproximadamente 16%; como este modelo obedece a critérios geométricos para determinar o carregamento em cada painel vertical enrijecido, os resultados podem apresentar-se muito fora da realidade por não levar em consideração as rigidezes dos painéis verticais e seu comportamento conjunto; conclui-se que os aparentemente bons resultados desse exemplo são meras coincidências;
- b) o Modelo PPI-CT apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 24% para F_y , 6% para F_z e 21% para M_x ; para o caso da Estrutura 1, o modelo foi capaz de avaliar bem F_z e razoavelmente F_y e M_x ; este modelo é superior ao Modelo PPI-AI por levar em consideração as rigidezes dos painéis verticais; todavia, o seu comportamento conjunto deixa a desejar uma vez que ocorre apenas no topo do edifício;
- c) o modelo PPA apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 0,3% para F_y , 6% para F_z e 0,2% para M_x ; este modelo é superior aos anteriores por levar em consideração as rigidezes dos painéis verticais e também por compatibilizar os deslocamentos laterais em todos os andares; assim, o modelo foi capaz de avaliar bem os esforços nas fundações; logo, percebe-se que o Modelo PPA, entre os três modelos, foi o que melhor avaliou os esforços nas fundações da Estrutura 1.

6.2 – Deslocamentos Laterais nos Pórticos

Na FIG. 6.5, representam-se as componentes vetoriais dos deslocamentos nodais que ocorrem nos pórticos da Estrutura 1, onde:

Δ_y = deslocamento horizontal na direção y;

Δ_z = deslocamento horizontal na direção z;

Δ_{yz} = deslocamento no plano yz;

Em geral o módulo do deslocamento Δ_z é bem menor do que o módulo do deslocamento Δ_y . Desta forma, os módulos de Δ_y e Δ_{yz} são praticamente coincidentes entre si.

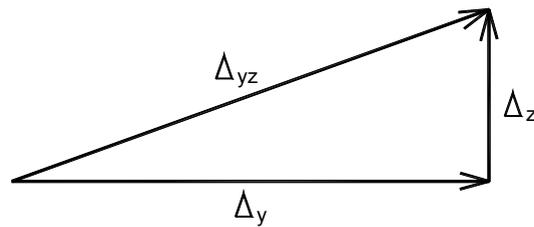


FIGURA 6.5 – Deslocamentos nodais Δ_y , Δ_z e Δ_{yz} .

As FIG. 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9 mostram os deslocamentos Δ_y no topo dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE, respectivamente.

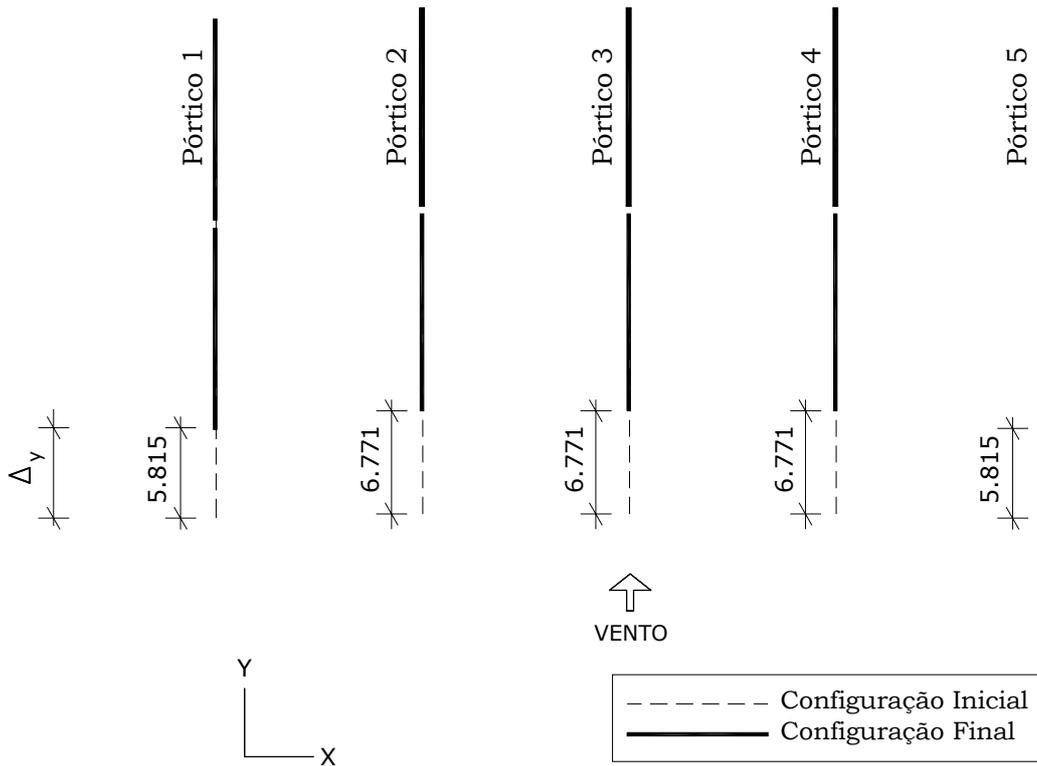


FIGURA 6.6 – Modelo PPI-AI da Estrutura 1: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

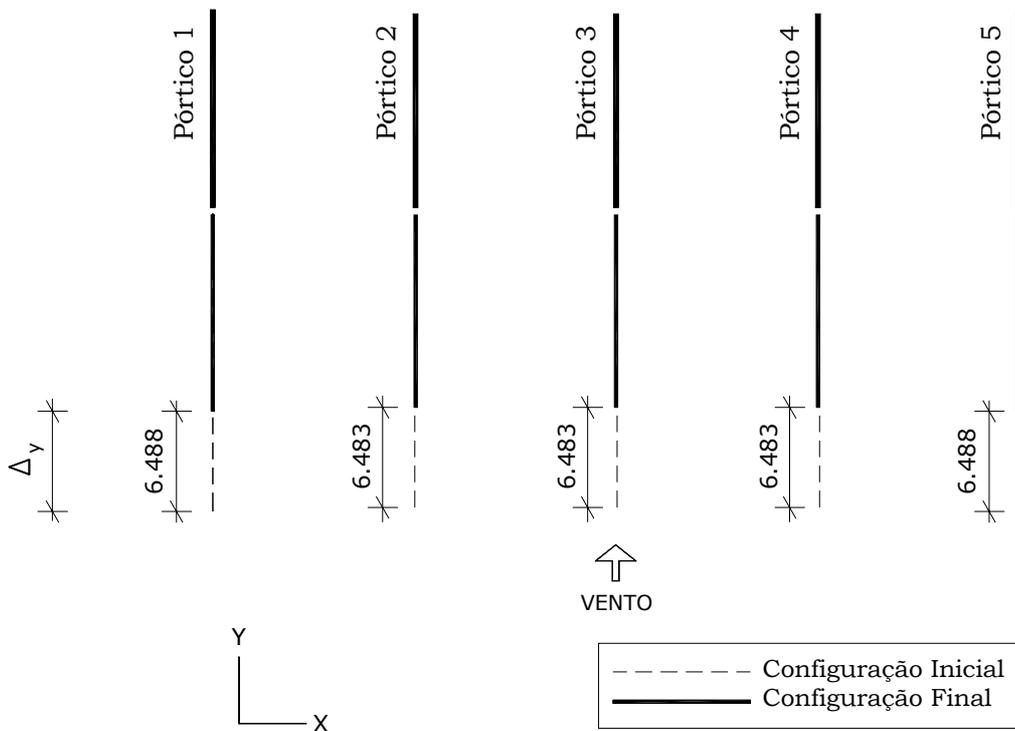


FIGURA 6.7 – Modelo PPI-CT da Estrutura 1: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

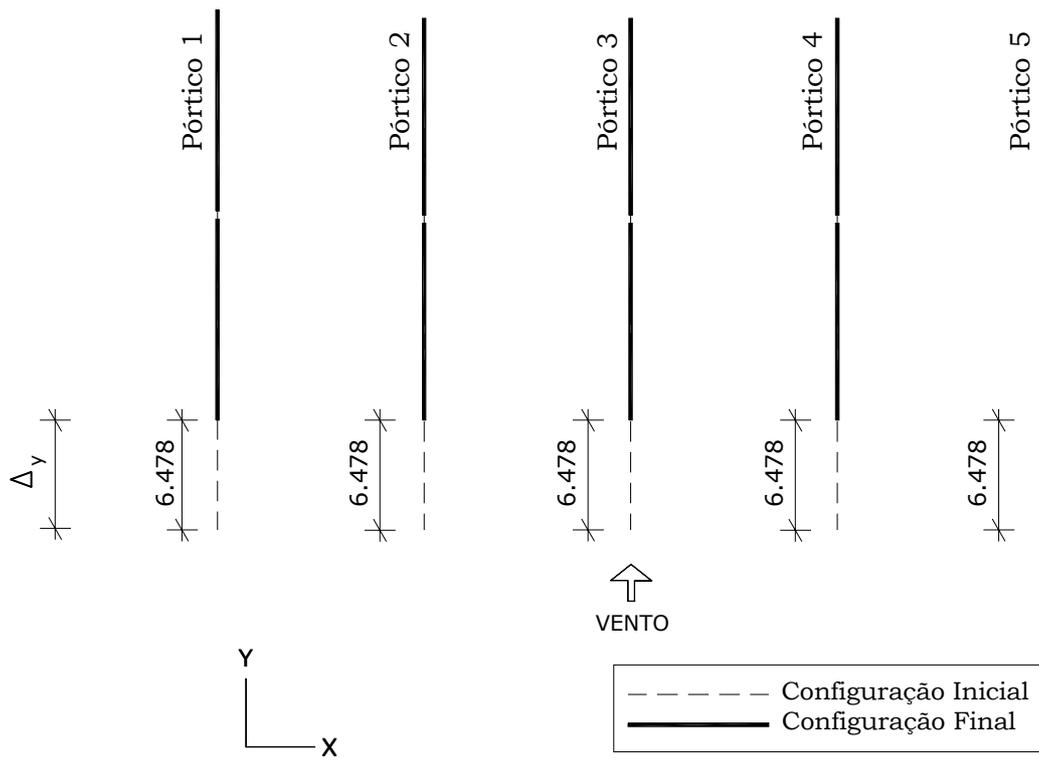


FIGURA 6.8 – Modelo PPA da Estrutura 1: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

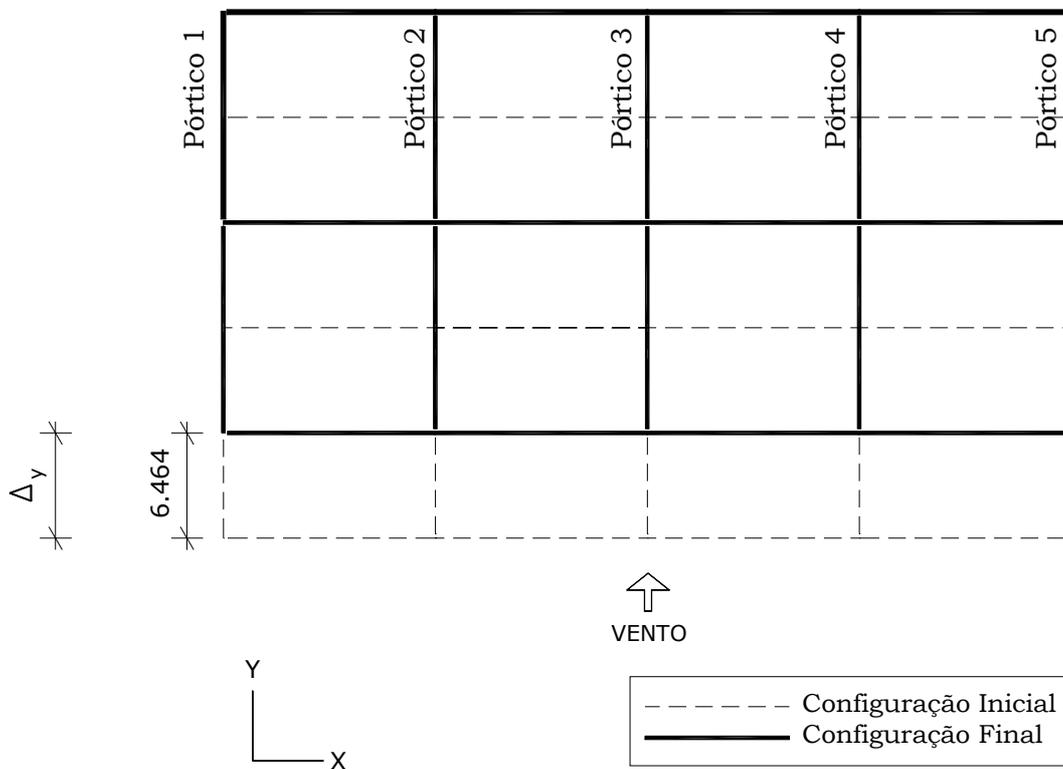


FIGURA 6.9 – Modelo PE da Estrutura 1: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

As FIG. 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 apresentam, nos diversos andares, os deslocamentos nodais Δ_{yz} nos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE, respectivamente.

A FIG. 6.14 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 1 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 6.15 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 2 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

Em todos os modelos, devido à simetria da Estrutura 1, a laje do topo deve transladar na direção y sob a ação do vento e os deslocamentos Δ_y no topo devem ser iguais em todos os pórticos. Isto não ocorre, todavia, no Modelo PPI-AI (FIG. 6.6), o que já evidencia a baixa qualidade deste modelo.

Nas FIG. 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 os deslocamentos Δ_{yz} no topo de todos os pórticos deveriam ser praticamente iguais entre si. O mesmo pode-se afirmar para os demais andares. Entretanto, como se constata pelo exame das FIG. 6.10 e 6.11, isto não ocorre nos Modelos PPI-AI e PPI-CT.

Por outro lado, o exame das FIG. 6.12 e 6.13 relativas aos Modelos PPA e PE, respectivamente, mostra que os deslocamentos Δ_{yz} no topo e demais andares dos pórticos são bastante próximos entre si. As pequenas diferenças encontradas nos valores de Δ_{yz} no topo e demais andares dos pórticos devem-se ao deslocamento vertical Δ_z já que, devido à rigidez da laje em seu plano, o deslocamento lateral Δ_y deve ser o mesmo em todos os pórticos.

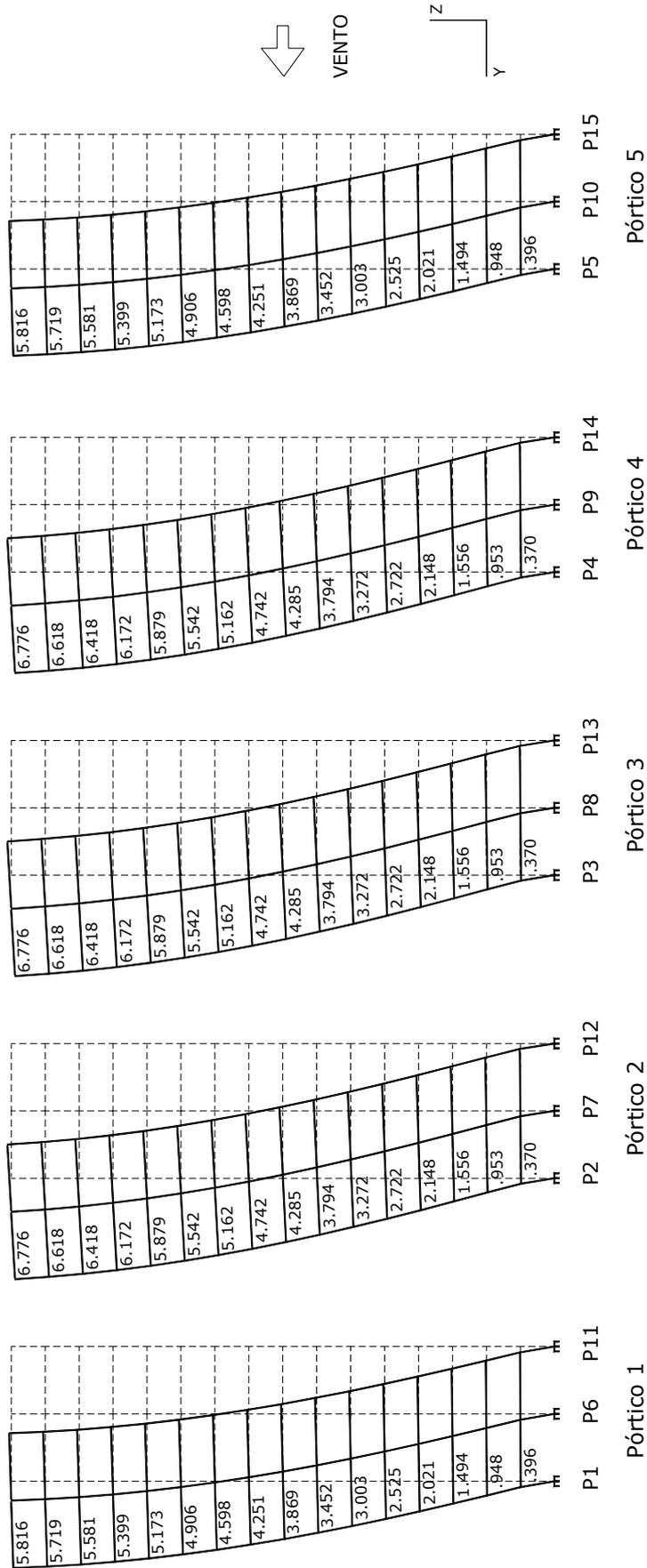


FIGURA 6.10 – Modelo PPI-AI da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

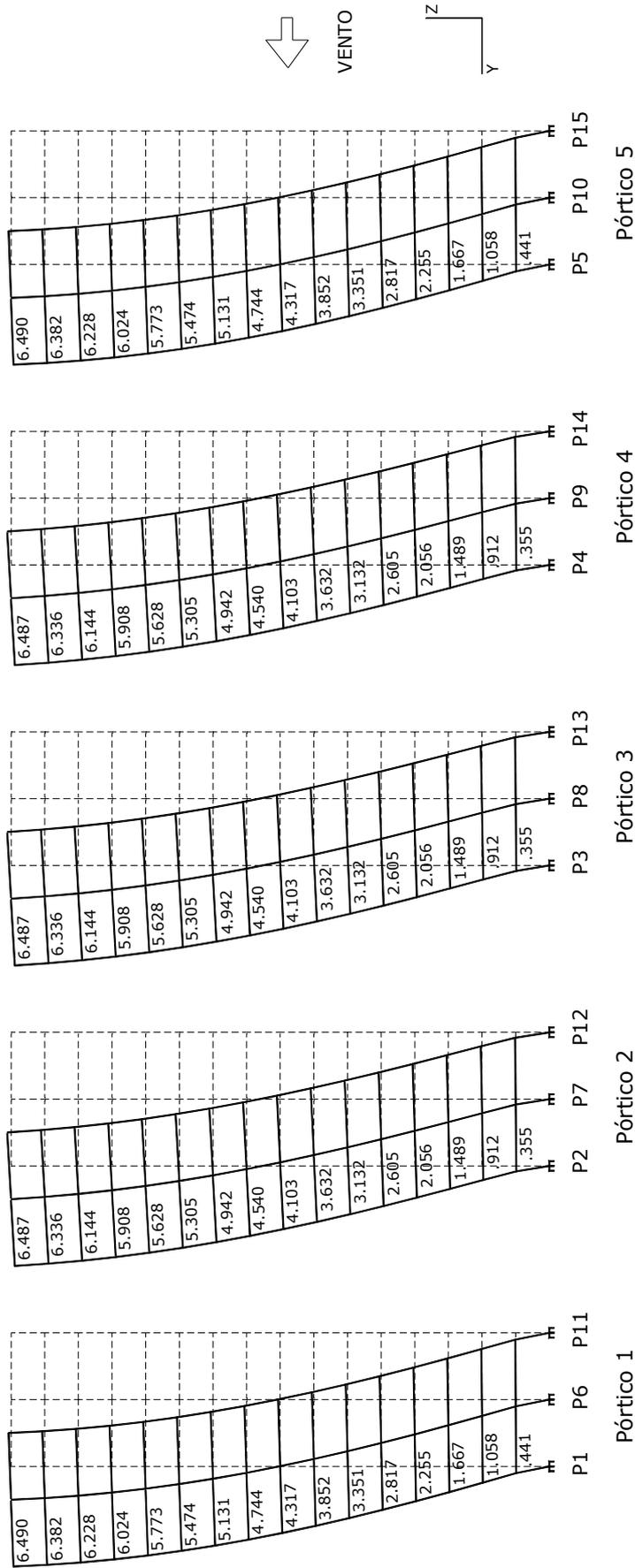


FIGURA 6.11 – Modelo PPI-CT da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

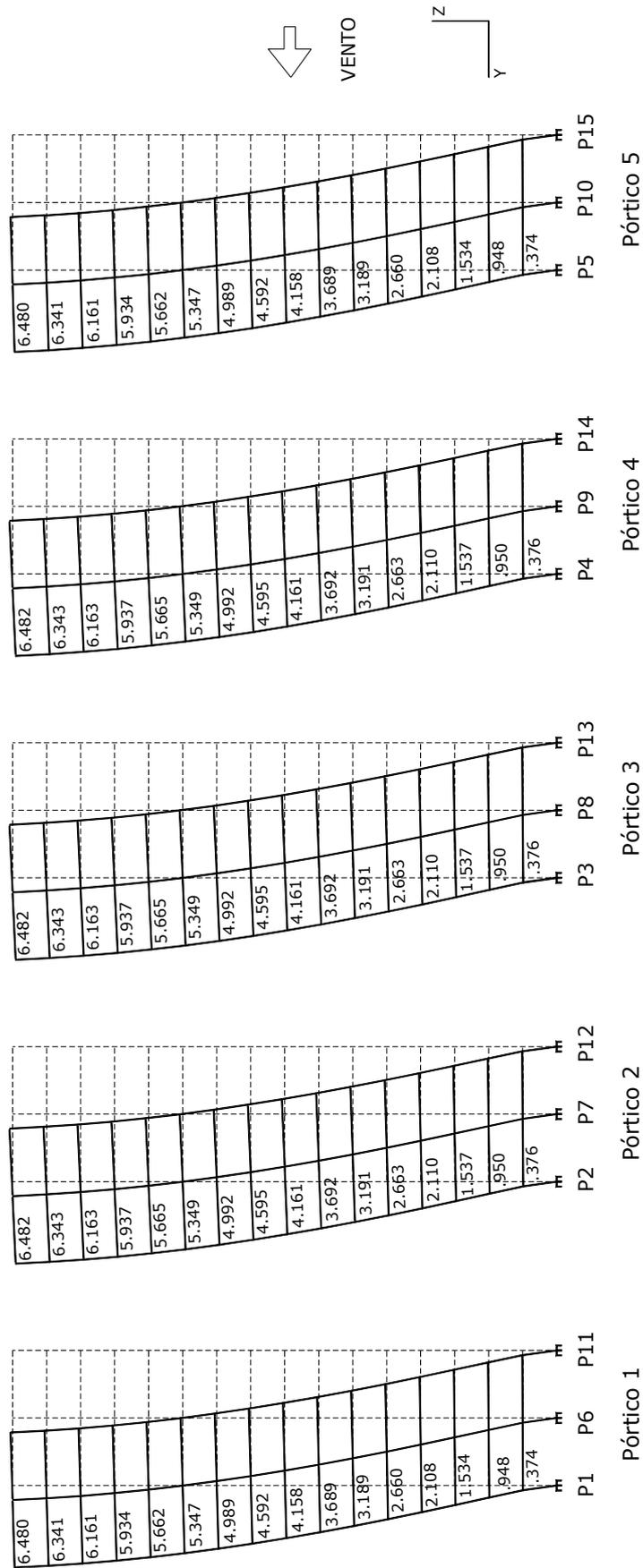


FIGURA 6.12 – Modelo PPA da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

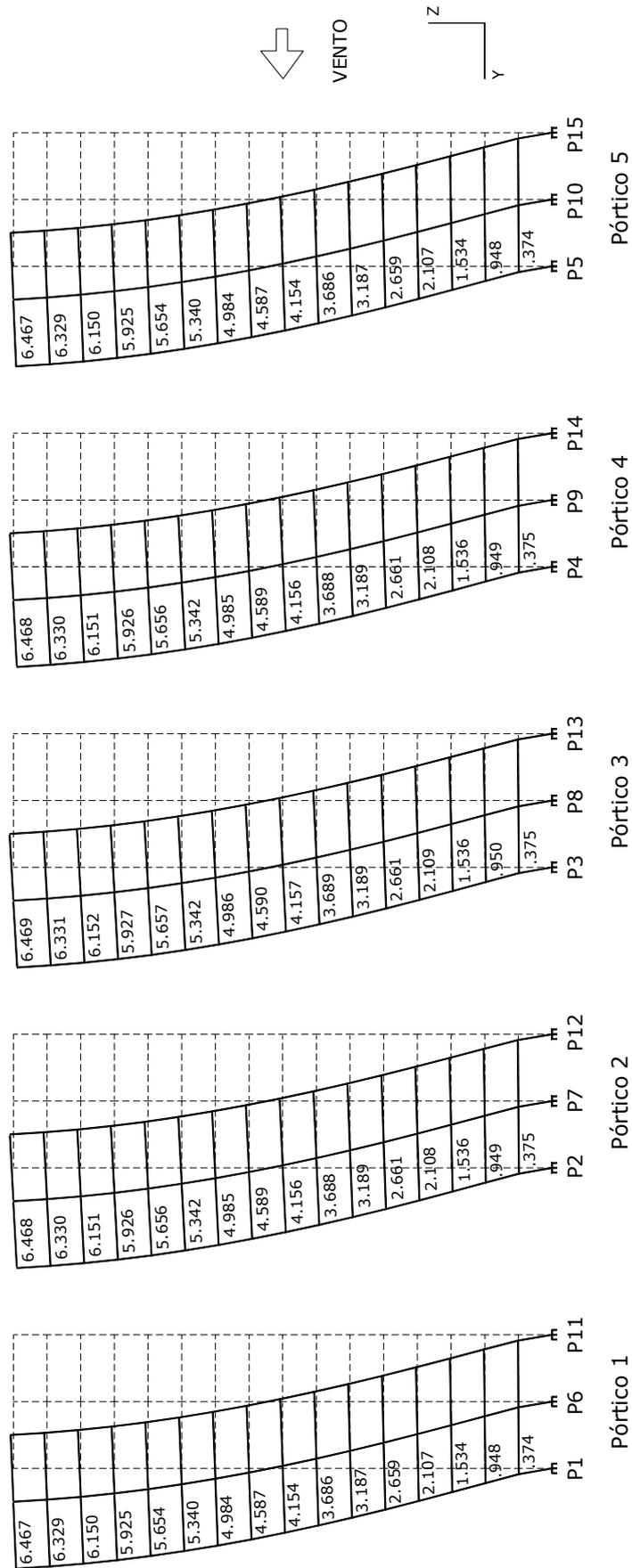


FIGURA 6.13 – Modelo PE da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

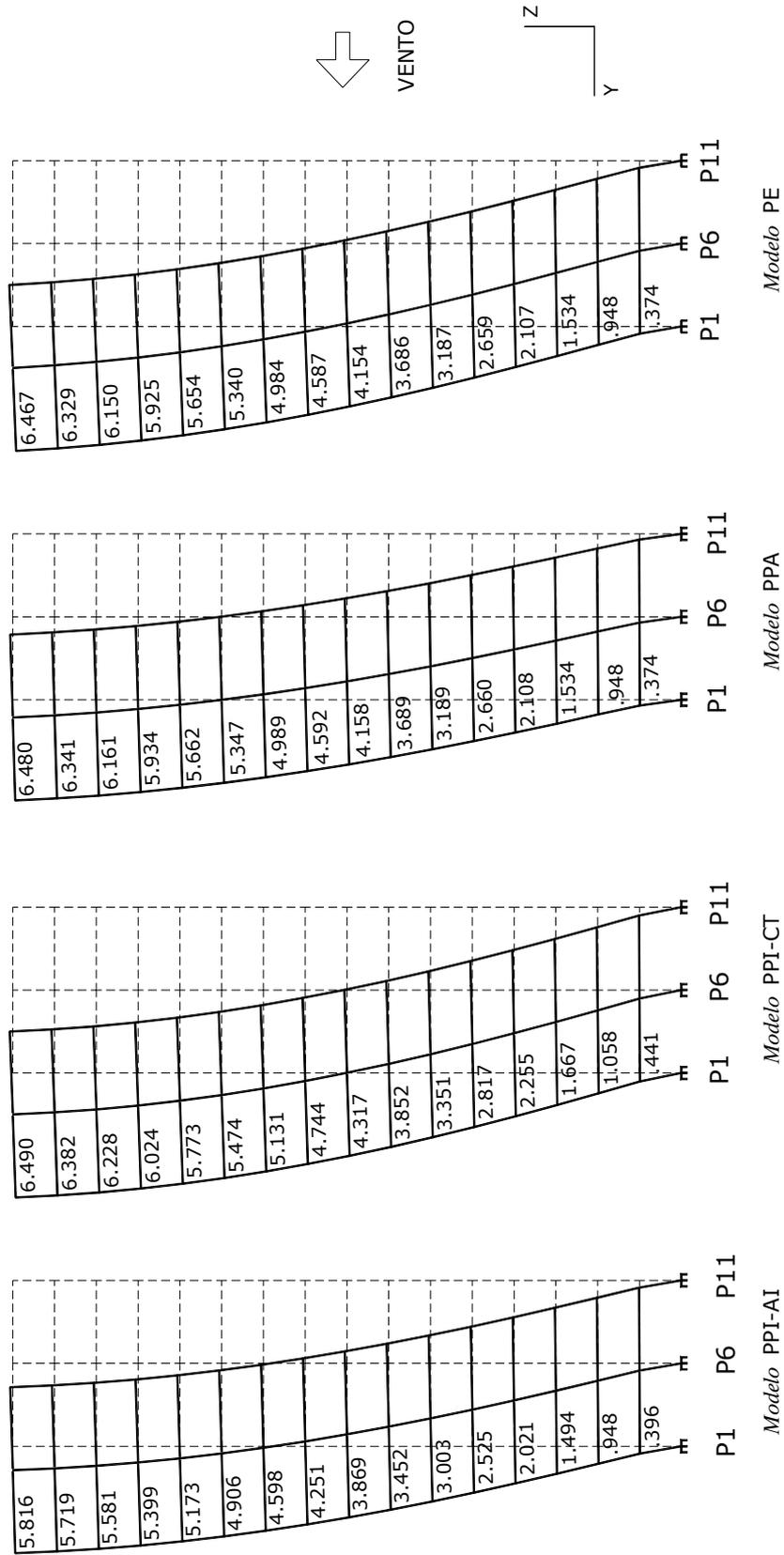


FIGURA 6.14 – Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

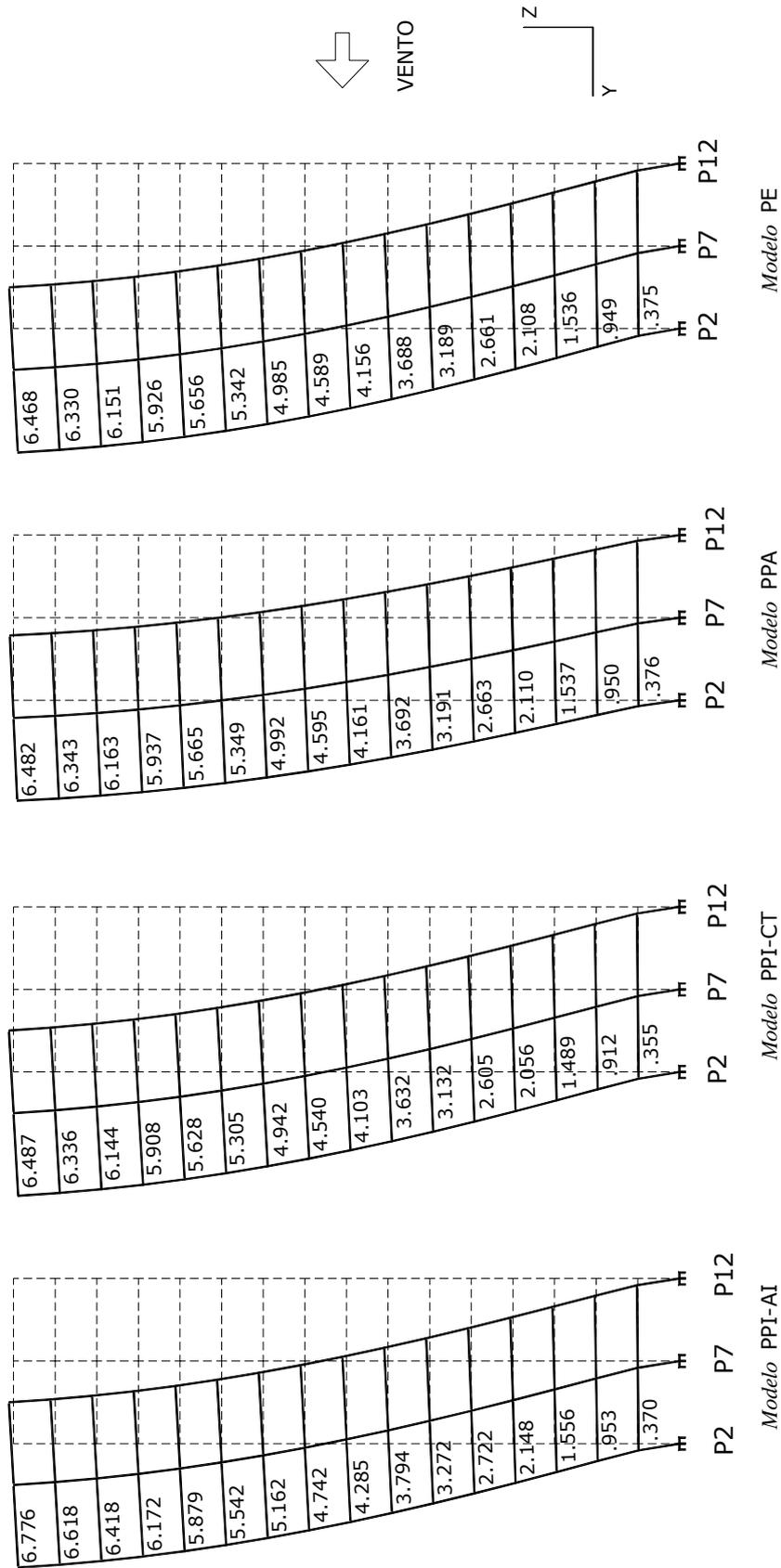


FIGURA 6.15 – Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 1: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

Nas TAB. 6.3 são apresentadas, para os Pórticos 1 e 2, as diferenças em porcentagem dos deslocamentos Δ_{yz} nos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE. Nesta análise é suficiente observar o comportamento somente destes pórticos, pois o Pórtico 1 é igual ao Pórtico 5 e o Pórtico 2 aos Pórticos 3 e 4.

Os valores destas diferenças percentuais foram obtidos através das FIG. 6.14 e 6.15, utilizando-se a expressão (6.1).

TABELA 6.3 – Diferenças em % dos deslocamentos Δ_{yz} dos Pórticos 1 e 2 da Estrutura 1.

ANDAR	$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 1			$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 2		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
16°	-10,07	0,36	0,20	4,76	0,29	0,22
15°	-9,64	0,84	0,19	5,55	0,09	0,21
14°	-9,25	1,27	0,18	6,34	-0,11	0,20
13°	-8,88	1,67	0,15	4,15	-0,30	0,19
12°	-8,51	2,10	0,14	3,94	-0,50	0,16
11°	-8,13	2,51	0,13	3,74	-0,69	0,13
10°	-7,74	2,95	0,10	3,55	-0,86	0,14
9°	-7,33	3,42	0,11	3,33	-1,07	0,13
8°	-6,86	3,92	0,10	3,10	-1,28	0,12
7°	-6,35	4,50	0,08	2,87	-1,52	0,11
6°	-5,77	5,15	0,06	2,60	-1,79	0,06
5°	-5,04	5,94	0,04	2,29	-2,10	0,08
4°	-4,08	7,02	0,05	1,90	-2,47	0,09
3°	-2,61	8,67	0,00	1,30	-3,06	0,07
2°	0,00	11,60	0,00	0,42	-3,90	0,11
1°	5,88	17,91	0,00	-1,33	-5,33	0,27

Comparando as diferenças percentuais entre os deslocamentos Δ_{yz} dos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA e os do Modelo PE (TAB. 6.3), observa-se que:

a) no Pórtico 1, Modelo PPI-AI, o maior módulo das diferenças percentuais é da ordem de 10% no 16° andar; nos demais andares os módulos destas diferenças percentuais são, conseqüentemente, inferiores a 10%;

- b) no Pórtico 1, Modelo PPI-CT, as diferenças percentuais são inferiores a 12%, exceto no 1º andar, onde a maior diferença percentual é da ordem de 18%;
- c) no Pórtico 1, Modelo PPA, os valores das diferenças percentuais são muito pequenos, e não ultrapassam 0,2%;
- d) no Pórtico 2, Modelo PPI-AI, o módulo máximo das diferenças percentuais é da ordem de 6%, no 14º andar;
- e) no Pórtico 2, Modelo PPI-CT, o módulo máximo das diferenças percentuais ocorre no 1º andar e é da ordem de 5%;
- f) no Pórtico 2, Modelo PPA, as diferenças percentuais não ultrapassam 0,3% sendo, portanto desprezíveis.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar os deslocamentos Δ_{yz} dos pórticos da Estrutura 1, pode-se afirmar que:

- a) o Modelo PPI-AI, apesar de apresentar pequenas diferenças percentuais em relação ao Modelo PE, não é confiável; isto porque, como se constatou no exame da FIG. 6.6, os deslocamentos laterais Δ_y no topo da estrutura não são iguais em todos os pórticos;
- b) o Modelo PPI-CT foi capaz de avaliar com boa precisão os deslocamentos Δ_{yz} dos pórticos da Estrutura 1, já que as diferenças percentuais não ultrapassam 12%, com exceção do 1º andar do Pórtico 1, onde o valor é da ordem de 18%; note-se, todavia, que os deslocamentos Δ_{yz} comparados no 1º andar têm pequenos valores, o que distorce o resultado obtido com a expressão (6.1) e, portanto, este valor pode ser desconsiderado;
- c) o Modelo PPA fez excelente avaliação dos deslocamentos Δ_{yz} , pois todas as diferenças percentuais não ultrapassam 0,3%; logo, percebe-se que este modelo, para a Estrutura 1, é o que melhor avaliou estes deslocamentos.

6.3 – Momentos Fletores nos Pórticos

A FIG. 6.16 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento do Pórtico 1 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 6.17 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento do Pórtico 2 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

Na TAB. 6.4 são apresentadas as diferenças em porcentagens dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1 e 2, calculadas comparando-se os Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE. Nesta análise é suficiente observar o comportamento somente destes pórticos, pois o Pórtico 1 é igual ao Pórtico 5 e o Pórtico 2 aos Pórticos 3 e 4.

Os valores destas diferenças são obtidos através das FIG. 6.16 e 6.17, utilizando-se a expressão (6.1). Para o Pórtico 1 são utilizados os valores dos momentos fletores na prumada P11 (FIG. 6.16) e para o Pórtico 2 os valores na prumada P12 (FIG. 6.17).

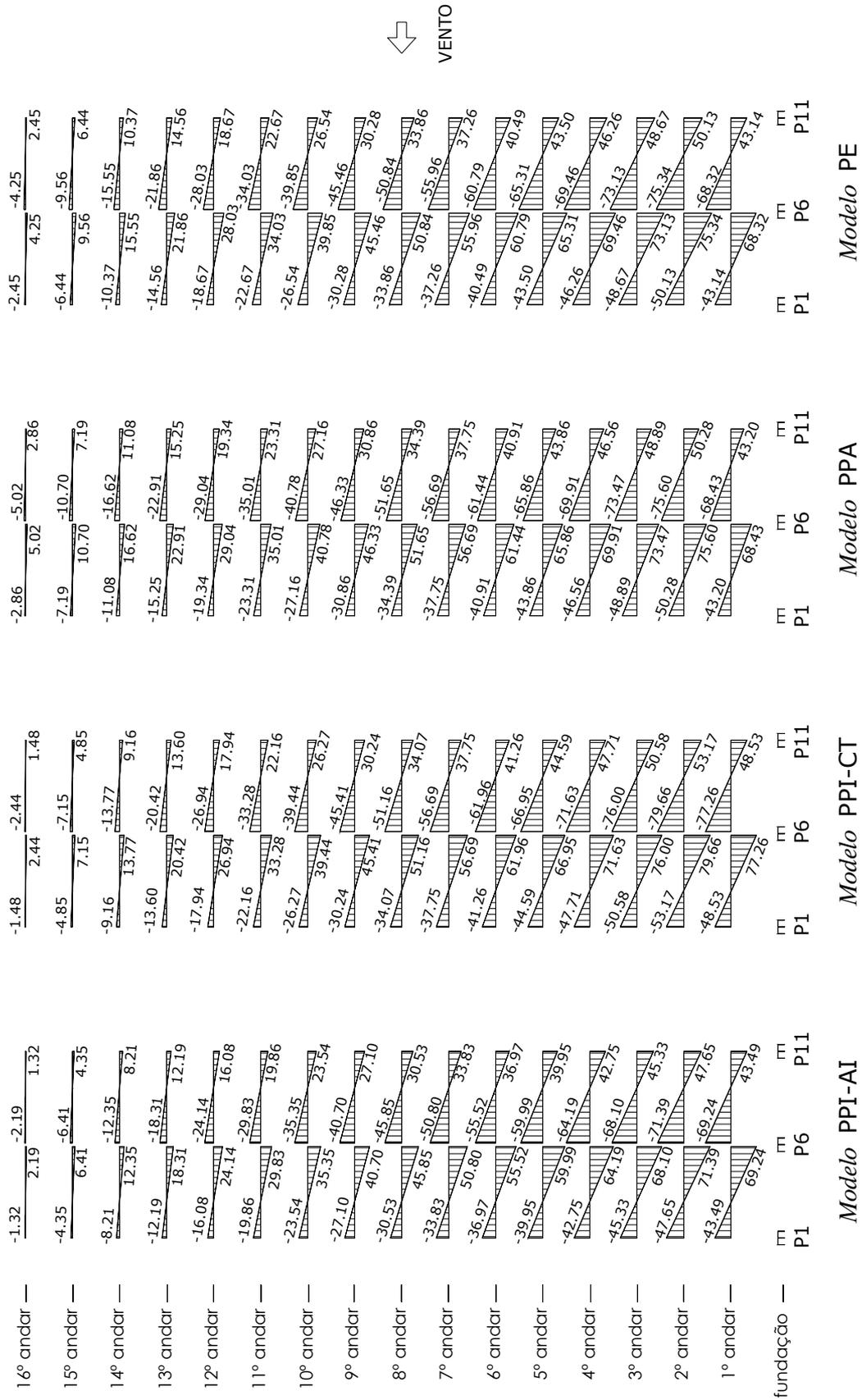


FIGURA 6.16 – Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 1: diagramas dos momentos fletores M_x no vigaento (em kN.m).

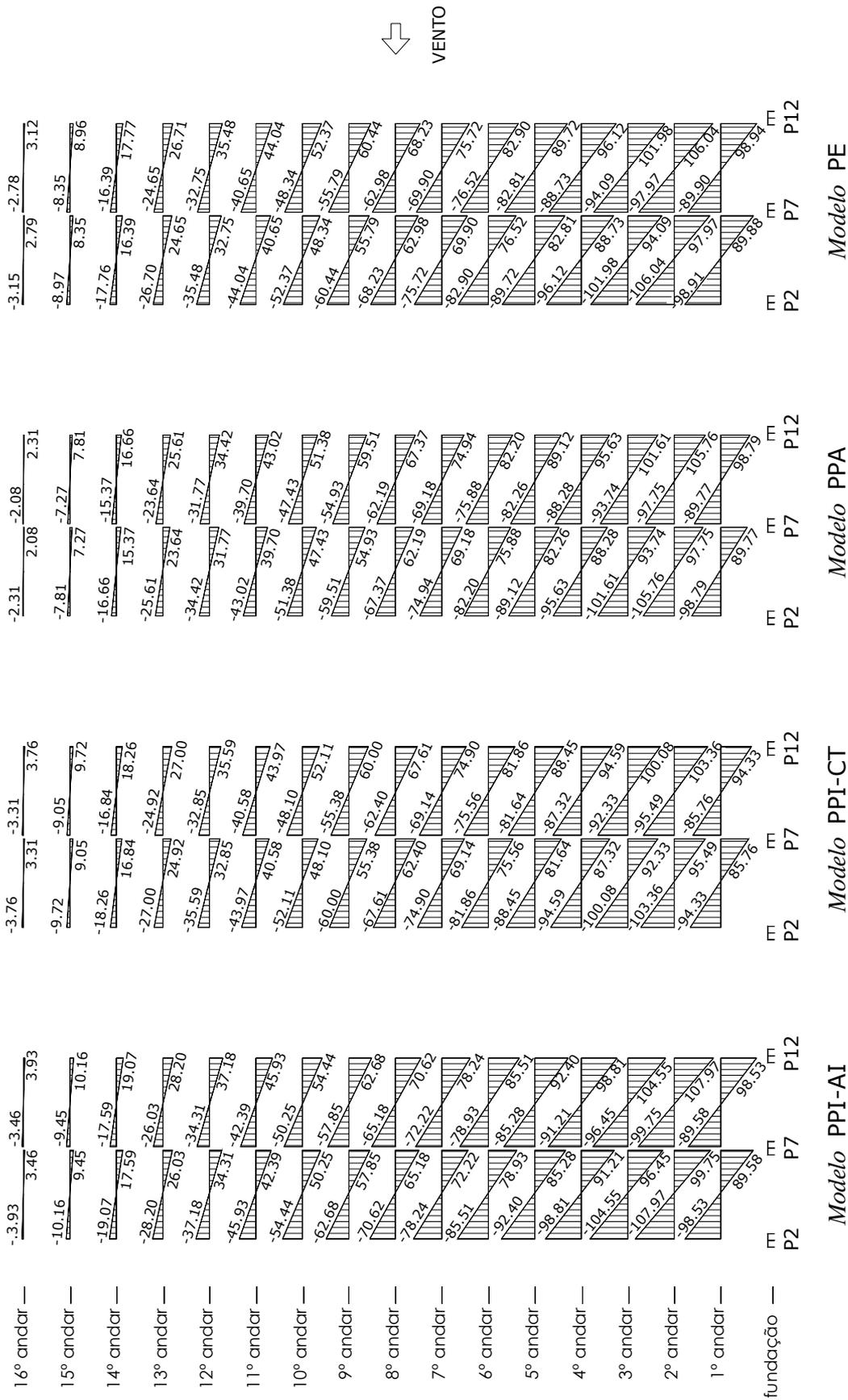


FIGURA 6.17 – Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 1: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m).

TABELA 6.4 – Diferenças em % dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1 e 2 da Estrutura 1.

ANDAR	$\Delta(M_x)$ do Pórtico 1			$\Delta(M_x)$ do Pórtico 2		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
16°	-46,12	-39,59	16,73	25,96	20,51	-25,96
15°	-32,45	-24,69	11,65	13,39	8,48	-12,83
14°	-20,83	-11,67	6,85	7,32	2,76	-6,25
13°	-16,28	-6,59	4,74	5,58	1,09	-4,12
12°	-13,87	-3,91	3,59	4,79	0,31	-2,99
11°	-12,40	-2,25	2,82	4,29	-0,16	-2,32
10°	-11,30	-1,02	2,34	3,95	-0,50	-1,89
9°	-10,50	-0,13	1,92	3,71	-0,73	-1,54
8°	-9,83	0,62	1,57	3,50	-0,91	-1,26
7°	-9,21	1,32	1,32	3,33	-1,08	-1,03
6°	-8,69	1,90	1,04	3,15	-1,25	-0,84
5°	-8,16	2,51	0,83	2,99	-1,42	-0,67
4°	-7,59	3,13	0,65	2,80	-1,59	-0,51
3°	-6,86	3,92	0,45	2,52	-1,86	-0,36
2°	-4,95	6,06	0,30	1,82	-2,53	-0,26
1°	0,81	12,49	0,14	-0,41	-4,66	-0,15

Comparando as diferenças percentuais dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1 e 2 da Estrutura 1, observa-se que:

- no Pórtico 1, Modelo PPI-AI, ocorrem diferenças significativas do 13° ao 16° andares, onde o módulo máximo das diferenças percentuais é da ordem de 46% no topo da estrutura; nos andares inferiores (1° ao 12°), estes módulos não ultrapassam 14%;
- no Pórtico 1, Modelo PPI-CT, os valores obtidos nos andares próximos ao topo da estrutura (14° ao 16°) apresentam diferenças percentuais significativas, onde o maior módulo destas diferenças é da ordem de 40%, no 16° andar; nos demais andares, os valores não ultrapassam 13%;
- no Pórtico 1, Modelo PPA, as diferenças percentuais são inferiores a 12%, exceto no 16° andar, onde a diferença percentual é da ordem de 17%;

d) no Pórtico 2, Modelo PPI-AI, os resultados obtidos para os módulos das diferenças percentuais são pequenos, inferiores a 8%, exceto nos dois últimos andares (15° e 16°); no 16° andar ocorre a diferença percentual máxima, de 25,96%;

e) no Pórtico 2, Modelo PPI-CT, o maior módulo das diferenças percentuais é da ordem de 20%, no 16° andar; nos demais andares os módulos destas diferenças são pequenos, inferiores a 9%;

f) no Pórtico 2, Modelo PPA, os resultados obtidos para os módulos das diferenças percentuais são pequenos, inferiores a 7%, exceto nos dois últimos andares (15° e 16°), onde os módulos são da ordem de 13% e 26%, respectivamente.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar os momentos fletores no vigamento dos pórticos da Estrutura 1, pode-se afirmar que:

a) o Modelo PPI-AI apresenta diferenças percentuais significativas apenas nos andares superiores do Pórtico 1 (13° ao 16°); no Pórtico 2, com exceção do 16° andar, os valores não apresentam diferenças significativas; isto pode passar a falsa idéia de que tal modelo é capaz de avaliar bem os momentos fletores nas vigas; entretanto, esta falsa idéia é descartada quando se observa que os deslocamentos laterais dos Pórticos 1 e 2 não são iguais em nenhum dos andares (FIG. 6.6 e 6.10), o que comprova a baixa qualidade deste modelo;

b) o Modelo PPI-CT foi capaz de avaliar com boa precisão os momentos fletores no vigamento dos pórticos da Estrutura 1, já que as diferenças percentuais não ultrapassam 9%, com exceção dos andares 1°, 14°, 15° e 16° do Pórtico 1 e 16° andar do Pórtico 2; note-se, todavia, que os momentos fletores nos andares superiores são pequenos, o que distorce os valores das diferenças percentuais calculadas com a expressão (6.1);

c) o Modelo PPA avaliou melhor os valores dos momentos fletores nas vigas dos pórticos, já que as diferenças percentuais não ultrapassam 7%, com exceção dos andares 15° e 16° em ambos os pórticos; também neste modelo, nota-se que os momentos fletores nos andares superiores são pequenos, o que distorce os resultados obtidos com a expressão 6.1; portanto, o Modelo PPA é o que melhor avaliou os momentos fletores na Estrutura 1, entre os modelos planos utilizados.

7

Análise dos Resultados da Estrutura 2

Neste capítulo, são feitas análises comparativas dos resultados obtidos através dos processamentos realizados para a Estrutura 2.

Os resultados comparados são:

- cargas na fundação;
- deslocamentos laterais nos pórticos;
- momentos fletores no vigamento dos pórticos.

7.1 - Cargas nas Fundações

Na TAB. 7.1, são apresentados os valores dos esforços nas fundações da Estrutura 2 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

F_y , F_z e M_x são cargas nas fundações que serão analisadas na Estrutura 2 e significam, respectivamente:

F_y – força na direção y;

TABELA 7.1 – Esforços nas fundações da Estrutura 2.

PILAR	MODELO PPI-AI			MODELO PPI-CT			MODELO PPA			MODELO PE		
	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x
P1=P5	12,80	184,95	-19,88	14,23	205,61	-22,10	9,74	202,94	-15,26	9,68	147,31	-15,13
P2=P4	48,98	333,01	-108,33	46,75	317,82	-103,39	37,96	313,50	-87,63	37,84	187,97	-86,88
P3	48,98	333,01	-108,33	46,75	317,82	-103,39	37,96	313,50	-87,63	37,81	190,65	-86,84
P6=P10	64,74	0,00	-128,44	71,97	0,00	-142,78	44,70	0,00	-94,37	44,94	0,00	-94,28
P7=P9	66,17	0,00	-125,52	63,15	0,00	-119,80	52,81	0,00	-102,48	53,23	0,00	-102,57
P8	66,17	0,00	-125,52	63,15	0,00	-119,80	52,81	0,00	-102,48	53,21	0,00	-102,53
P11=P15	12,80	-184,95	-19,88	14,23	-205,61	-22,10	9,74	-202,94	-15,26	9,69	-147,31	-15,14
P12=P14	48,98	-333,01	-108,33	46,75	-317,82	-103,39	37,96	-313,50	-87,63	37,87	-187,97	-86,94
P13	48,98	-333,01	-108,33	46,75	-317,82	-103,39	37,96	-313,50	-87,63	37,84	-190,65	-86,90
P101=P104	0,00	0,00	0,00	0,29	0,00	-7,71	19,87	0,00	-69,54	19,75	113,72	-68,80
P102=P103	0,00	0,00	0,00	0,29	0,00	-7,71	19,87	0,00	-69,54	19,70	128,88	-68,74
P105=P108	0,00	0,00	0,00	0,29	0,00	-7,71	19,87	0,00	-69,54	19,78	-113,72	-68,87
P106=P107	0,00	0,00	0,00	0,29	0,00	-7,71	19,87	0,00	-69,54	19,73	-128,88	-68,79

F_z – força na direção z;

M_x – momento na direção x.

Os sentidos considerados positivos para as cargas nas fundações da Estrutura 2 estão mostrados na FIG. 6.1.

Os valores de F_x , M_y e M_z são sempre nulos para os modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA. Por este motivo, não são apresentados na TAB. 7.1.

Para uma melhor visualização, os valores dos esforços nas fundações da Estrutura 2 da TAB. 7.1 estão representados na forma de gráficos nas FIG. 7.1, 7.2 e 7.3.

Devido à simetria, alguns pilares não aparecem nos gráficos.

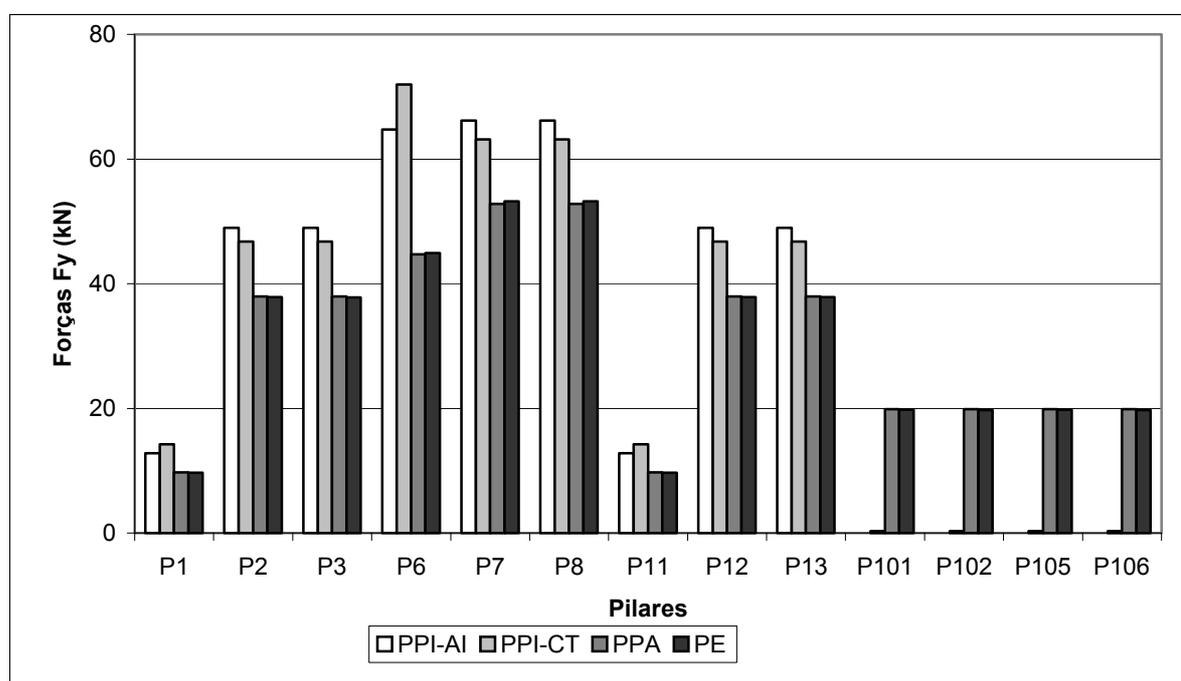
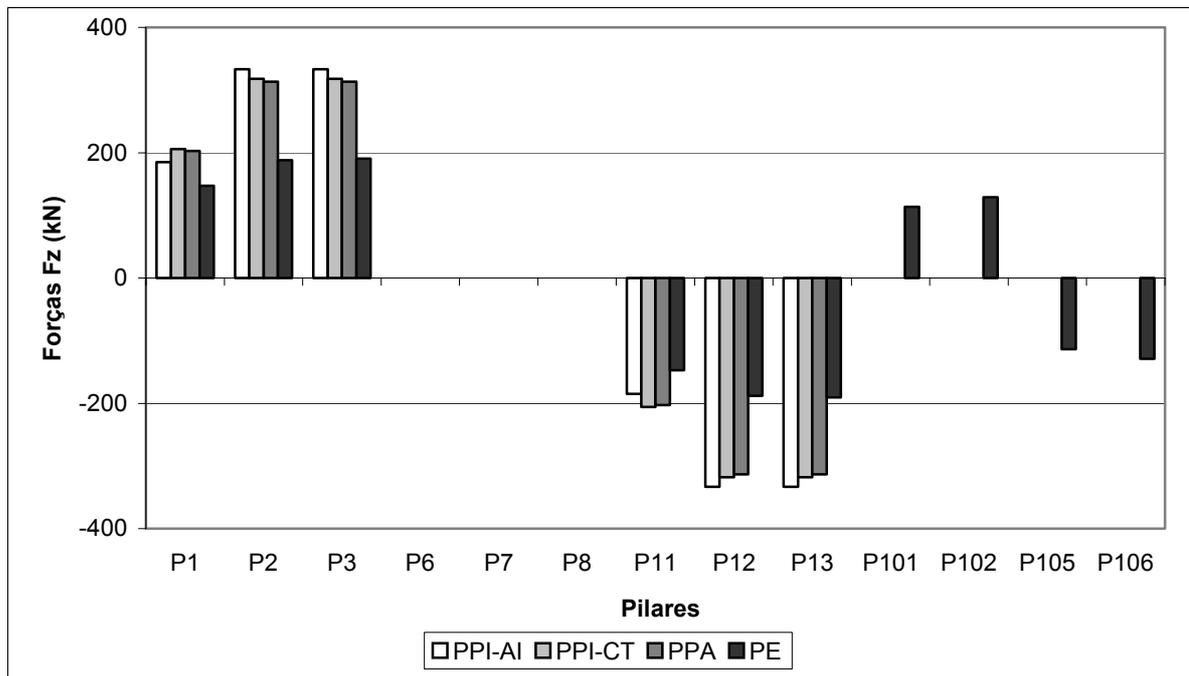
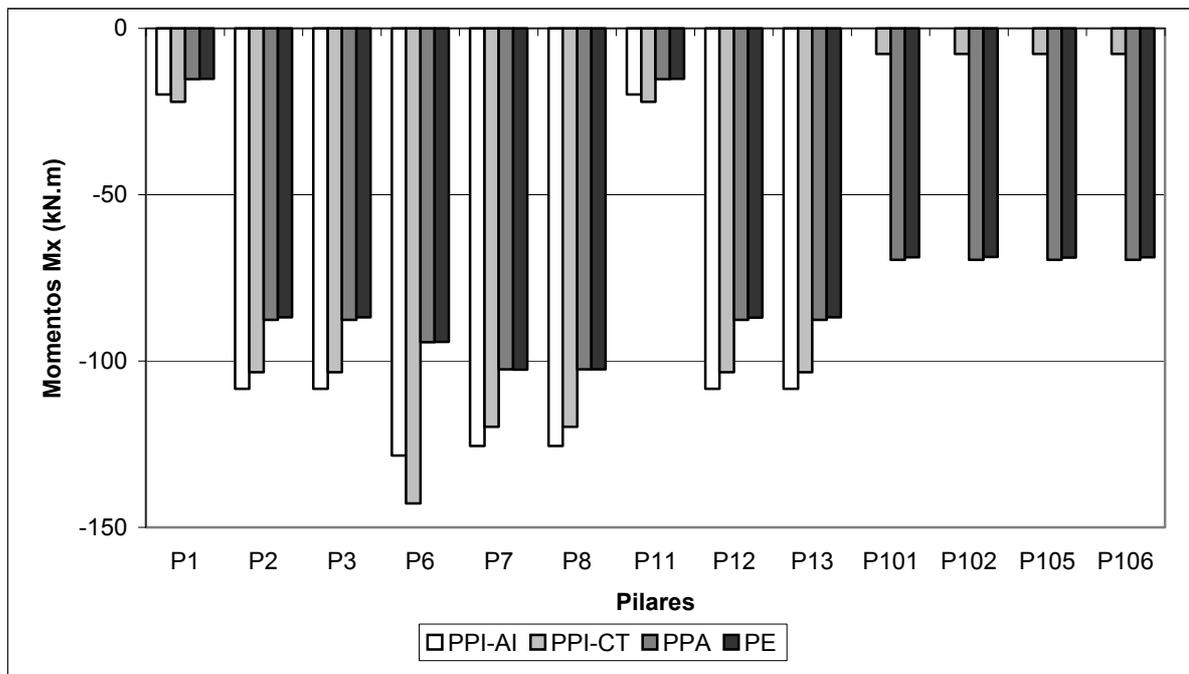


FIGURA 7.1 – Forças F_y nas fundações da Estrutura 2.

FIGURA 7.2 – Forças F_z nas fundações da Estrutura 2.FIGURA 7.3 – Momentos M_x nas fundações da Estrutura 2.

A seguir, na TAB. 7.2 são apresentadas as diferenças percentuais dos esforços nas fundações da Estrutura 2 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE. Os valores destas diferenças foram obtidos através da expressão (6.1).

O Modelo PE é tomado como referência, entre os quatro modelos existentes neste trabalho, por ser o que mais se aproxima do real comportamento da Estrutura 2.

TABELA 7.2 – Diferenças em % dos esforços nas fundações da Estrutura 2.

PILAR	$\Delta(F_y)\%$			$\Delta(F_z)\%$			$\Delta(M_x)\%$		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
P1=P5	32,23	47,00	0,62	25,55	39,58	37,76	-31,39	-46,07	-0,86
P2=P4	29,44	23,55	0,32	77,16	69,08	66,78	-24,69	-19,00	-0,86
P3	29,54	23,64	0,40	74,67	66,70	64,44	-24,75	-19,06	-0,91
P6=P10	44,06	60,15	-0,53	0,00	0,00	0,00	-36,23	-51,44	-0,10
P7=P9	24,31	18,64	-0,79	0,00	0,00	0,00	-22,37	-16,80	0,09
P8	24,36	18,68	-0,75	0,00	0,00	0,00	-22,42	-16,84	0,05
P11=P15	32,09	46,85	0,52	-25,55	-39,58	-37,76	-31,31	-45,97	-0,79
P12=P14	29,34	23,45	0,24	-77,16	-69,08	-66,78	-24,60	-18,92	-0,79
P13	29,44	23,55	0,32	-74,67	-66,70	-64,44	-24,66	-18,98	-0,84
P101=P104	-100,00	-98,53	0,61	-100,00	-100,00	-100,00	100,00	88,79	-1,08
P102=P103	-100,00	-98,53	0,86	-100,00	-100,00	-100,00	100,00	88,78	-1,16
P105=P108	-100,00	-98,53	0,46	100,00	100,00	100,00	100,00	88,80	-0,97
P106=P107	-100,00	-98,53	0,71	100,00	100,00	100,00	100,00	88,79	-1,09

Na Tabela 7.2, observa-se que:

- as forças F_y , Modelo PPI-AI, apresentam módulo máximo das diferenças percentuais de 100% que são observadas nos Pilares Isolados P101, P102, P103, P104, P105, P106, P107 e P108;
- as forças F_y , Modelo PPI-CT, apresentam diferenças percentuais significativas cujos módulos chegam a aproximadamente 99%, também observados em P101, P102, P103, P104, P105, P106, P107 e P108;

- c) as forças F_y , Modelo PPA, apresentam diferenças percentuais muito pequenas e não ultrapassam 0,9%, tornando-se desprezíveis;
- d) as forças F_z , Modelo PPI-AI, apresentam resultados com diferenças percentuais máximas de 100% em valor absoluto, nos Pilares Isolados P101, P102, P103, P104, P105, P106, P107 e P108; o mesmo ocorre nos Modelos PPI-CT e PPA;
- e) os momentos M_x , Modelo PPI-AI, apresentam diferenças percentuais, em valor absoluto, de 100%, em P101, P102, P103, P104, P105, P106, P107 e P108;
- f) os momentos M_x , Modelo PPI-CT, apresentam módulos de diferenças percentuais que alcançam valores de aproximadamente 89%, também em P101, P102, P103, P104, P105, P106, P107 e P108;
- g) os momentos M_x , Modelo PPA, apresentam diferenças percentuais pequenas cujos módulos não ultrapassam 1,2%.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar as cargas nas fundações da Estrutura 2, pode-se afirmar que:

- a) o Modelo PPI-AI apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 100% para F_y , F_z e M_x , nos Pilares Isolados P101, P102, P103, P104, P105, P106, P107 e P108; como este modelo obedece a critérios geométricos para determinar o carregamento em cada painel vertical enrijecido, os pilares isolados não contribuem em momento algum para o comportamento conjunto dos esforços nas fundações da Estrutura 2; a não inclusão dos pilares isolados no Modelo PPI-AI mostra a baixa qualidade deste modelo; logo, os demais resultados obtidos não são confiáveis;
- b) o Modelo PPI-CT apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 99% para F_y , 100% para F_z e 89% para M_x ; isto mostra que o modelo foi incapaz de avaliar adequadamente os esforços nas fundações relativas aos Pilares Isolados P101, P102, P103, P104, P105, P106, P107 e P108, que estão incluídos no modelo; porém, sua inclusão ocorre de maneira inadequada pois a compatibilização é feita apenas no topo da estrutura e, neste caso, a ação das vigas V1 e V3 (FIG. 3.2) sobre os pilares isolados não é levada em

consideração; nota-se que nos demais pilares os módulos das diferenças percentuais são significativos, exceto nos pilares P6, P7, P8, P9 e P10, que estão no eixo de simetria da direção x; logo, percebe-se que o Modelo PPI-CT também é de baixa qualidade para avaliar os esforços nas fundações da Estrutura 2;

c) o Modelo PPA apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 0,9% para F_y , 100% para F_z e 1,2% para M_x ; este modelo é superior aos Modelos PPI-AI e PPI-CT por compatibilizar os deslocamentos laterais em todos os andares, além de levar em consideração as rigidezes dos painéis verticais; o Modelo PPA foi incapaz de avaliar adequadamente as forças F_z relativas aos Pilares Isolados P101, P102, P103, P104, P105, P106, P107 e P108, pois a compatibilização, apesar de ser feita em todos os andares da estrutura, não leva em consideração a ação das vigas V1 e V3 (FIG. 3.2) sobre os pilares isolados; todavia, observa-se que as forças F_y e os momentos fletores M_x apresentam resultados bastante próximos dos obtidos no Modelo PE; logo, percebe-se que o Modelo PPA, dentre os modelos planos deste trabalho, é o que melhor avaliou os esforços F_y e M_x nas fundações da Estrutura 2.

7.2 – Deslocamentos Laterais nos Pórticos e Pilares Isolados

As FIG. 7.4, 7.5, 7.6 e 7.7 mostram os deslocamentos Δ_y no topo dos Pórticos 1, 2, 3, 4, 5 e dos pares de Pilares Isolados (P101+P105), (P102+P106), (P103+P107) e (P104+P108) nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE, respectivamente.

As FIG. 7.8, 7.9, 7.10 e 7.11 apresentam, nos diversos andares, os deslocamentos Δ_{yz} nos nós dos Pórticos 1, 2, 3, 4, 5 e do Pilar Isolado P101 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE, respectivamente.

A FIG. 7.12 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 1 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 7.13 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 2 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 7.14 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pilar Isolado P101 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

Em todos os modelos, devido à simetria da Estrutura 2, a laje do topo deve transladar na direção y sob a ação do vento e os deslocamentos Δ_y no topo devem ser iguais em todos os pórticos e pilares isolados. Isto não ocorre, todavia, no Modelo PPI-AI (FIG. 7.4), o que já evidencia a qualidade duvidosa deste modelo.

Nas FIG. 7.8, 7.9, 7.10 e 7.11 os deslocamentos Δ_{yz} no topo de todos os pórticos e pilares isolados deveriam ser praticamente iguais entre si. O mesmo pode-se afirmar para os demais andares. Todavia, como se constata pelo exame das FIG. 7.8 e 7.9, isto não ocorre nos Modelos PPI-AI e PPI-CT.

Por outro lado, o exame das FIG. 7.10 e 7.11 relativas aos Modelos PPA e PE, respectivamente, mostra que os deslocamentos Δ_{yz} no topo e demais andares dos pórticos e pilares isolados são bastante próximos entre si. As pequenas diferenças encontradas nos valores de Δ_{yz} no topo e demais andares devem-se ao deslocamento vertical Δ_z já que, devido à rigidez da laje em seu plano, o deslocamento lateral Δ_y deve ser o mesmo em todos os pórticos e pilares isolados.

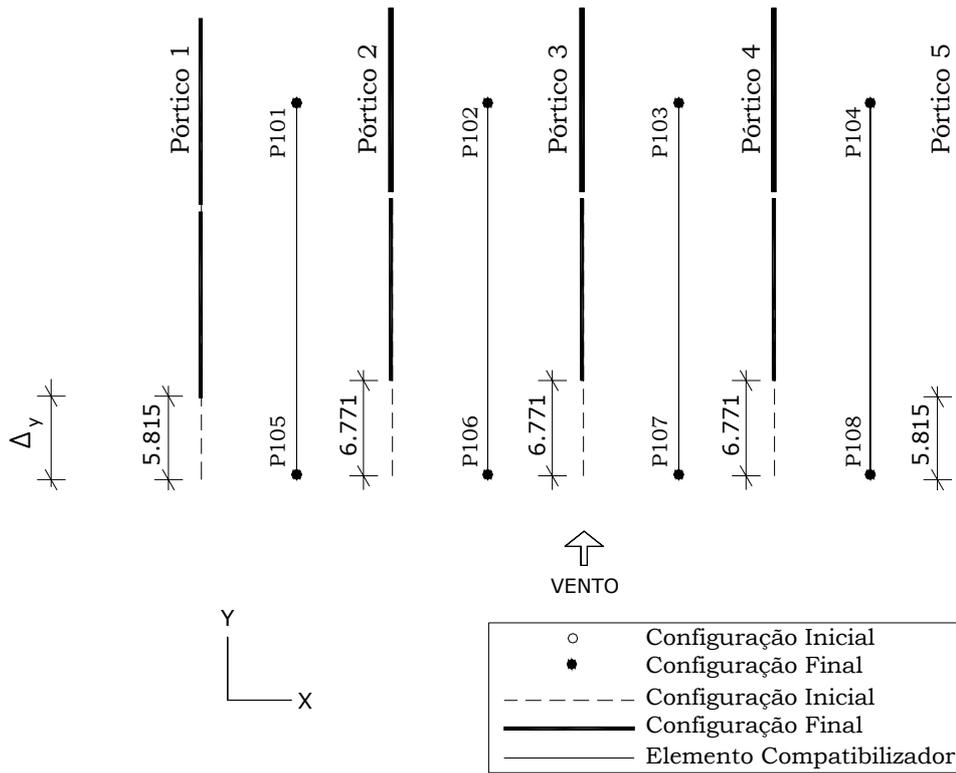


FIGURA 7.4 – Modelo PPI-AI da Estrutura 2: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

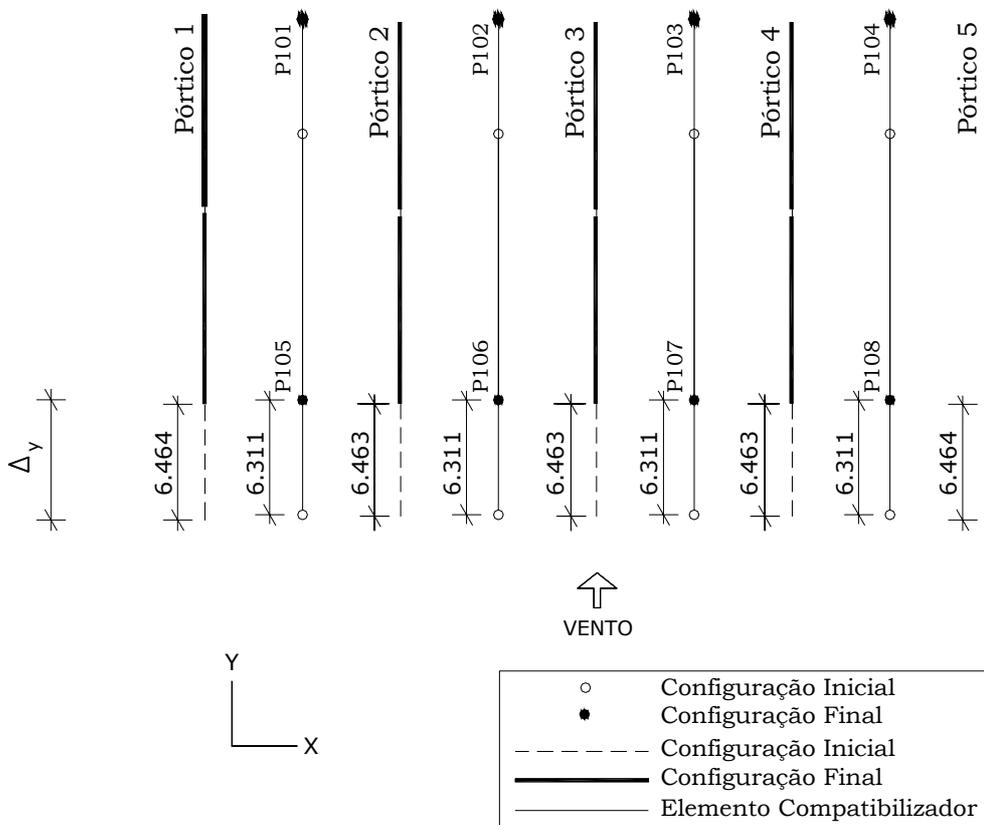


FIGURA 7.5 – Modelo PPI-CT da Estrutura 2: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

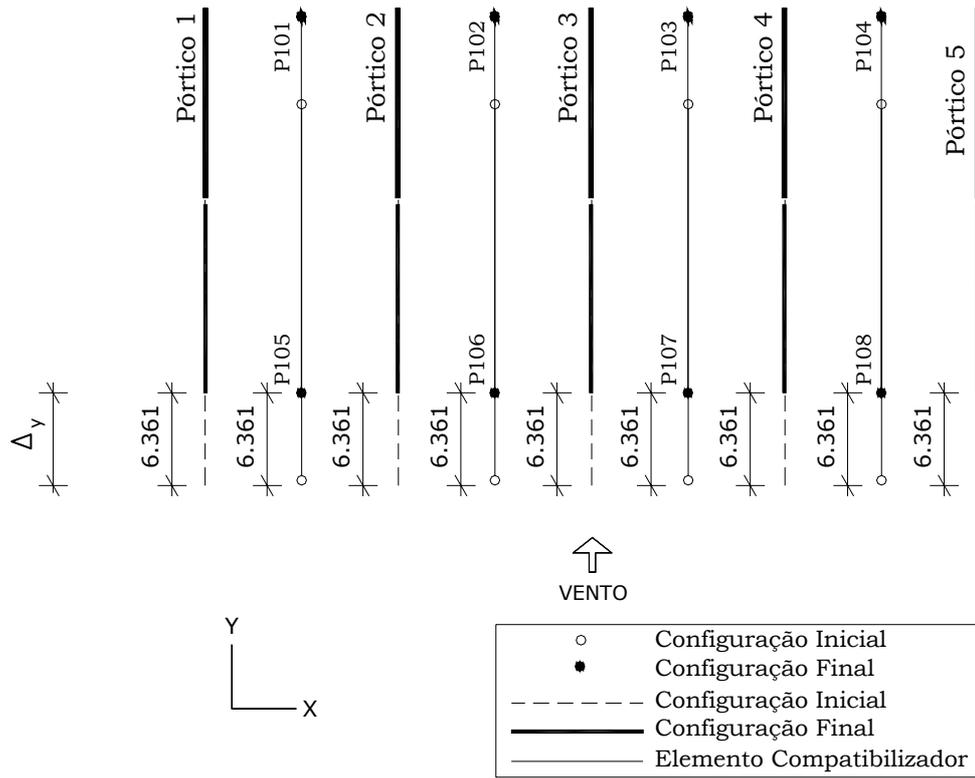


FIGURA 7.6 – Modelo PPA da Estrutura 2: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

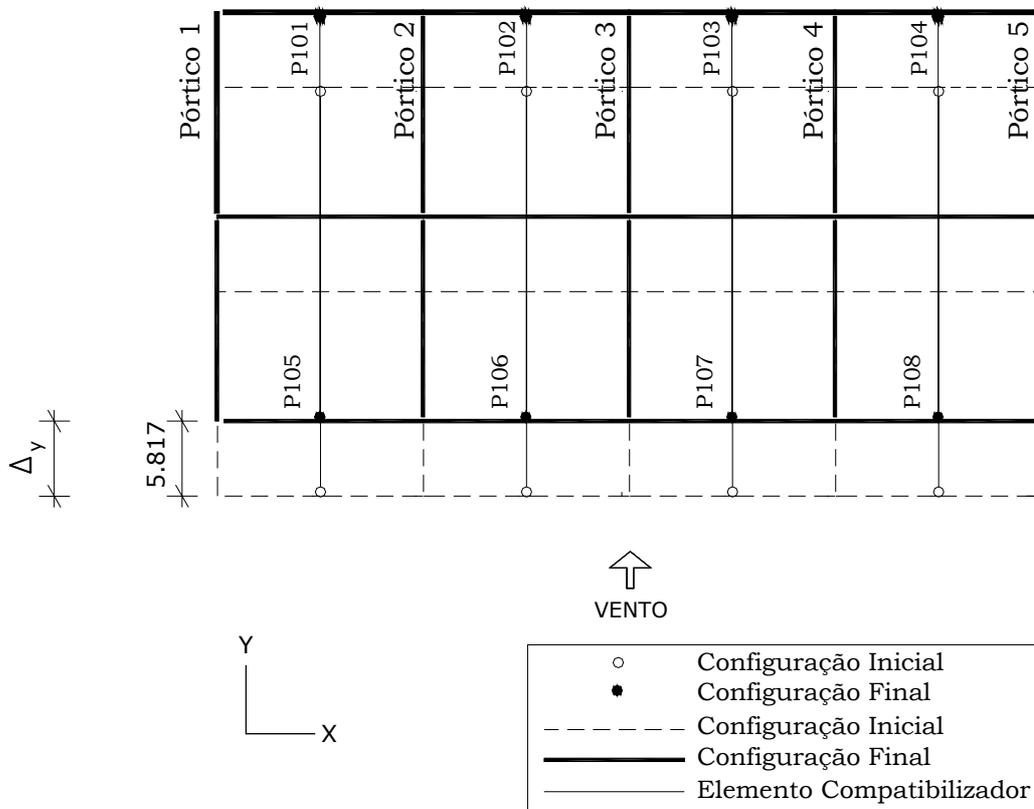


FIGURA 7.7 – Modelo PE da Estrutura 2: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

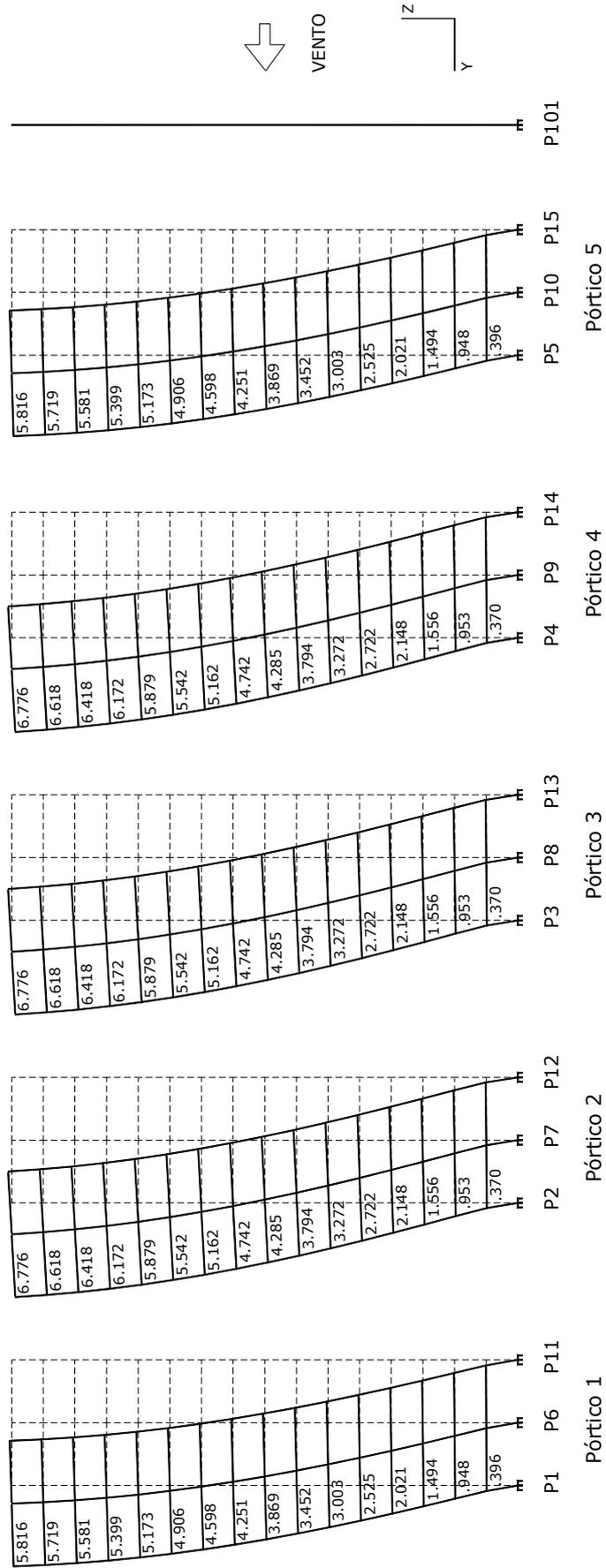


FIGURA 7.8 – Modelo PPI-AI da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

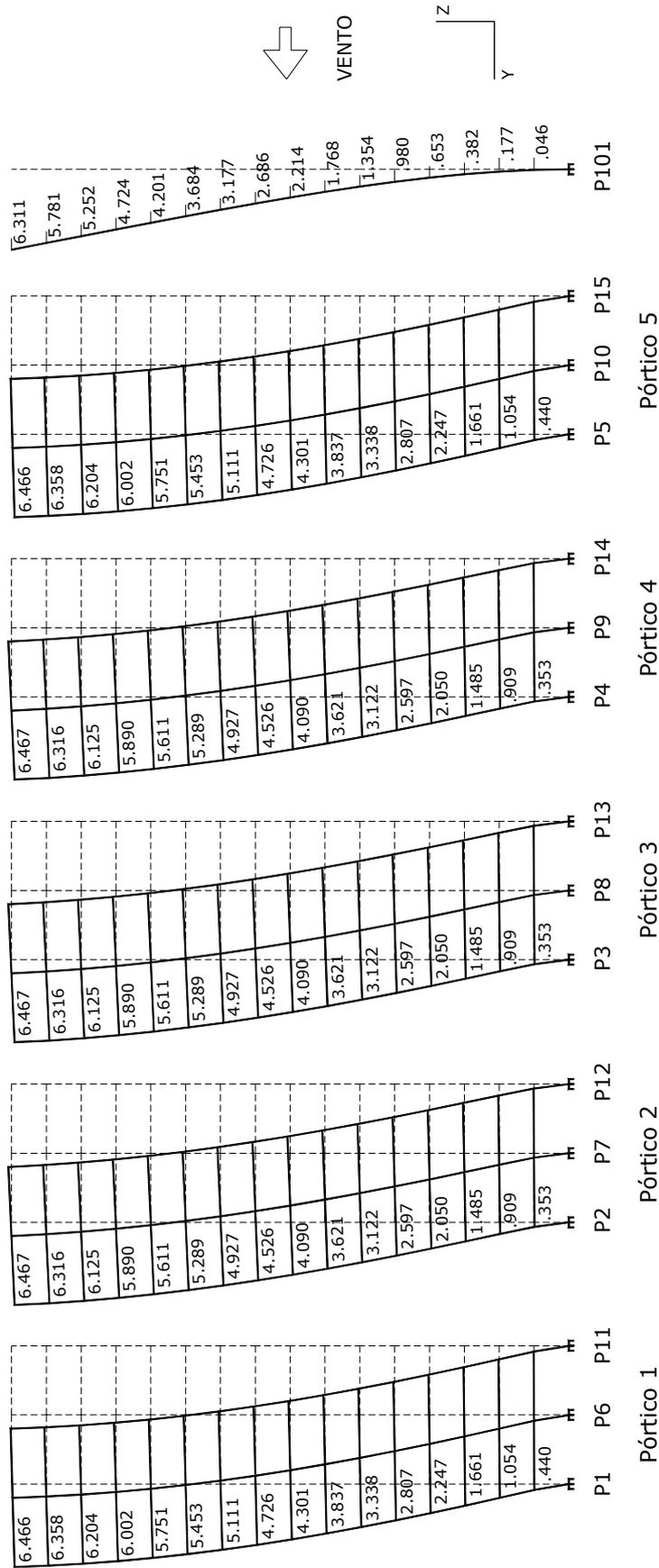


FIGURA 7.9 – Modelo PPI-CT da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

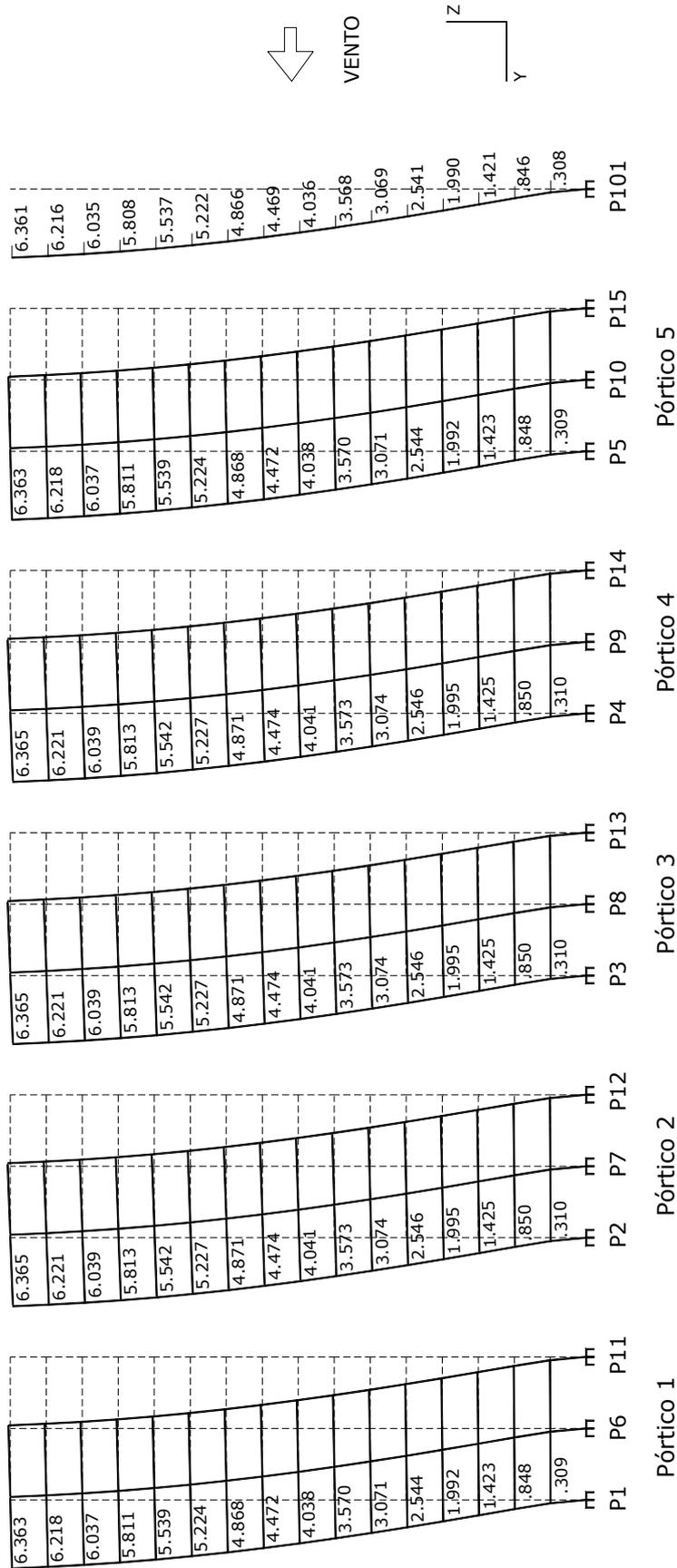


FIGURA 7.10 – Modelo PPA da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

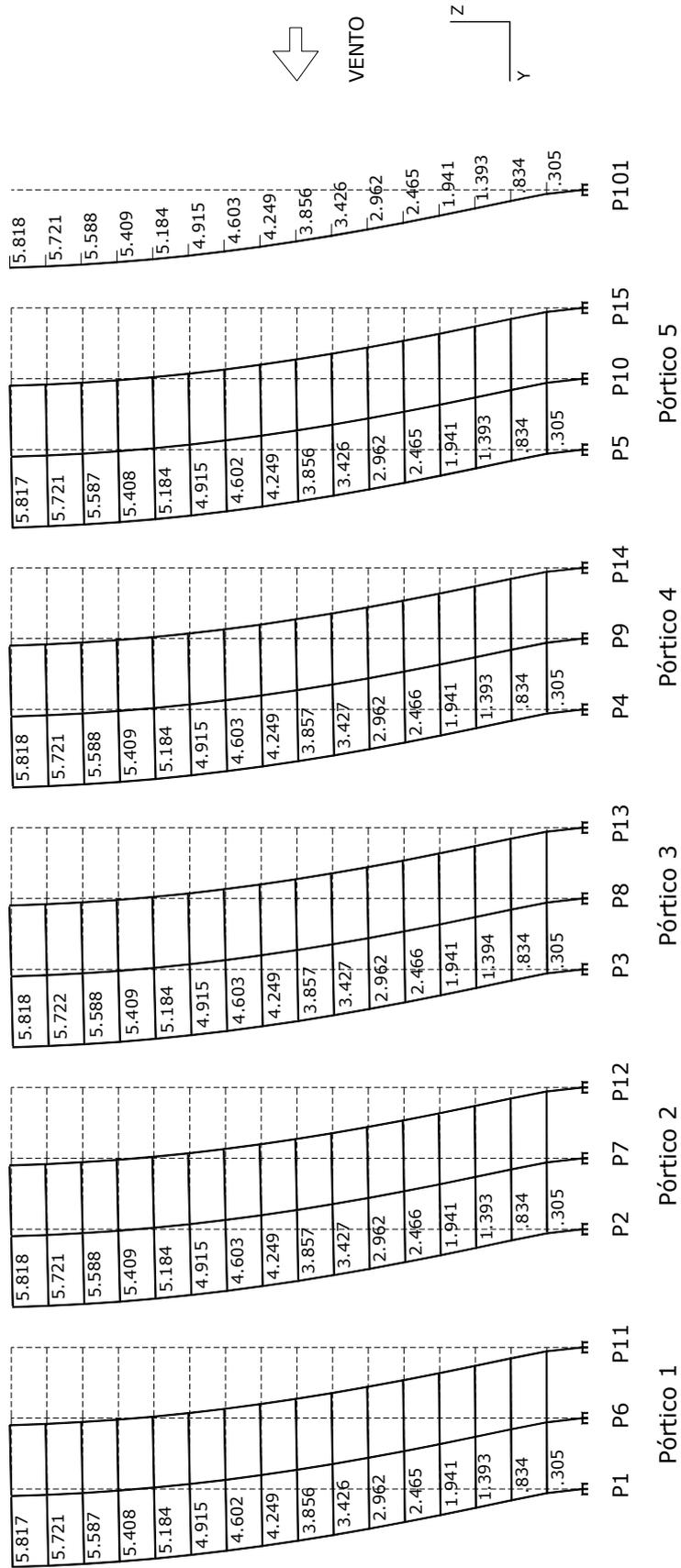


FIGURA 7.11 – Modelo PE da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

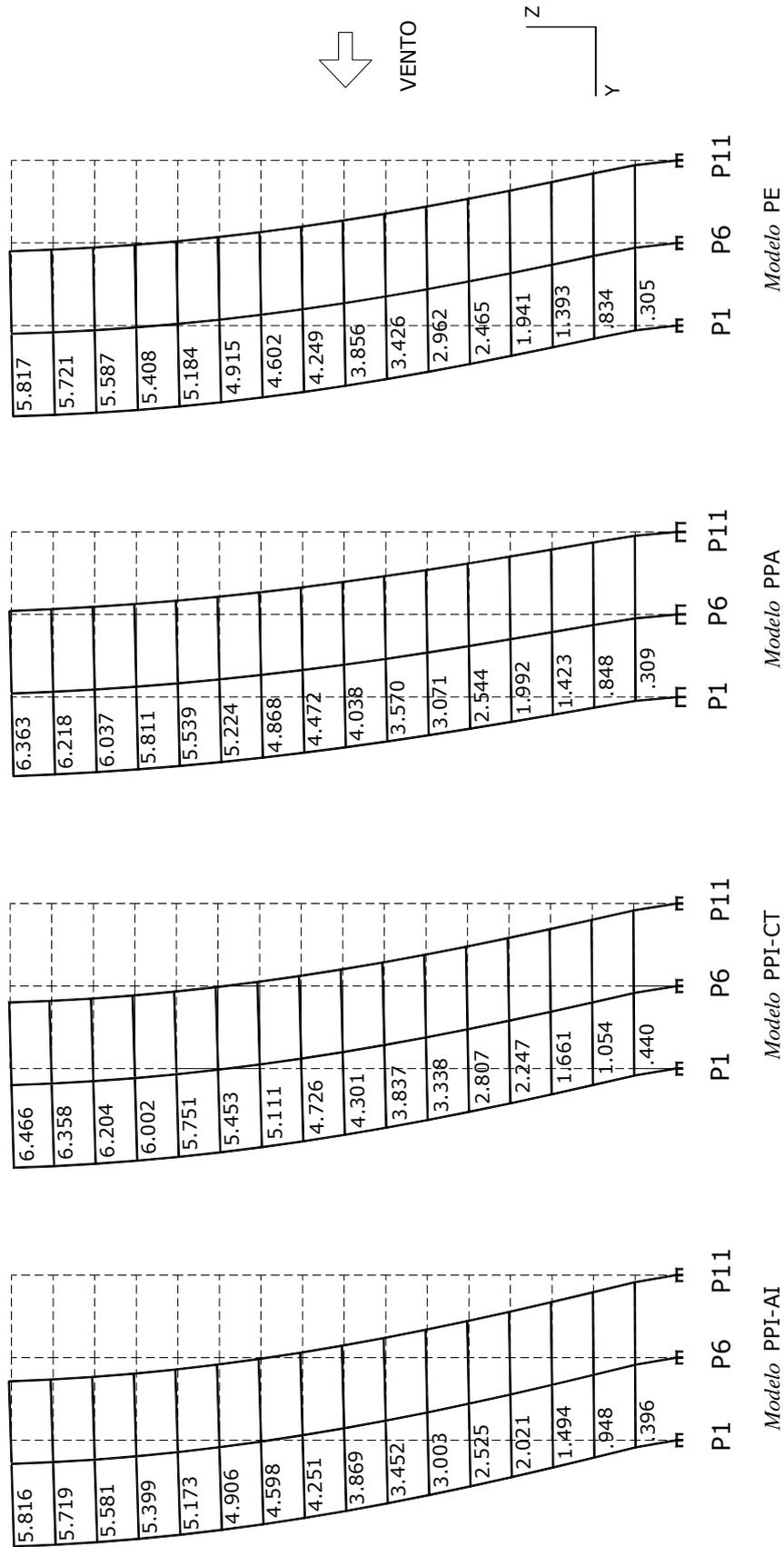


FIGURA 7.12 – Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

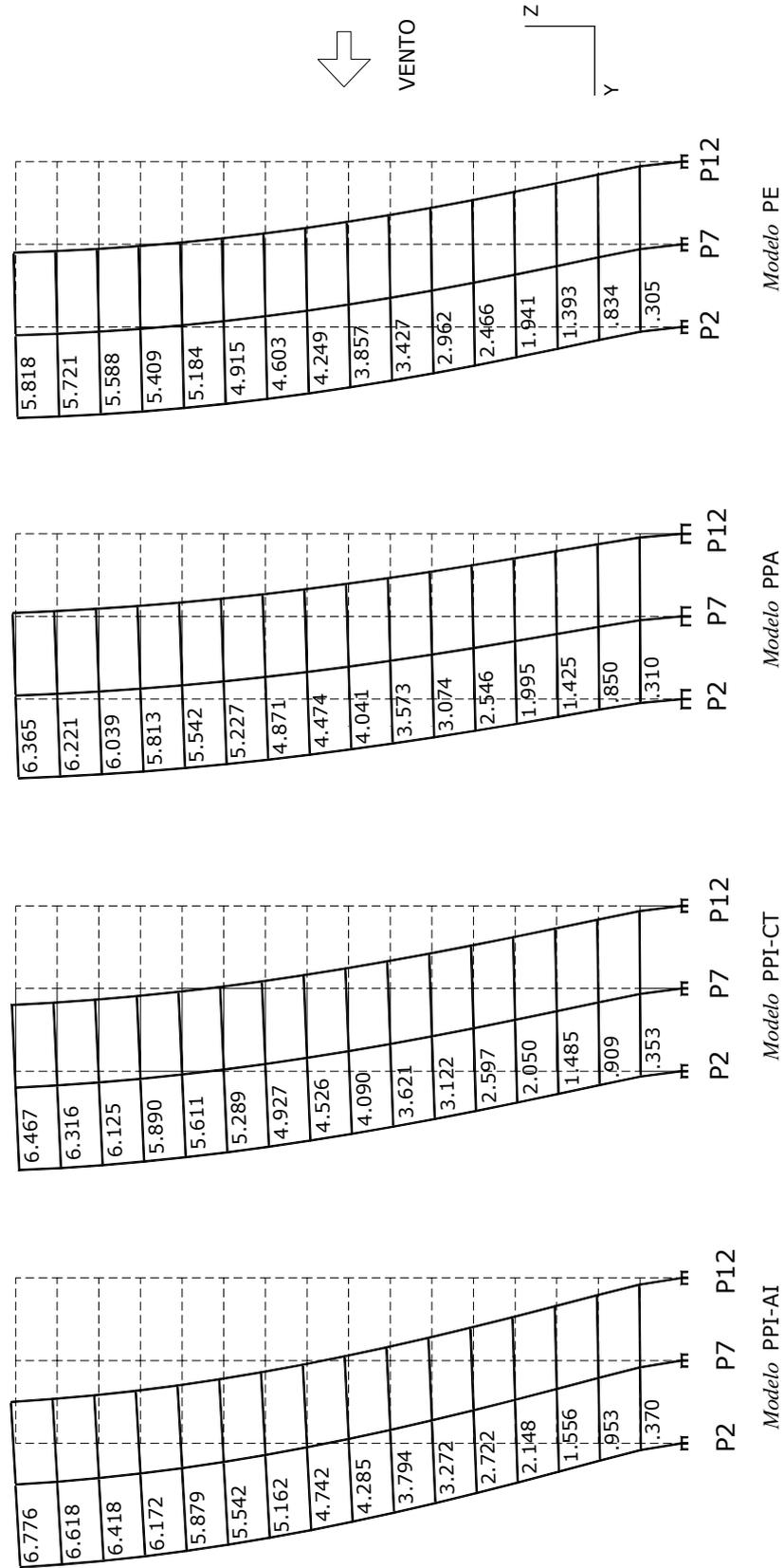


FIGURA 7.13 – Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

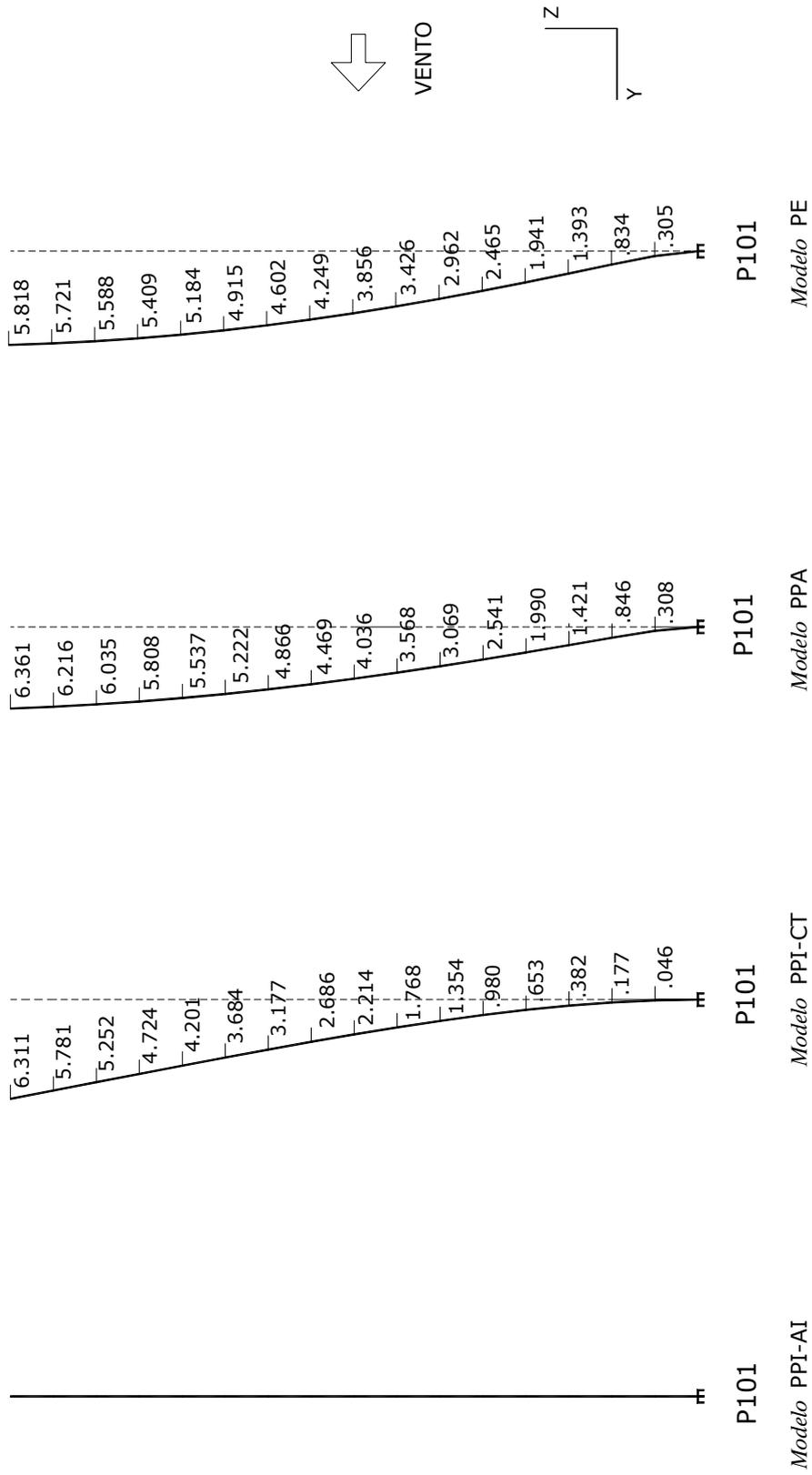


FIGURA 7.14 – Modelos do Pilar Isolado P101 da Estrutura 2: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

Na TAB. 7.3 são apresentadas, para os Pórticos 1, 2 e Pilar Isolado P101, as diferenças em porcentagem dos deslocamentos laterais Δ_{yz} nos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE. Nesta análise é suficiente observar o comportamento somente destes dois pórticos, pois o Pórtico 1 é igual ao Pórtico 5 e o Pórtico 2 aos Pórticos 3 e 4. Também é suficiente analisar apenas o Pilar Isolado P101, pois seu comportamento é o mesmo dos demais pilares isolados.

Os valores destas diferenças percentuais são obtidos através das FIG. 7.12, 7.13 e 7.14, utilizando-se a expressão (6.1).

TABELA 7.3 – Diferenças em % dos deslocamentos Δ_{yz} dos Pórticos 1 e 2 e do Pilar Isolado P101 da Estrutura 2.

ANDAR	$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 1			$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 2			$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pilar Isolado P101		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
16°	-0,02	11,16	9,39	16,47	11,16	9,40	-100,00	8,47	9,33
15°	-0,03	11,13	8,69	15,68	10,40	8,74	-100,00	1,05	8,65
14°	-0,11	11,04	8,05	14,85	9,61	8,07	-100,00	-6,01	8,00
13°	-0,17	10,98	7,45	14,11	8,89	7,47	-100,00	-12,66	7,38
12°	-0,21	10,94	6,85	13,41	8,24	6,91	-100,00	-18,96	6,81
11°	-0,18	10,95	6,29	12,76	7,61	6,35	-100,00	-25,05	6,25
10°	-0,09	11,06	5,78	12,14	7,04	5,82	-100,00	-30,96	5,74
9°	0,05	11,23	5,25	11,60	6,52	5,30	-100,00	-36,78	5,18
8°	0,34	11,54	4,72	11,10	6,04	4,77	-100,00	-42,58	4,67
7°	0,76	12,00	4,20	10,71	5,66	4,26	-100,00	-48,39	4,14
6°	1,38	12,69	3,68	10,47	5,40	3,78	-100,00	-54,29	3,61
5°	2,43	13,87	3,20	10,38	5,31	3,24	-100,00	-60,24	3,08
4°	4,12	15,77	2,63	10,66	5,62	2,78	-100,00	-66,36	2,52
3°	7,25	19,24	2,15	11,70	6,60	2,30	-100,00	-72,58	2,01
2°	13,67	26,38	1,68	14,27	8,99	1,92	-100,00	-78,78	1,44
1°	29,84	44,26	1,31	21,31	15,74	1,64	-100,00	-84,92	0,98

Comparando as diferenças percentuais entre os deslocamentos Δ_{yz} dos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA e os do Modelo PE (TAB. 7.3), observa-se que:

- a) no Pórtico 1, Modelo PPI-AI, os módulos das diferenças percentuais são inferiores a 14%, exceto no 1º andar, onde o módulo é da ordem de 30%;
- b) no Pórtico 1, Modelo PPI-CT, observam-se diferenças percentuais significativas nos primeiros andares (1º ao 4º), sendo a diferença percentual máxima da ordem de 44%, no 1º andar; nos demais andares as diferenças percentuais não ultrapassam 14%;
- c) no Pórtico 1, Modelo PPA, as diferenças percentuais são inferiores a 10%, apresentando valor máximo de 9,39%, no 16º andar;
- d) no Pórtico 2, Modelo PPI-AI, a diferença percentual máxima é de 21,31%, no 1º andar; nos demais andares, as diferenças percentuais não ultrapassam 17%;
- e) no Pórtico 2, Modelo PPI-CT, a maior diferença percentual é de 15,74%, no 1º andar; nos demais andares as diferenças percentuais não ultrapassam 12%;
- f) no Pórtico 2, Modelo PPA, as diferenças percentuais são inferiores a 10%, apresentando valor máximo de 9,40%, no 16º andar;
- g) no Pilar Isolado P101, Modelo PPI-AI, os módulos das diferenças percentuais são de 100% em todos os andares;
- h) no Pilar Isolado P101, Modelo PPI-CT, os módulos das diferenças percentuais são bastante significativas, exceto nos últimos andares (13º ao 16º); no 1º andar ocorre o maior módulo destas diferenças percentuais, da ordem de 85%;
- i) no Pilar Isolado P101, Modelo PPA, as diferenças percentuais são inferiores a 10%, apresentando valor máximo de 9,33%, no 16º andar.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar os deslocamentos Δ_{yz} dos pórticos da Estrutura 2, pode-se afirmar que:

- a) o Modelo PPI-AI fez uma avaliação razoável dos deslocamentos Δ_{yz} para os pórticos mas, apesar de não apresentar diferenças muito significativas em relação ao Modelo PE, não é um modelo confiável; isto porque, como se constatou no exame da FIG. 7.4, os deslocamentos laterais Δ_y no topo da Estrutura 2 não são iguais em todos os pórticos e pilares isolados; além disso, o Modelo PPI-AI foi incapaz de avaliar os deslocamentos relativos aos pilares isolados pois estes sequer estão incluídos no modelo; daí, a diferença percentual, em valor absoluto, de 100% em todos os andares;
- b) o Modelo PPI-CT fez uma avaliação razoável dos deslocamentos Δ_{yz} nos pórticos, uma vez que os módulos das diferenças percentuais não ultrapassam 16%, exceto nos andares 1º, 2º e 3º do Pórtico 1; note-se, todavia, que os deslocamentos nos andares inferiores são pequenos, o que distorce os valores das diferenças percentuais calculadas com a expressão (6.1); para os pilares isolados, onde as diferenças percentuais em valor absoluto chegam até aproximadamente 85%, a avaliação é ruim; isto deve-se principalmente ao fato de que os Pilares Isolados P101, P102, P103, P104, P105, P106, P107 e P108 estão incluídos no Modelo PPI-CT de maneira inadequada, pois a compatibilização dos deslocamentos laterais é feita apenas no topo da estrutura e a ação das vigas V1 e V3 (FIG. 3.2) sobre estes pilares não é levada em consideração;
- c) o Modelo PPA fez uma boa avaliação dos deslocamentos Δ_{yz} , pois todas as diferenças percentuais não ultrapassam 10%; isto porque, apesar de não ter sido levada em consideração a ação das vigas V1 e V3 sobre os pilares isolados, a compatibilização dos deslocamentos é feita em todos os andares; logo, percebe-se que o Modelo PPA, dentre os modelos planos deste trabalho, é o que melhor avaliou os deslocamentos laterais da Estrutura 2.

7.3 – Momentos Fletores nos Pórticos

A FIG. 7.15 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento do Pórtico 1 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 7.16 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento do Pórtico 2 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

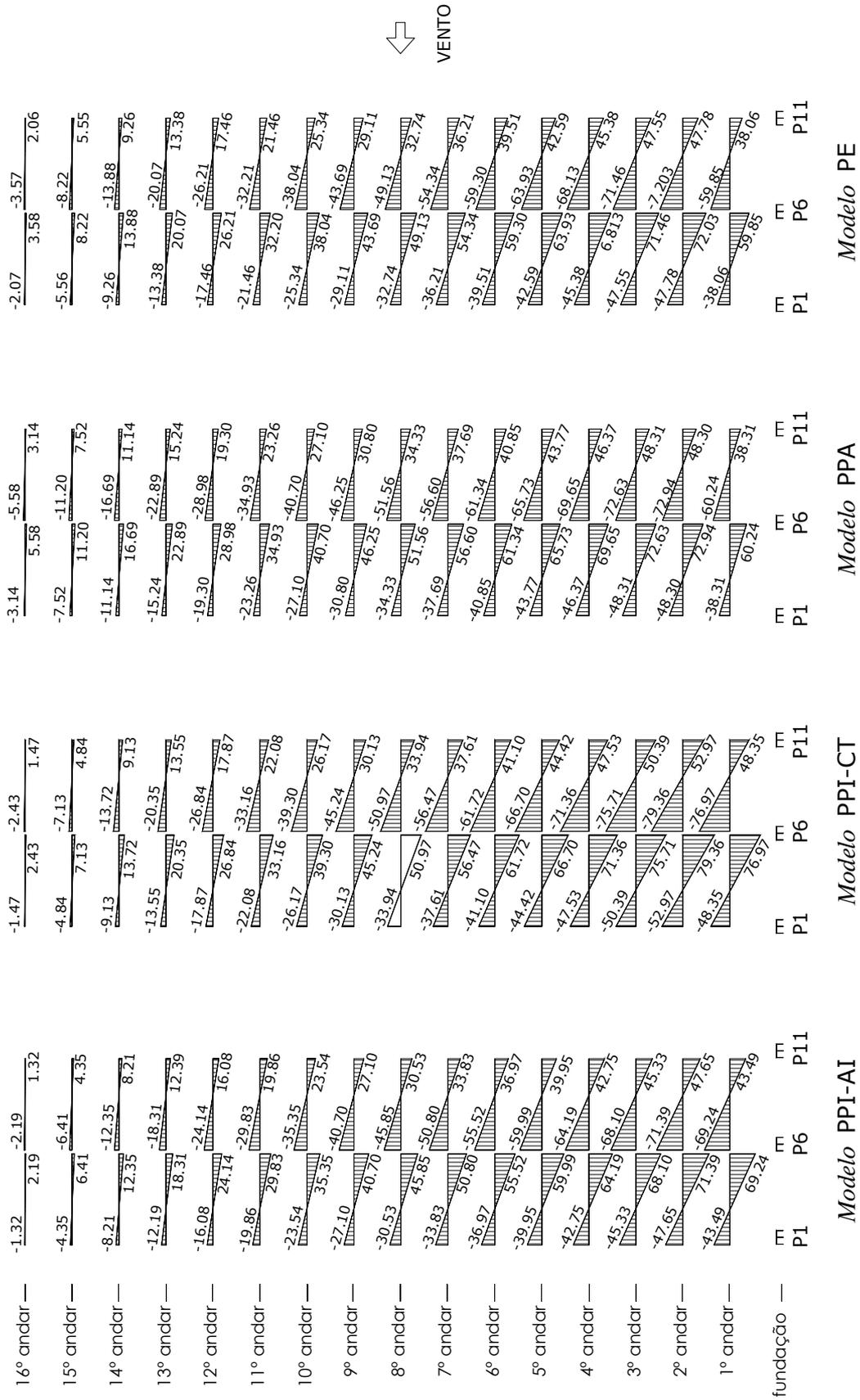


FIGURA 7.15 – Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 2: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m).

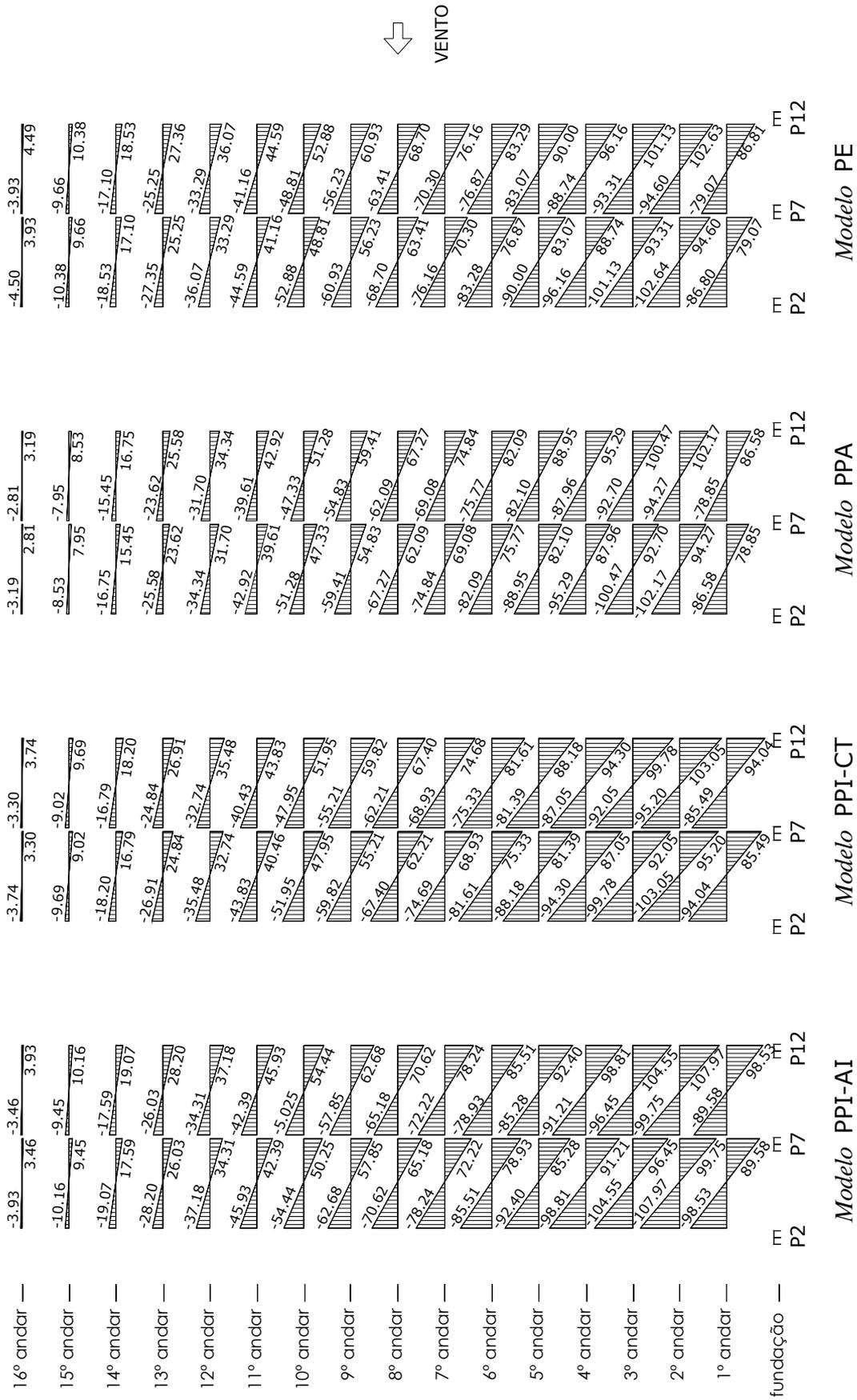


FIGURA 7.16 – Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 2: diagramas dos momentos fletores M_x no vigaento (em kN.m).

Na TAB. 7.4 são apresentadas as diferenças em porcentagem dos momentos fletores M_x no vigaamento dos Pórticos 1 e 2, calculadas comparando-se os Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE. Nesta análise é suficiente observar o comportamento somente destes dois pórticos, pois o Pórtico 1 é igual ao Pórtico 5 e o Pórtico 2 aos Pórticos 3 e 4.

Os valores destas diferenças são obtidos através das FIG. 7.15 e 7.16, utilizando-se a expressão (6.1). Para o Pórtico 1 são utilizados os valores dos momentos fletores na prumada P11 (FIG. 7.15) e para o Pórtico 2 os valores na prumada P12 (FIG. 7.16).

TABELA 7.4 – Diferenças em % dos momentos fletores M_x no vigaamento dos Pórticos 1 e 2 da Estrutura 2.

ANDAR	$\Delta(M_x)\%$ do Pórtico 1			$\Delta(M_x)\%$ do Pórtico 2		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
16°	-35,92	-28,64	52,43	-12,47	-16,70	-28,95
15°	-21,62	-12,79	35,50	-2,12	-6,65	-17,82
14°	-11,34	-1,40	20,30	2,91	-1,78	-9,61
13°	-7,40	1,27	13,90	3,07	-1,64	-6,51
12°	-7,90	2,35	10,54	3,08	-1,64	-4,80
11°	-7,46	2,89	8,39	3,01	-1,70	-3,75
10°	-7,10	3,28	6,95	2,95	-1,76	-3,03
9°	-6,90	3,50	5,81	2,87	-1,82	-2,49
8°	-6,75	3,67	4,86	2,79	-1,89	-2,08
7°	-6,57	3,87	4,09	2,73	-1,94	-1,73
6°	-6,43	4,02	3,39	2,67	-2,02	-1,44
5°	-6,20	4,30	2,77	2,67	-2,02	-1,17
4°	-5,80	4,74	2,18	2,76	-1,93	-0,90
3°	-4,67	5,97	1,60	3,38	-1,33	-0,65
2°	-0,27	10,86	1,09	5,20	0,41	-0,45
1°	14,27	27,04	0,66	13,50	8,33	-0,26

Comparando as diferenças percentuais dos momentos fletores M_x no vigaamento dos Pórticos 1 e 2 da Estrutura 2, observa-se que:

- a) no Pórtico 1, Modelo PPI-AI, ocorrem diferenças percentuais significativas nos andares 15° e 16°, onde os módulos máximos das diferenças percentuais são da ordem de 22% e 36%, respectivamente; nos demais andares (1° ao 14°), estes módulos não ultrapassam 15%;
- b) no Pórtico 1, Modelo PPI-CT, os valores obtidos nos andares 1° e 16° apresentam diferenças percentuais significativas, da ordem de 28% em valor absoluto; nos demais andares, os valores não ultrapassam 13%;
- c) no Pórtico 1, Modelo PPA, as diferenças percentuais são inferiores a 14%, exceto nos andares 14°, 15° e 16°, onde a diferença percentual máxima é de 52,43%, no 16° andar;
- d) no Pórtico 2, Modelo PPI-AI, os resultados obtidos para os módulos das diferenças percentuais são pequenos, inferiores a 6%, exceto nos andares 1° e 16°, onde os módulos são da ordem de 13%;
- e) no Pórtico 2, Modelo PPI-CT, o maior módulo das diferenças percentuais é da ordem de 17%, no 16° andar; nos demais andares os módulos são pequenos, inferiores a 9%;
- f) no Pórtico 2, Modelo PPA, os resultados obtidos para os módulos das diferenças percentuais são pequenos, inferiores a 10%, exceto nos dois últimos andares (15° e 16°), onde os módulos são da ordem de 18% e 29%, respectivamente.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar os momentos fletores no vigaamento dos pórticos da Estrutura 2, pode-se afirmar que:

- a) o Modelo PPI-AI não apresenta grandes diferenças percentuais em relação ao Modelo PE; entretanto, este modelo não deve ser considerado de boa qualidade pois, através do exame da FIG. 7.4, observa-se que os deslocamentos laterais Δ_y no topo não são iguais em todos os pórticos e pilares isolados; além disso, os pilares isolados não têm qualquer influência neste modelo;

b) o Modelo PPI-CT fez uma boa avaliação dos momentos fletores no vigamento da Estrutura 2, já que os módulos das diferenças percentuais não ultrapassam 13%, com exceção dos andares 1º e 16º do Pórtico 1 e 16º andar do Pórtico 2; note-se, todavia, que os momentos fletores nos andares superiores são pequenos (FIG. 7.15 e 7.16), o que distorce os valores das diferenças percentuais calculadas com a expressão (6.1);

c) o Modelo PPA fez uma boa avaliação dos momentos fletores nas vigas dos pórticos, já que os módulos das diferenças percentuais não ultrapassam 14%, com exceção dos andares 14º, 15º e 16º do Pórtico 1 e 15º e 16º do Pórtico 2; nos andares inferiores (1º ao 6º), onde os momentos fletores são maiores, o Modelo PPA foi melhor do que o Modelo PPI-CT; nos andares superiores (8º ao 16º), onde os momentos fletores são menores, o Modelo PPI-CT foi melhor do que o Modelo PPA; note-se que os momentos fletores nos andares superiores são pequenos, o que distorce os resultados obtidos com a expressão (6.1); portanto, entre os modelos planos utilizados, este modelo é o que melhor avaliou os momentos fletores na Estrutura 2.

8

Análise dos Resultados da Estrutura 3

Neste capítulo, são feitas análises comparativas dos resultados obtidos através dos processamentos realizados para a Estrutura 3.

Os resultados comparados são:

- cargas na fundação;
- deslocamentos laterais nos pórticos;
- momentos fletores no vigamento dos pórticos.

8.1 - Cargas nas Fundações

Na TAB. 8.1, são apresentados os valores dos esforços nas fundações da Estrutura 3 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

F_y , F_z e M_x são cargas nas fundações que serão analisadas na Estrutura 3 e significam, respectivamente:

F_y – força na direção y;

TABELA 8.1 – Esforços nas fundações da Estrutura 3.

PILAR	MODELO PPI-AI			MODELO PPI-CT			MODELO PPA			MODELO PE		
	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x
P1=P5	12,80	184,95	-19,88	11,61	167,79	-18,03	2,03	149,75	-3,30	1,91	126,37	-3,08
P2=P4	48,98	333,01	-108,33	38,19	259,58	-84,47	5,42	227,18	-16,83	5,97	186,31	-16,48
P3	2,54	170,60	-7,96	3,35	263,50	-11,32	5,50	240,72	-16,92	6,17	220,58	-16,67
P6=P10	64,74	0,00	-128,44	58,72	0,00	-116,50	7,23	0,00	-18,65	7,24	-4,62	-17,60
P7=P9	66,17	0,00	-125,52	51,60	0,00	-97,87	8,95	0,00	-20,37	8,77	40,22	-19,09
P8	3,97	35,99	-9,29	5,74	55,40	-13,71	9,74	79,35	-21,16	11,65	271,42	-21,95
P11=P15	12,80	-184,95	-19,88	11,61	-167,79	-18,03	2,03	-149,75	-3,30	1,79	-122,80	-2,88
P12=P14	48,98	-333,01	-108,33	38,19	-259,58	-84,47	5,42	-227,18	-16,84	4,80	-157,46	-14,60
P13	2,38	-206,59	-7,55	3,67	-318,90	-11,64	6,73	-320,06	-18,15	10,00	256,68	-19,78
P101	155,32	0,00	-2651,97	240,75	0,00	-4094,21	589,39	0,00	-6109,12	584,58	-884,72	-5311,21

F_z – força na direção z;

M_x – momento na direção x.

Os sentidos considerados positivos para as cargas nas fundações da Estrutura 3 estão mostrados na FIG. 6.1.

Os valores de F_x , M_y e M_z são sempre nulos para os modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA. Por este motivo, não são apresentados na TAB. 8.1.

Para uma melhor visualização, os valores dos esforços nas fundações da Estrutura 3 da TAB. 8.1 estão representados na forma de gráficos nas FIG. 8.1, 8.2 e 8.3.

Alguns pilares não são mostrados nos gráficos, devido à simetria.

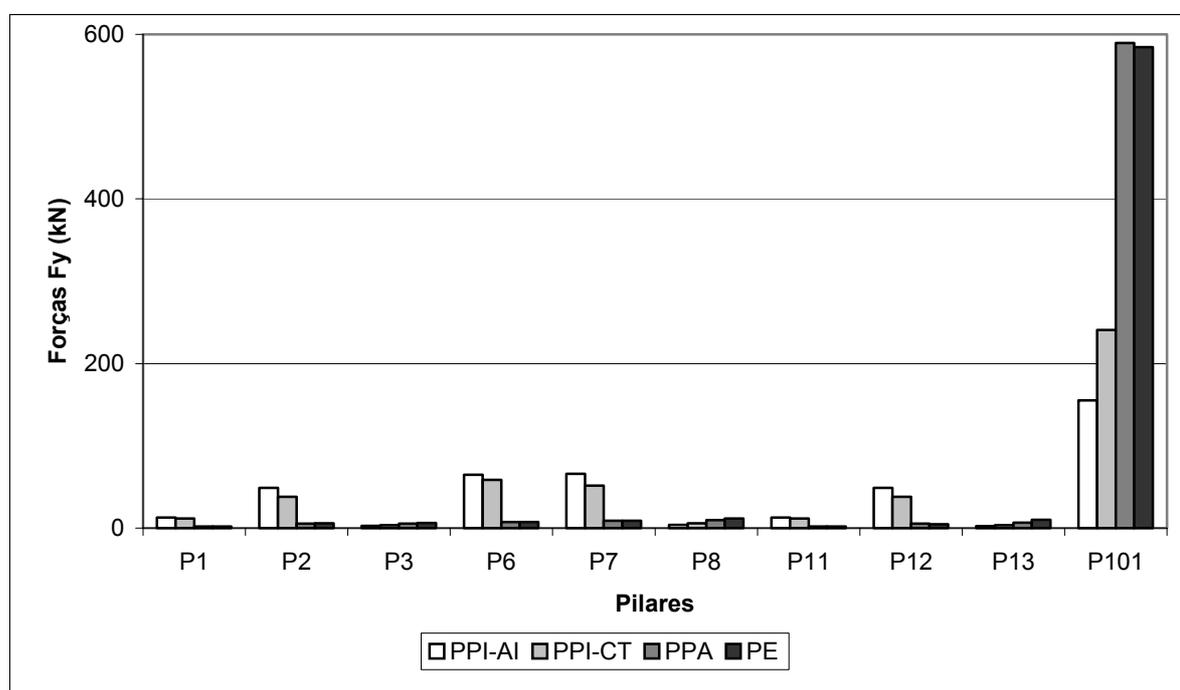
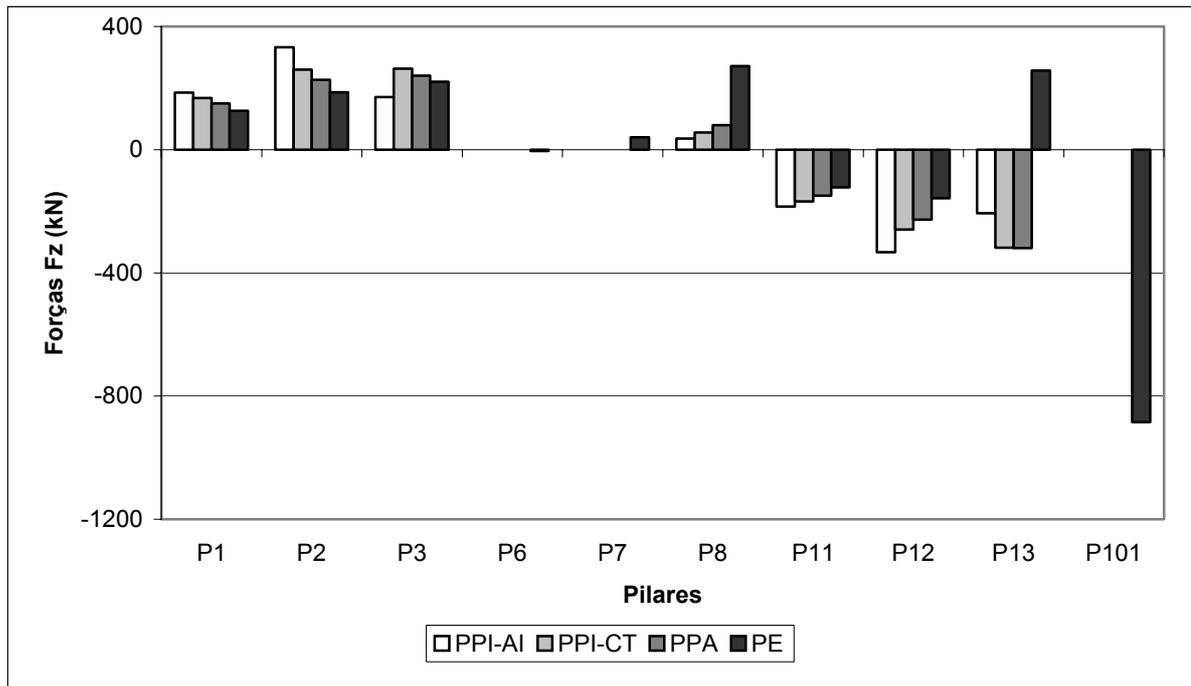
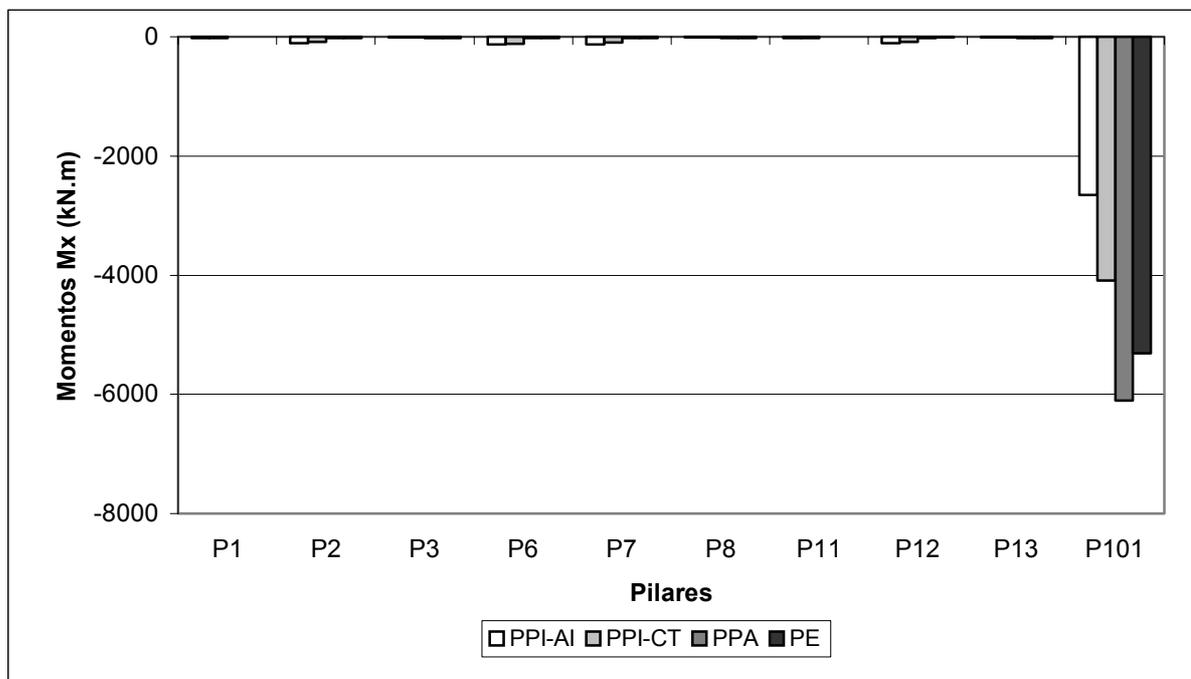


FIGURA 8.1 – Forças F_y nas fundações da Estrutura 3.

FIGURA 8.2 – Forças F_z nas fundações da Estrutura 3.FIGURA 8.3 – Momentos M_x nas fundações da Estrutura 3.

A seguir, na TAB. 8.2 são apresentadas as diferenças percentuais dos esforços nas fundações da Estrutura 3 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE. Os valores destas diferenças são obtidos através da expressão (6.1).

O Modelo PE é tomado como referência, entre os quatro modelos existentes neste trabalho, por ser o que mais se aproxima do real comportamento da Estrutura 3.

TABELA 8.2 – Diferenças em % dos esforços nas fundações da Estrutura 3.

PILAR	$\Delta(F_y)\%$			$\Delta(F_z)\%$			$\Delta(M_x)\%$		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
P1=P5	570,16	507,85	6,28	46,36	32,78	18,50	-545,45	-485,39	-7,14
P2=P4	720,44	539,70	-9,21	78,74	39,33	21,94	-557,34	-412,56	-2,12
P3	-58,83	-45,71	-10,86	-22,66	19,46	9,13	52,25	32,09	-1,50
P6=P10	794,20	711,05	-0,14	100,00	100,00	100,00	-629,77	-561,93	-5,97
P7=P9	654,50	488,37	2,05	-100,00	-100,00	-100,00	-557,52	-412,68	-6,71
P8	-65,92	-50,73	-16,39	-86,74	-79,59	-70,76	57,68	37,54	3,60
P11=P15	615,08	548,60	13,41	-50,61	-36,64	-21,95	-590,28	-526,04	-14,58
P12=P14	920,42	695,63	12,92	-111,49	-64,85	-44,28	-641,99	-478,56	-15,34
P13	-76,20	-63,30	-32,70	-180,49	-224,24	-224,69	61,83	41,15	8,24
P101	-73,43	-58,82	0,82	100,00	100,00	100,00	50,07	22,91	-15,02

Na Tabela 8.2, observa-se que:

- as forças F_y , Modelo PPI-AI, apresentam diferenças percentuais muito significativas, que chegam até aproximadamente 921% em valor absoluto, nos pilares P12 e P14;
- as forças F_y , Modelo PPI-CT, apresentam módulos das diferenças percentuais também bastante significativas, onde o maior módulo é da ordem de 711%, em P6 e P10;
- as forças F_y , Modelo PPA, apresentam pequenos módulos das diferenças percentuais, inferiores a 14%, exceto nos pilares P8 e P13, onde os módulos são da ordem de aproximadamente 17% e 33%, respectivamente;

- d) as forças F_z , Modelo PPI-AI, apresentam diferenças percentuais significativas cujo valor máximo, em módulo, alcança 180,49%, no pilar P13;
- e) as forças F_z , Modelo PPI-CT, apresentam módulo máximo das diferenças percentuais da ordem de 225%, em P13; o mesmo ocorre no Modelo PPA;
- f) os momentos M_x , Modelo PPI-AI, apresentam grandes diferenças percentuais; estas diferenças alcançam valores máximos, em módulo, de aproximadamente 642%, nos pilares P12 e P14;
- g) os momentos M_x , Modelo PPI-CT, apresentam diferenças percentuais máximas da ordem de 562%, em P6 e P10;
- h) os momentos M_x , Modelo PPA, apresentam módulos das diferenças percentuais pequenos, inferiores a 16%, em todos os pilares.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar as cargas nas fundações, pode-se afirmar que:

- a) o Modelo PPI-AI apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 921% para F_y , 181% para F_z e 642% para M_x ; observa-se que as avaliações deste modelo são de péssima qualidade; isto porque este modelo obedece a critérios geométricos para determinar o carregamento em cada painel vertical enrijecido, sem levar em consideração suas respectivas rigidezes;
- b) o Modelo PPI-CT apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 711% para F_y , 225% para F_z e 562% para M_x ; isto mostra que o modelo não fez uma boa avaliação dos esforços nas fundações da Estrutura 3; apesar do Modelo PPI-CT ser superior ao Modelo PPI-AI, por levar em consideração as rigidezes dos painéis verticais, o seu comportamento conjunto deixa a desejar uma vez que a compatibilização dos deslocamentos laterais ocorre apenas no topo do edifício; como se verá, os deslocamentos laterais do Pórtico 3 diferem bastante dos deslocamentos laterais dos Pórticos 1 e 2, ao longo dos andares; dessa forma, os resultados obtidos não são confiáveis;

c) o Modelo PPA apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 33% para F_y , 225% para F_z e 15% para M_x ; este modelo é superior aos Modelos PPI-AI e PPI-CT por levar em consideração as rigidezes dos painéis verticais e também por compatibilizar os deslocamentos laterais em todos os andares; note-se que o modelo foi incapaz de avaliar adequadamente as forças F_z , pois a compatibilização, apesar de ser feita em todos os andares da estrutura, não leva em consideração a ação das vigas na direção x ; ainda para a força F_z , observa-se que os pilares P6, P7, P9 e P10 apresentam esforços nulos nas fundações (TAB. 8.1) por estarem no eixo de simetria (direção x) dos Pórticos 1, 2, 4 e 5; o núcleo estrutural, representado por P101, também apresenta força F_z nula na fundação por estar ligado a P13 por barras bi-rotuladas, incapazes de transmitir forças cortantes; todavia, as forças F_y apresentam módulos das diferenças percentuais pequenos, inferiores a 17%, exceto no pilar P13; esta análise é semelhante para os momentos fletores M_x , onde os módulos das diferenças percentuais são pequenos, inferiores a 16% em todos os andares; logo, percebe-se que o Modelo PPA, entre os modelos planos, é o que melhor avaliou os esforços F_y e M_x nas fundações da Estrutura 3.

8.2 – Deslocamentos Laterais nos Pórticos

As FIG. 8.4, 8.5, 8.6 e 8.7 mostram os deslocamentos Δ_y no topo dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE, respectivamente.

As FIG. 8.8, 8.9, 8.10 e 8.11 apresentam, nos diversos andares, os deslocamentos Δ_{yz} nos nós dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE, respectivamente.

A FIG. 8.12 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 1 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 8.13 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 2 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 8.14 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 3 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

Em todos os modelos, devido à simetria da Estrutura 3, a laje do topo deve transladar na direção y sob a ação do vento e os deslocamentos Δ_y no topo devem ser iguais em todos os pórticos. Isto não ocorre, todavia, no Modelo PPI-AI (FIG. 8.4), o que já evidencia a qualidade duvidosa deste modelo.

Nas FIG. 8.8, 8.9, 8.10 e 8.11 os deslocamentos Δ_{yz} no topo de todos os pórticos deveriam ser praticamente iguais entre si. O mesmo pode-se afirmar para os demais andares. Todavia, como se constata pelo exame das FIG. 8.8 e 8.9, isto não ocorre nos Modelos PPI-AI e PPI-CT.

Por outro lado, o exame das FIG. 8.10 e 8.11 relativas aos Modelos PPA e PE, respectivamente, mostra que os deslocamentos Δ_{yz} no topo e demais andares dos pórticos são bastante próximos entre si. As pequenas diferenças encontradas nos valores de Δ_{yz} no topo e demais andares devem-se ao deslocamento vertical Δ_z já que, devido à rigidez da laje em seu plano, o deslocamento lateral Δ_y deve ser o mesmo em todos os pórticos.

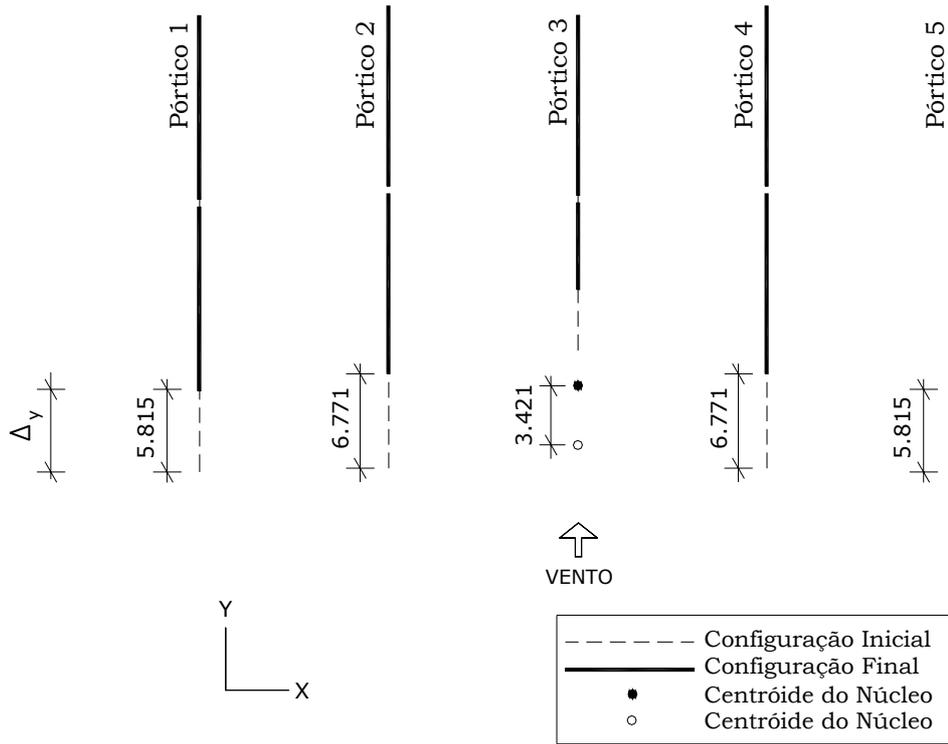


FIGURA 8.4 – Modelo PPI-AI da Estrutura 3: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

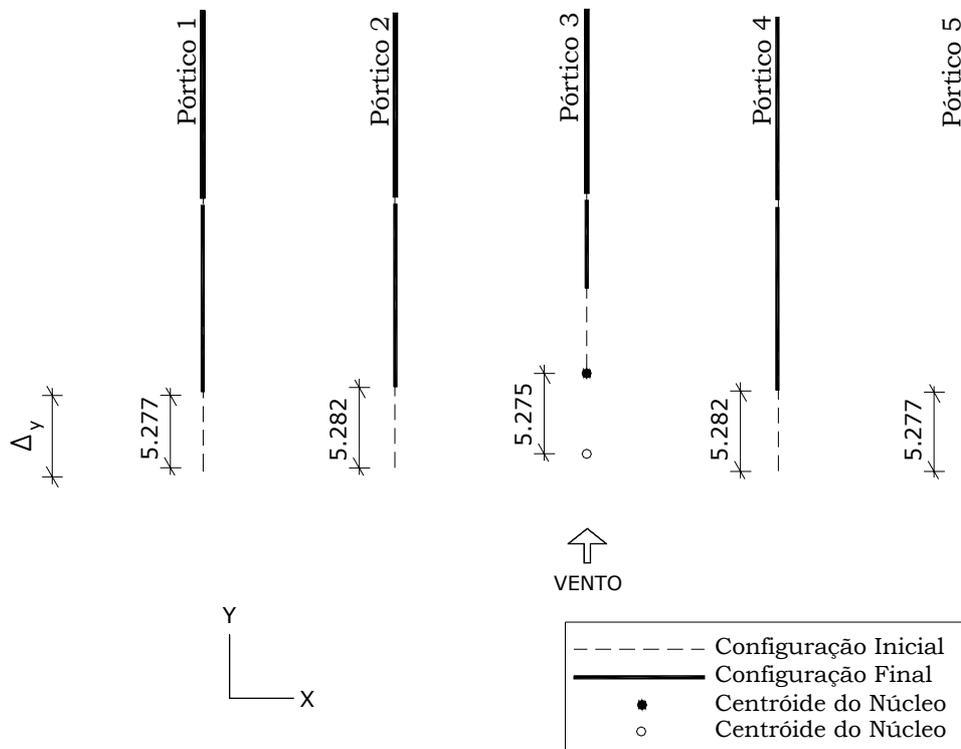


FIGURA 8.5 – Modelo PPI-CT da Estrutura 3: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

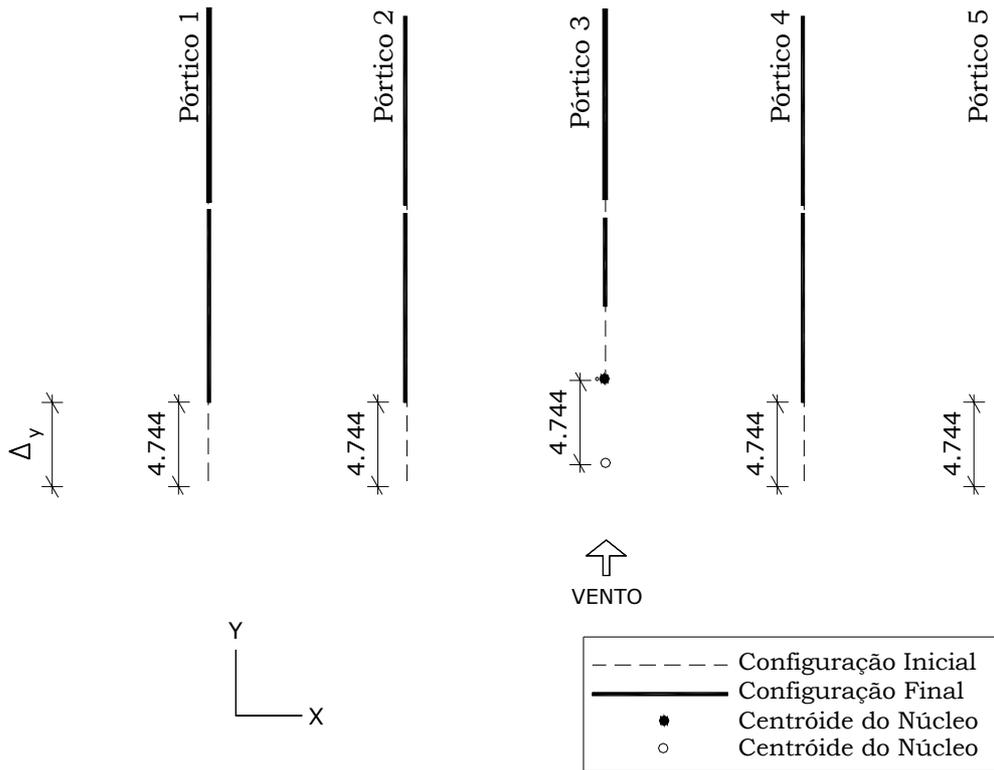


FIGURA 8.6 – Modelo PPA da Estrutura 3: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

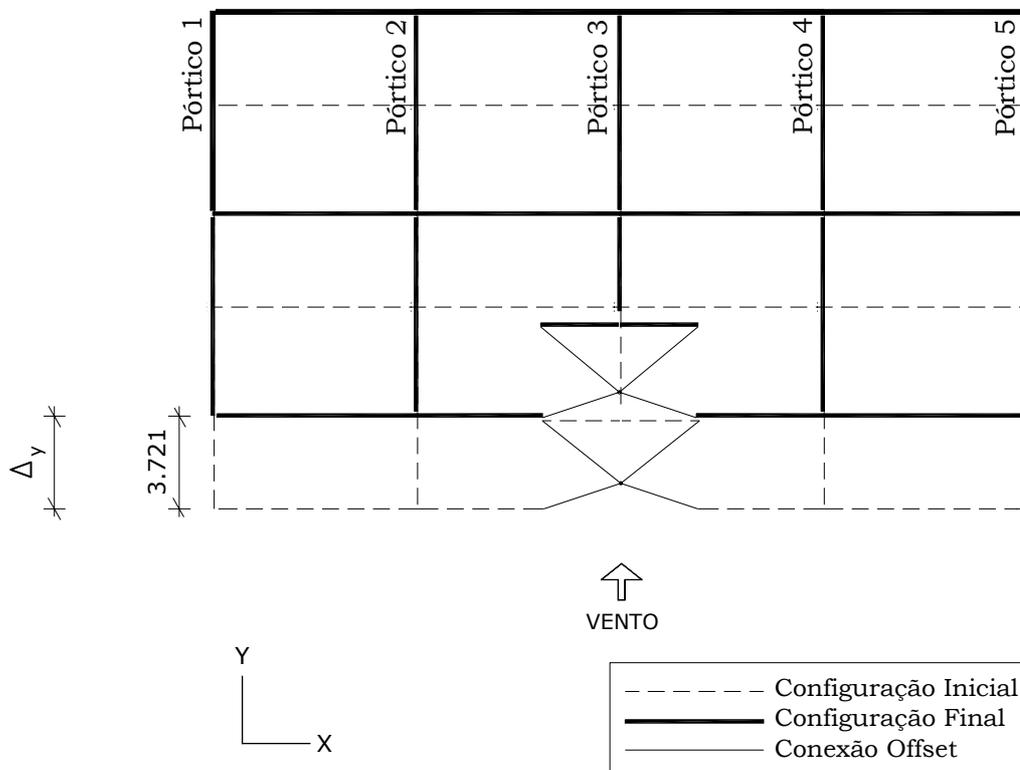


FIGURA 8.7 – Modelo PE da Estrutura 3: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

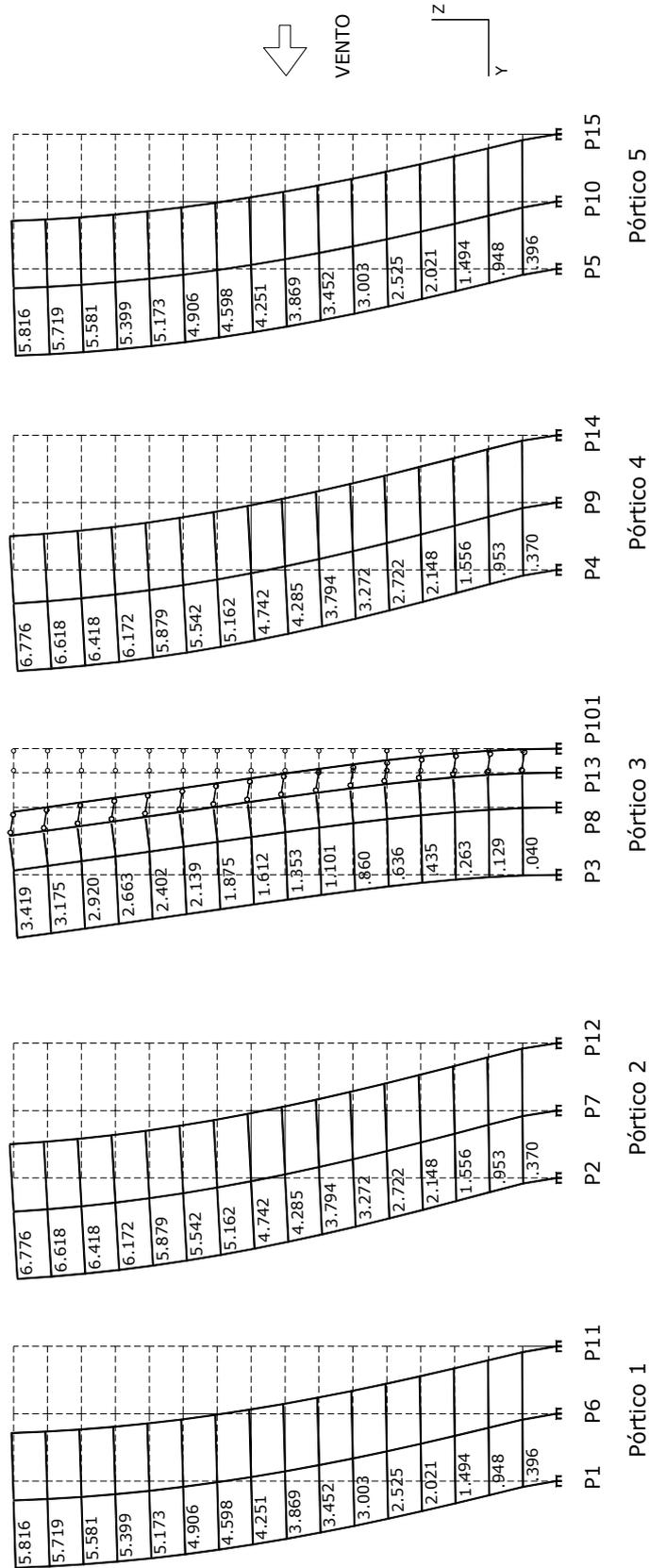


FIGURA 8.8 – Modelo PPI-AI da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

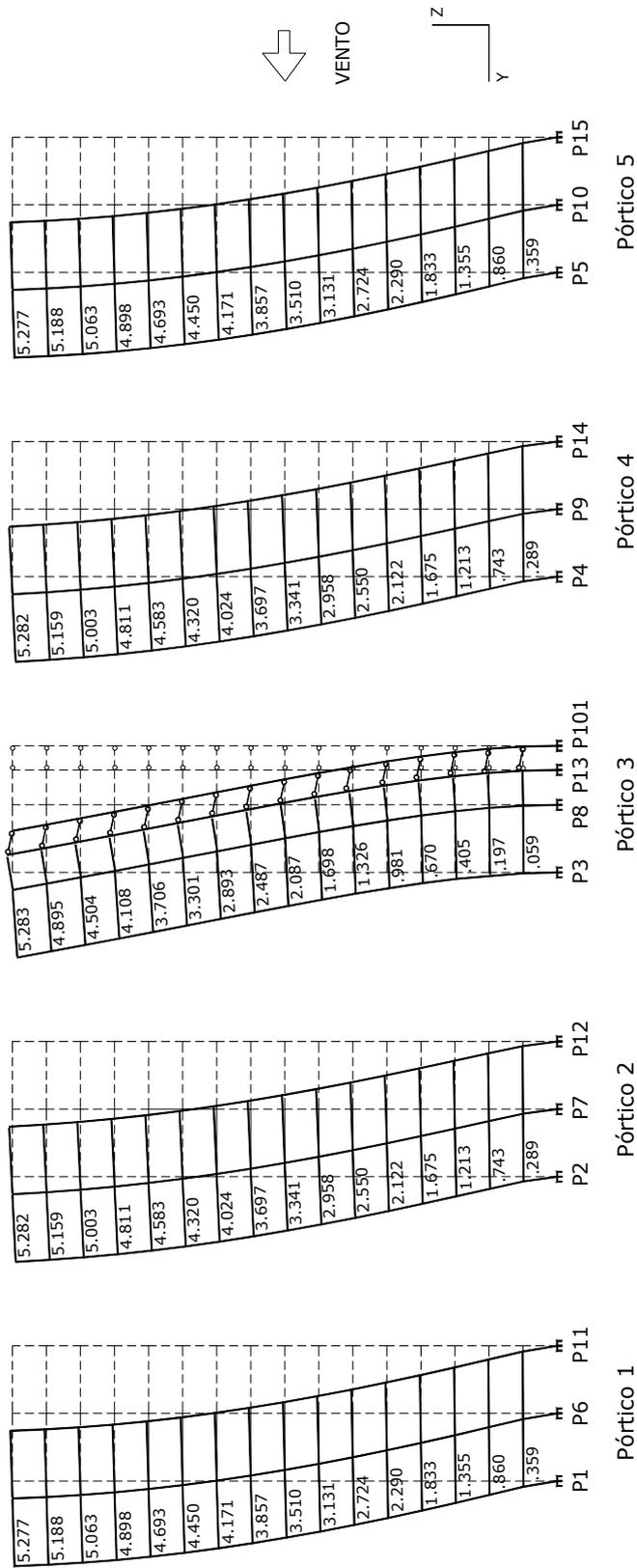


FIGURA 8.9 – Modelo PPI-CT da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

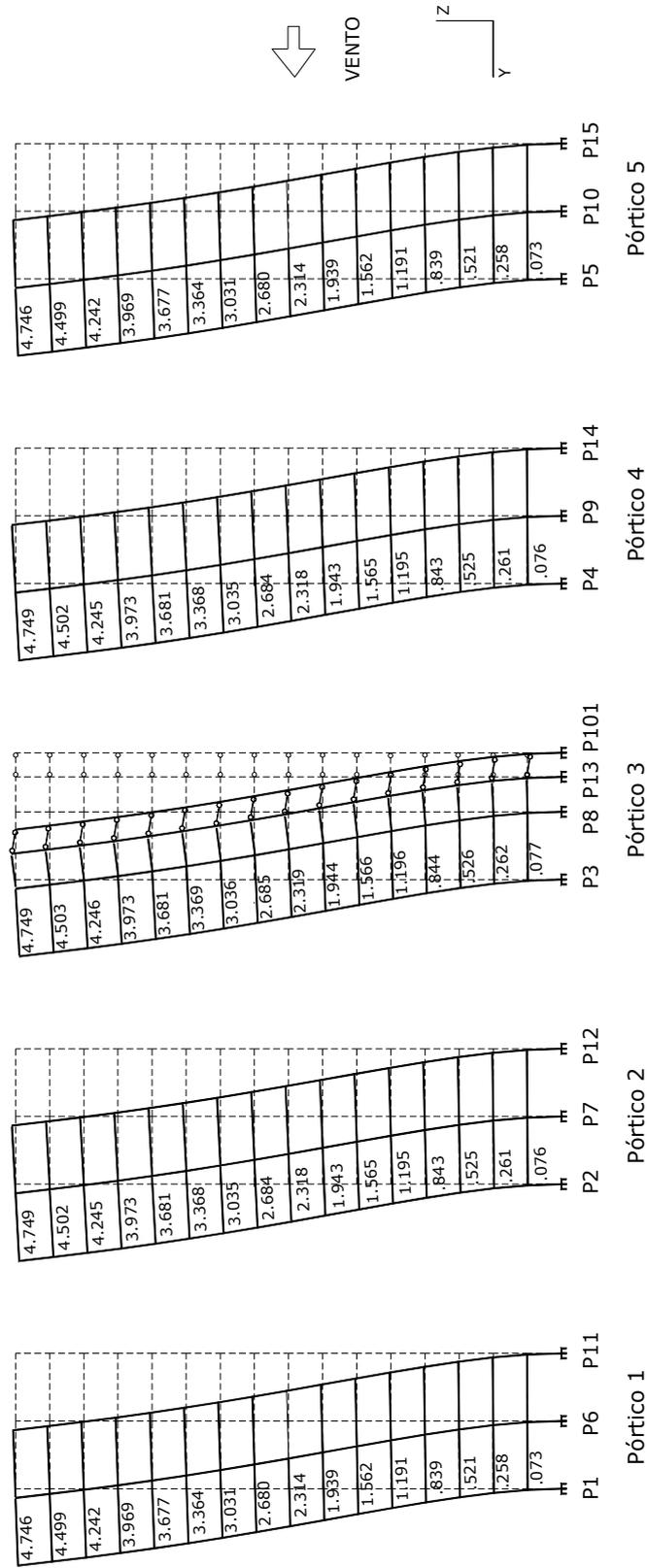


FIGURA 8.10 – Modelo PPA da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

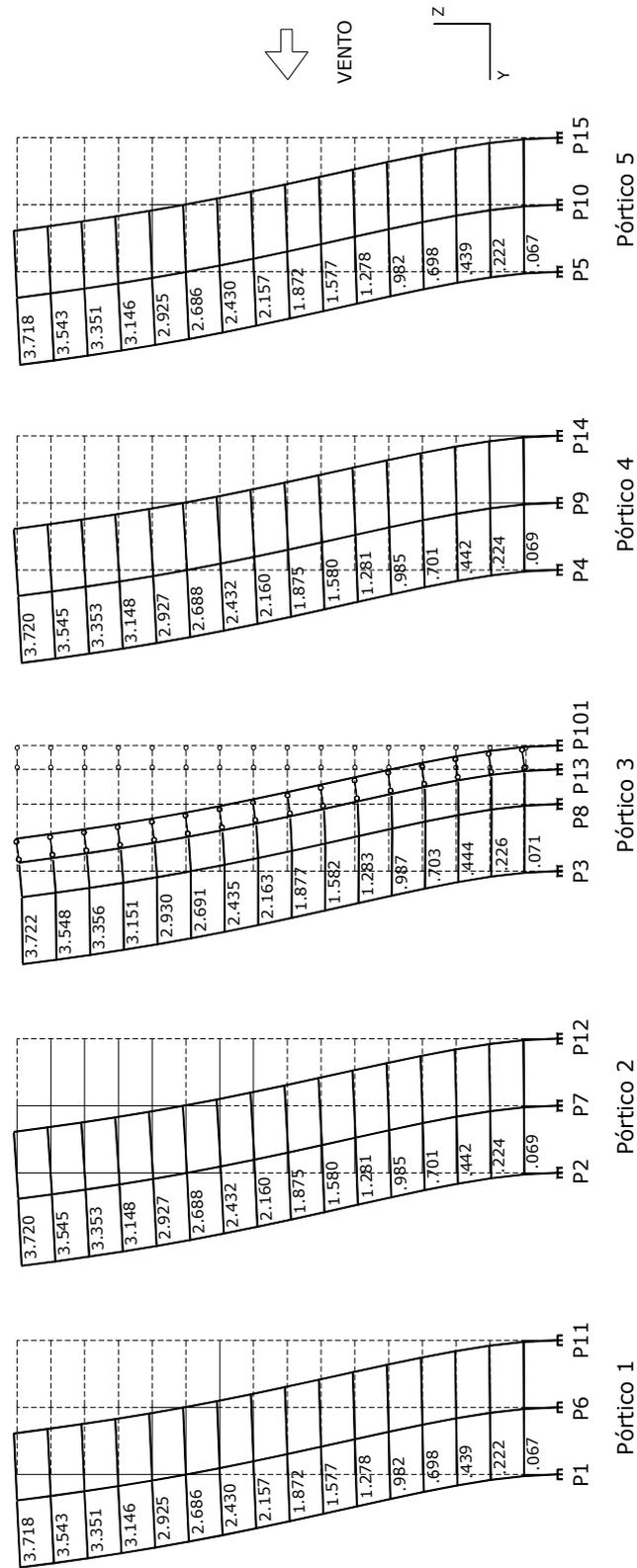


FIGURA 8.11 – Modelo PE da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

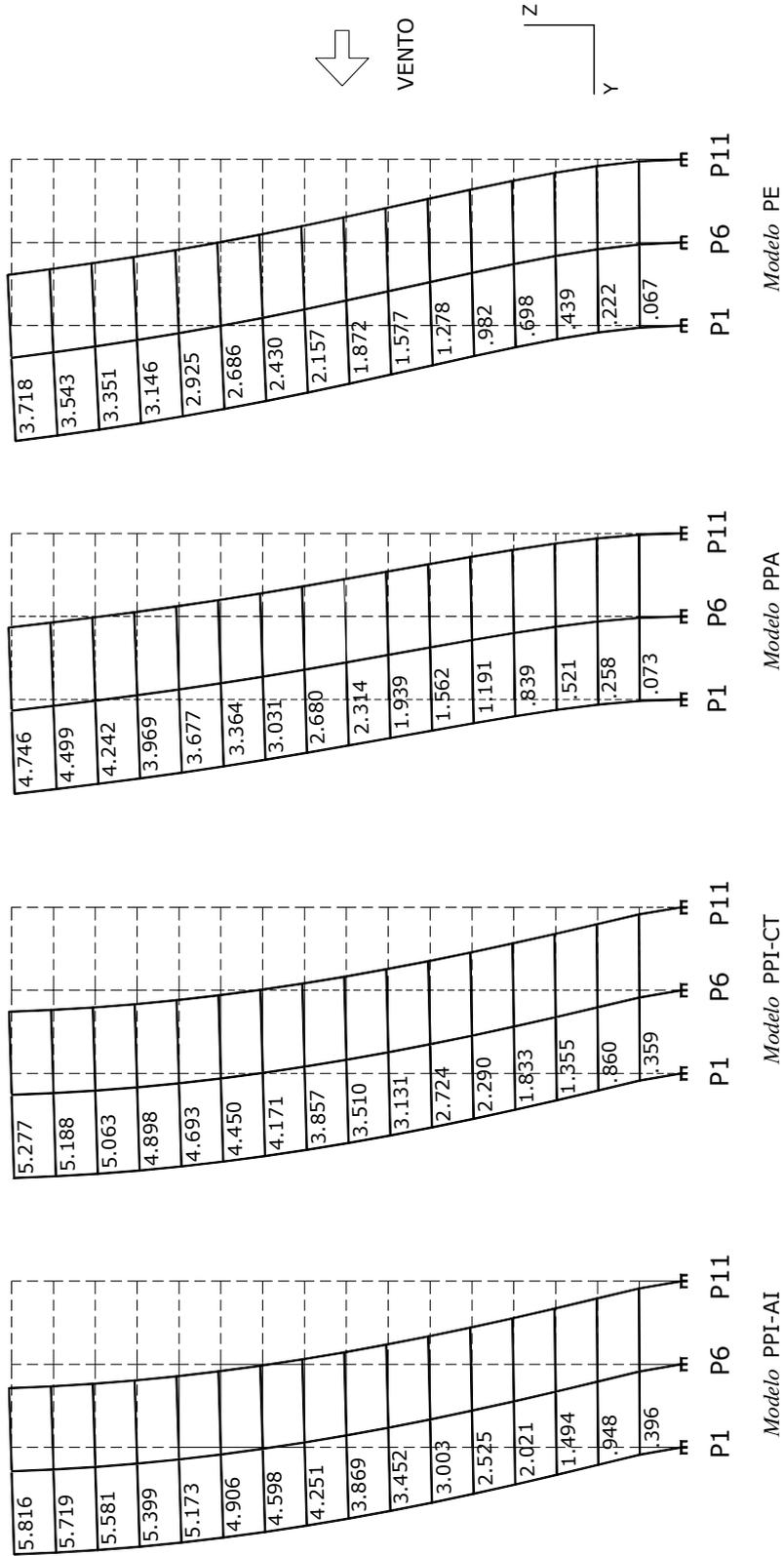


FIGURA 8.12 – Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

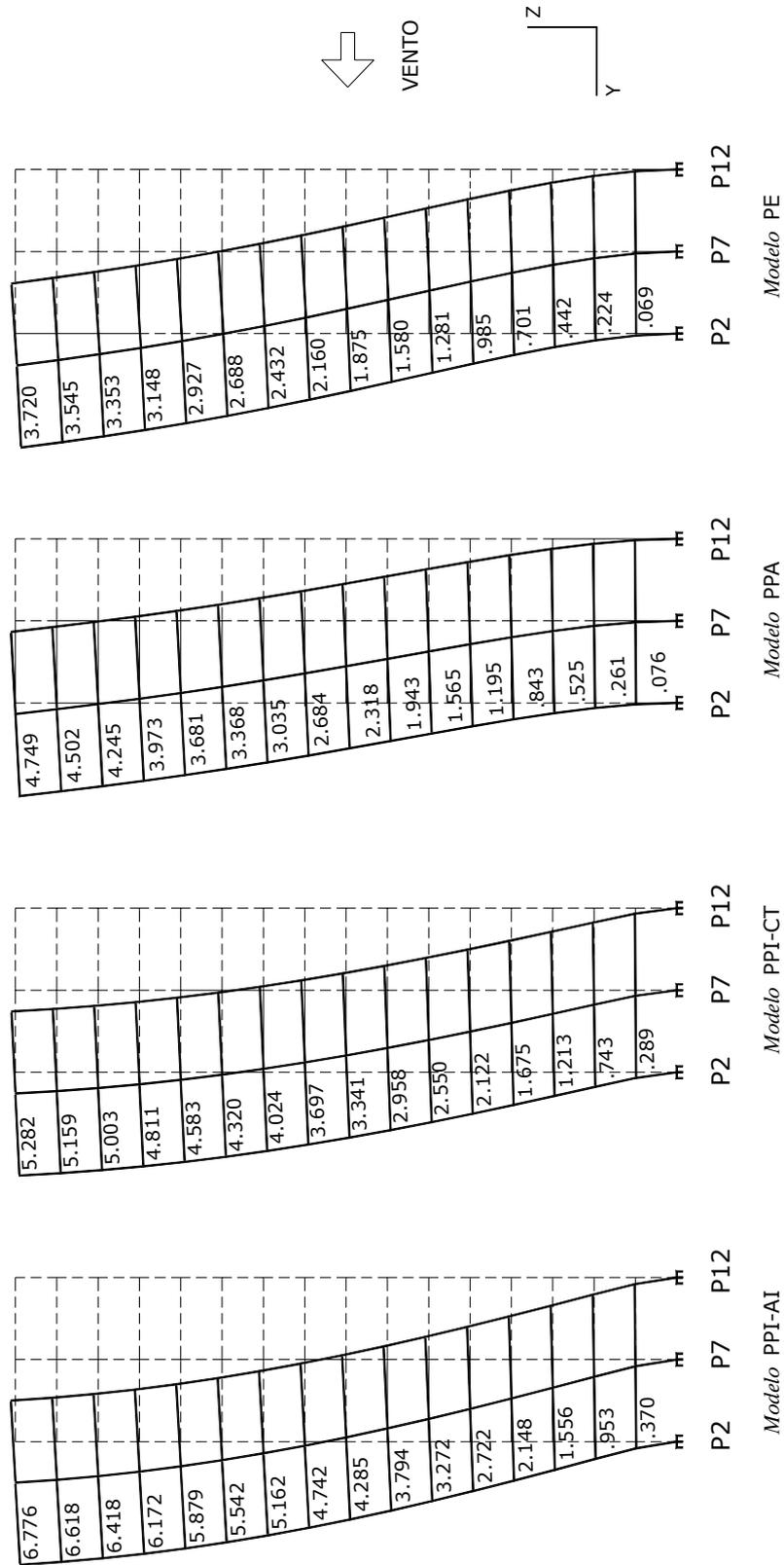


FIGURA 8.13 – Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

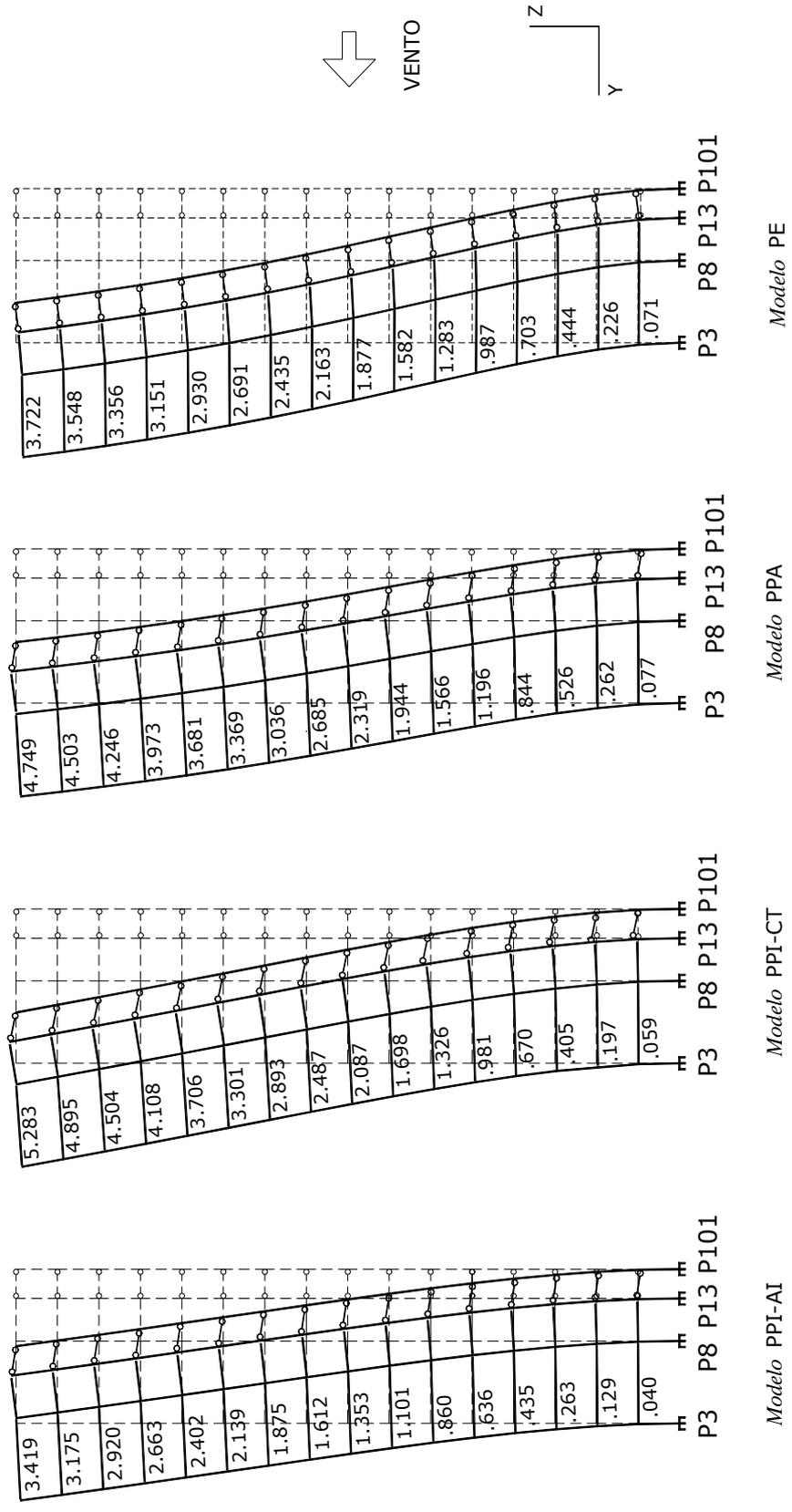


FIGURA 8.14 – Modelos do Pórtico 3 da Estrutura 3: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

Na TAB. 8.3 são apresentadas, para os Pórticos 1, 2 e 3, as diferenças em porcentagem dos deslocamentos laterais Δ_{yz} nos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE. Nesta análise é suficiente observar o comportamento somente destes três pórticos, pois o Pórtico 1 é igual ao Pórtico 5 e o Pórtico 2 ao Pórtico 4.

Os valores destas diferenças percentuais são obtidos através das FIG. 8.12, 8.13 e 8.14, utilizando-se a expressão (6.1).

TABELA 8.3 – Diferenças em % dos deslocamentos Δ_{yz} dos Pórticos 1, 2 e 3 da Estrutura 3.

ANDAR	$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 1			$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 2			$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 3		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
16°	56,43	41,93	27,65	82,15	41,99	27,66	-8,14	41,94	27,59
15°	61,42	46,43	26,98	86,69	45,53	27,00	-10,51	37,97	26,92
14°	66,55	51,09	26,59	91,41	49,21	26,60	-12,99	34,21	26,52
13°	71,61	55,69	26,16	96,06	52,83	26,21	-15,49	30,37	26,09
12°	76,85	60,44	25,71	100,85	56,58	25,76	-18,02	26,48	25,63
11°	82,65	65,67	25,24	106,18	60,71	25,30	-20,51	22,67	25,20
10°	89,22	71,65	24,73	112,25	65,46	24,79	-23,00	18,81	24,68
9°	97,08	78,81	24,25	119,54	71,16	24,26	-25,47	14,98	24,13
8°	106,68	87,50	23,61	128,53	78,19	23,63	-27,92	11,19	23,55
7°	118,90	98,54	22,95	140,13	87,22	22,97	-30,40	7,33	22,88
6°	134,98	113,15	22,22	155,43	99,06	22,17	-32,97	3,35	22,06
5°	157,13	133,20	21,28	176,35	115,43	21,32	-35,56	-0,61	21,18
4°	189,54	162,61	20,20	206,42	138,94	20,26	-38,12	-4,69	20,06
3°	240,32	208,66	18,68	252,04	174,43	18,78	-40,77	-8,78	18,47
2°	327,03	287,39	16,22	325,45	231,70	16,52	-42,92	-12,83	15,93
1°	491,04	435,82	8,96	436,23	318,84	10,14	-43,66	-16,90	8,45

Comparando as diferenças percentuais entre os deslocamentos Δ_{yz} dos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA e os do Modelo PE (TAB. 8.3), observa-se que:

a) no Pórtico 1, modelo PPI-AI, as diferenças percentuais são bastante significativas e variam de 56% a 491% aproximadamente, onde o valor máximo é de 491,04%, no 1° andar;

- b) no Pórtico 1, Modelo PPI-CT, as diferenças percentuais são significativas, superiores a 41%; a maior diferença percentual é de 435,82%, no 1º andar;
- c) no Pórtico 1, Modelo PPA, observa-se no 16º andar a diferença percentual máxima da ordem de 28%;
- d) no Pórtico 2, Modelo PPI-AI, os valores das diferenças percentuais são significativos e chegam a aproximadamente 437%, no 1º andar;
- e) no Pórtico 2, Modelo PPI-CT, são apresentados valores das diferenças percentuais que variam de 41% a 319% aproximadamente; no 1º andar observa-se a maior diferença percentual, de 318,84%;
- f) no Pórtico 2, Modelo PPA, observa-se a diferença percentual máxima da ordem de 28%, no 16º andar;
- g) no Pórtico 3, Modelo PPI-AI, o módulo máximo das diferenças percentuais é da ordem de 44%, no 1º andar;
- h) no Pórtico 3, Modelo PPI-CT, a diferença percentual máxima em valor absoluto é de aproximadamente 42%, no 16º andar;
- i) no Pórtico 3, Modelo PPA, são observados valores das diferenças percentuais que variam de 8% a 28% aproximadamente, onde o valor máximo é de 27,59%, no 16º andar.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar os deslocamentos laterais dos pórticos da Estrutura 3, pode-se afirmar que:

- a) o Modelo PPI-AI fez uma péssima avaliação dos deslocamentos Δ_{yz} dos pórticos da Estrutura 3, onde os módulos das diferenças percentuais variam entre 8% e 491% aproximadamente, sendo poucos os casos em que os valores obtidos são inferiores a 16% (13º, 14º, 15º e 16º andares, Pórtico 3); as grandes discrepâncias observadas devem-se ao fato de que neste modelo os diversos pórticos são processados independentemente uns dos outros e o quinhão de carga para cada um deles é obtido simplesmente por área de influência, sem

levar em consideração as rigidezes laterais de cada pórtico; além disso, como se constatou no exame da FIG. 8.4, os deslocamentos laterais Δ_y no topo da Estrutura 3 não são iguais em todos os pórticos; desta forma, observa-se que o Modelo PPI-AI é de péssima qualidade para representar a configuração da estrutura deformada;

b) o Modelo PPI-CT fez uma avaliação ruim dos deslocamentos Δ_{yz} dos pórticos, onde os módulos das diferenças percentuais alcançam valores de até aproximadamente 436%; poucos são os casos em que os valores são inferiores a 15% (2º ao 9º andar, Pórtico 3); estas diferenças devem-se, principalmente, ao fato de que no Modelo PPI-CT não há nenhuma interação transversal entre os diversos pórticos e, além disso, seu comportamento conjunto ocorre apenas no topo do edifício, o que não garante boa qualidade na avaliação dos resultados;

c) o Modelo PPA fez uma avaliação razoável dos deslocamentos Δ_{yz} nos pórticos, uma vez que as diferenças percentuais são menores em relação aos demais modelos, situando-se entre 8% e 28% aproximadamente; logo, o Modelo PPA, entre os modelos planos, é o que melhor avaliou os deslocamentos laterais da Estrutura 3; isto porque, a compatibilização dos deslocamentos Δ_y é feita em todos os andares.

8.3 – Momentos Fletores nos Pórticos

A FIG. 8.15 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigaamento do Pórtico 1 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 8.16 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigaamento do Pórtico 2 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 8.17 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigaamento do Pórtico 3 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

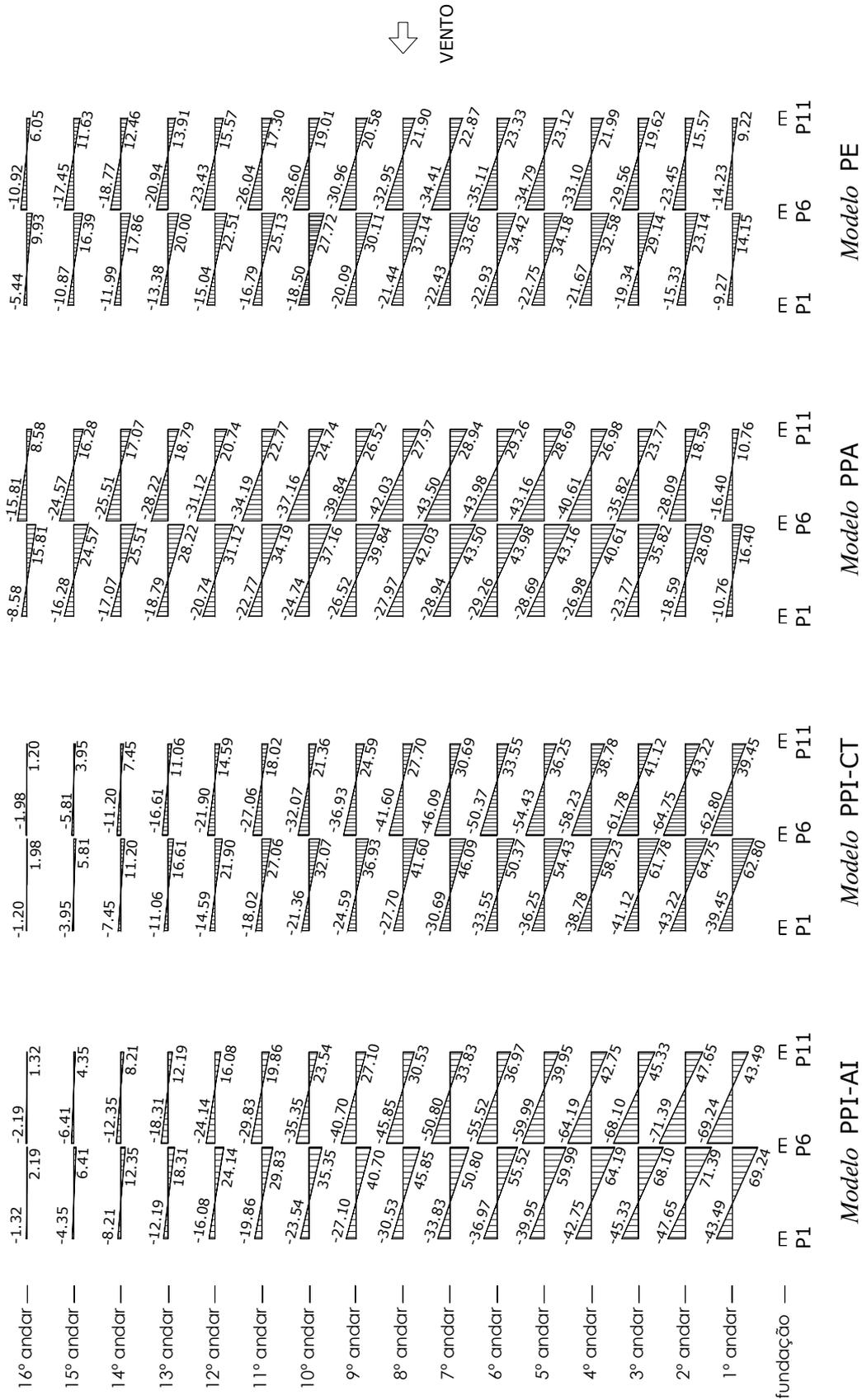


FIGURA 8.15 – Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 3: diagramas dos momentos fletores M_x no vigaento (em kN.m).

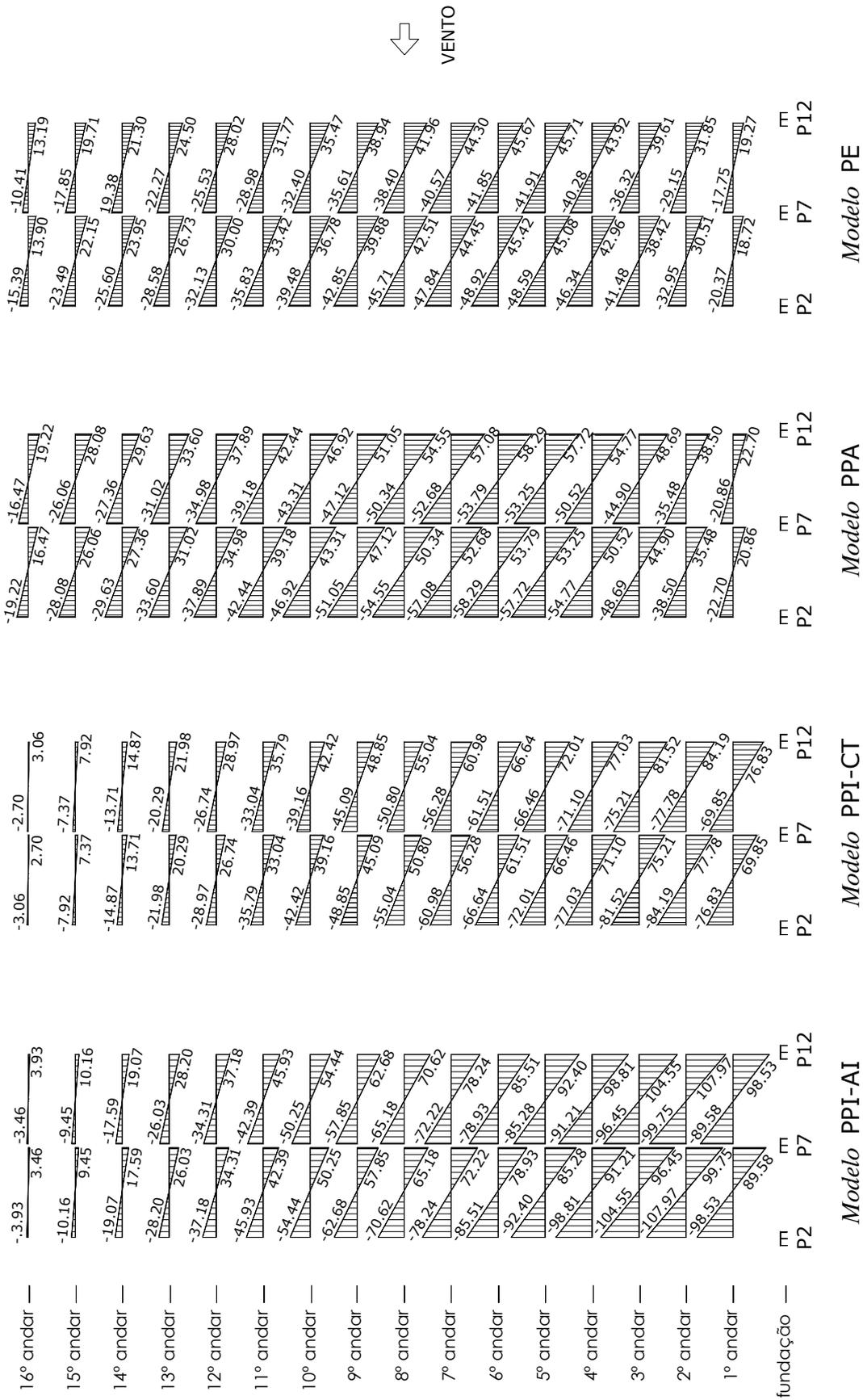


FIGURA 8.16 – Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 3: diagramas dos momentos fletores M_x no vigaçento (em kN.m).

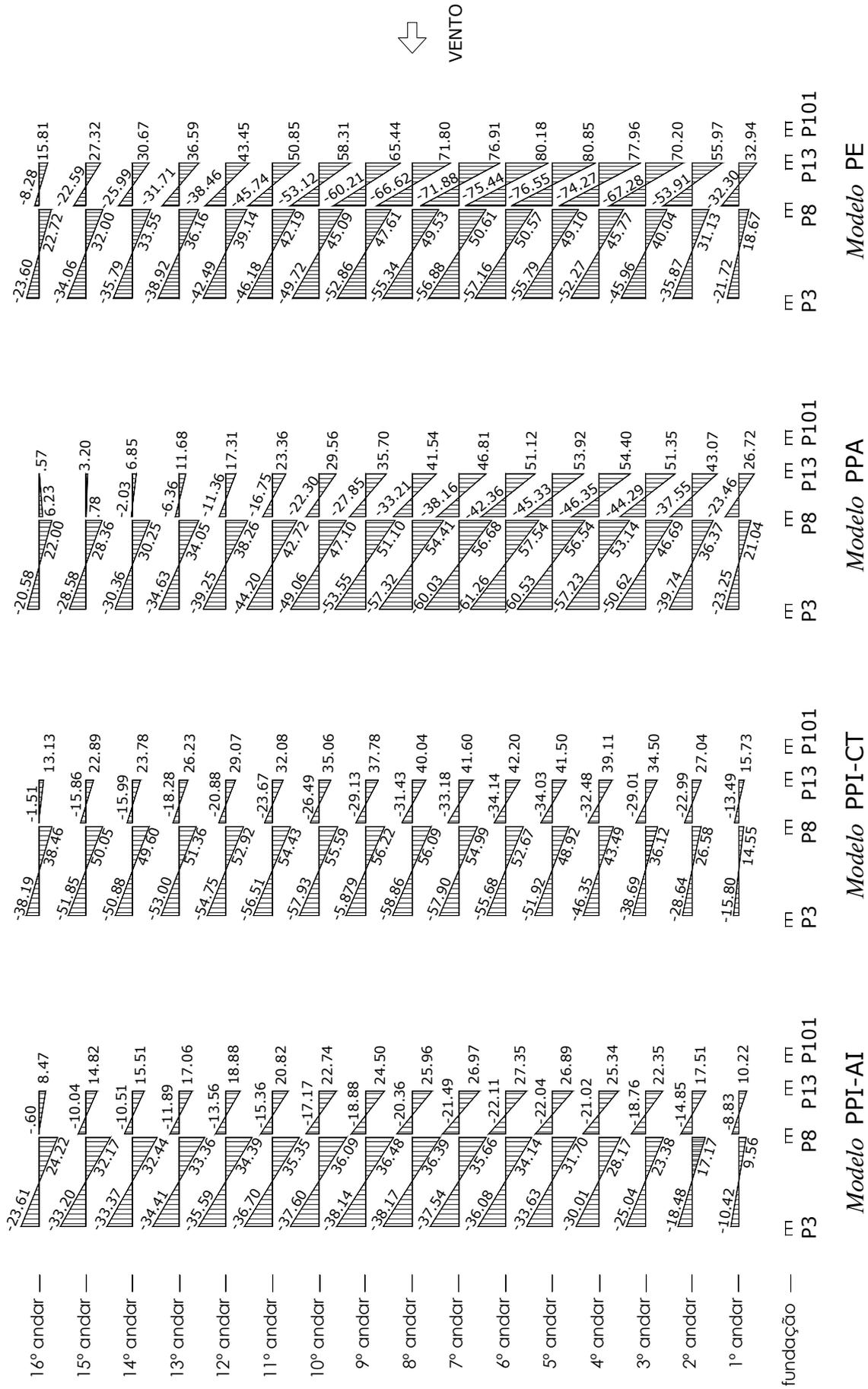


FIGURA 8.17 – Modelos do Pórtico 3 da Estrutura 3: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m).

Na TAB. 8.4 são apresentadas as diferenças em porcentagem dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1, 2 e 3, calculadas comparando-se os Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE. Nesta análise é suficiente observar o comportamento somente destes pórticos, pois o Pórtico 1 é igual ao Pórtico 5 e o Pórtico 2 ao Pórtico 4.

Os valores destas diferenças são obtidos através das FIG. 8.15, 8.16 e 8.17, utilizando-se a expressão (6.1). Para os Pórticos 1, 2 e 3 são utilizados os valores dos momentos fletores nas prumadas P11 (FIG. 8.15), P12 (FIG. 8.16) e P13 (FIG. 8.17), respectivamente.

TABELA 8.4 – Diferenças em % dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1, 2 e 3 da Estrutura 3.

ANDAR	$\Delta(M_x)\%$ do Pórtico 1			$\Delta(M_x)\%$ do Pórtico 2			$\Delta(M_x)\%$ do Pórtico 3		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
16°	-78,18	-80,17	41,82	-70,20	-76,80	45,72	-46,43	-16,95	-96,39
15°	-62,60	-66,04	39,98	-48,45	-59,82	42,47	-45,75	-16,22	-88,29
14°	-34,11	-40,21	37,00	-10,47	-30,19	39,11	-49,43	-22,46	-77,67
13°	-12,37	-20,49	35,08	15,10	-10,29	37,14	-53,38	-28,31	-68,08
12°	3,28	-6,29	33,20	32,69	3,39	35,22	-56,55	-33,10	-60,16
11°	14,80	4,16	31,62	44,57	12,65	33,59	-59,06	-36,91	-54,06
10°	23,83	12,36	30,14	53,48	19,59	32,28	-61,00	-39,87	-49,31
9°	31,68	19,48	28,86	60,97	25,45	31,10	-62,56	-42,27	-45,45
8°	39,41	26,48	27,72	68,30	31,17	30,00	-63,84	-44,23	-42,14
7°	47,92	34,19	26,54	76,61	37,65	28,85	-64,93	-45,91	-39,14
6°	58,47	43,81	25,42	87,23	45,92	27,63	-65,89	-47,37	-36,24
5°	72,79	56,79	24,09	102,14	57,54	26,27	-66,74	-48,67	-33,31
4°	94,41	76,35	22,69	124,98	75,39	24,70	-67,50	-49,83	-30,22
3°	131,04	109,58	21,15	163,95	105,81	22,92	-68,16	-50,85	-26,85
2°	206,04	177,59	19,40	239,00	164,33	20,88	-68,72	-51,69	-23,05
1°	371,69	327,87	16,70	411,31	298,70	17,80	-68,97	-52,25	-18,88

Comparando as diferenças percentuais dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1, 2 e 3 da Estrutura 3, observa-se que:

- a) no Pórtico 1, Modelo PPI-AI, os módulos das diferenças percentuais são bastante significativos e variam de 24% a 372% aproximadamente, exceto nos andares 11º, 12º e 13º, onde os módulos não ultrapassam 15%;
- b) no Pórtico 1, Modelo PPI-CT, os módulos das diferenças percentuais também são bastante significativos e variam de 19% a 328% aproximadamente, exceto nos andares 10º, 11º e 12º, onde os módulos não ultrapassam 13%;
- c) no Pórtico 1, Modelo PPA, observam-se diferenças percentuais significativas com valores que variam de 17% a 42% aproximadamente; o valor máximo, 41,28%, ocorre no 16º andar;
- d) no Pórtico 2, Modelo PPI-AI, observam-se diferenças percentuais muito significativas, em valor absoluto, que variam entre 33% e 412% aproximadamente, exceto nos andares 13º e 14º, onde os valores não ultrapassam 16%; a diferença percentual máxima é de 411,31%, no 1º andar;
- e) no Pórtico 2, Modelo PPI-CT, os módulos das diferenças percentuais também são muito significativos e variam entre 20% a 299% aproximadamente, exceto nos andares 11º, 12º e 13º, onde os módulos não ultrapassam 13%;
- f) no Pórtico 2, Modelo PPA, observam-se diferenças percentuais significativas com valores que variam de 18% a 46% aproximadamente; o valor máximo de 45,72% ocorre no 16º andar;
- g) no Pórtico 3, Modelo PPI-AI, as diferenças percentuais são, em valor absoluto, superiores a 45%; o valor máximo é de 68,97%, no 1º andar;
- h) no Pórtico 3, Modelo PPI-CT, os módulos das diferenças percentuais são superiores a 16%; o valor máximo é de 52,25%, no 1º andar;
- i) no Pórtico 3, Modelo PPA, observam-se módulos das diferenças percentuais significativos que variam entre 19% e 97% aproximadamente; o módulo máximo é de 96,39%, no 16º andar.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar os momentos fletores M_x no vigamento dos pórticos da Estrutura 3, pode-se afirmar:

- a) o modelo PPI-AI fez uma péssima avaliação dos momentos fletores M_x no vigamento dos pórticos da Estrutura 3, onde os módulos das diferenças percentuais variam entre 3% e 412% aproximadamente, sendo poucos os casos onde os valores obtidos apresentam módulos de diferenças percentuais inferiores a 16% (11º, 12º e 13º andares do Pórtico 1 e 13º e 14º andares do Pórtico 2); as discrepâncias observadas devem-se ao fato de que neste modelo os diversos pórticos são processados independentemente uns dos outros e o quinhão de carga para cada um deles é obtido simplesmente por área de influência, sem levar em consideração as rigidezes laterais em cada pórtico; desta forma, observa-se que o Modelo PPI-AI não é de boa qualidade para calcular os momentos fletores M_x no vigamento da Estrutura 3;
- b) o modelo PPI-CT fez uma avaliação ruim dos momentos fletores M_x no vigamento dos pórticos da Estrutura 3, onde os módulos das diferenças percentuais alcançam valores de até aproximadamente 328%; poucos são os casos onde os módulos são inferiores a 13% (10º ao 12º andar do Pórtico 1 e 11º ao 13º andar do Pórtico 2); estas diferenças devem-se, principalmente, ao fato de que no Modelo PPI-CT não há interação transversal entre os diversos pórticos e, além disso, seu comportamento conjunto ocorre apenas no topo do edifício;
- c) o modelo PPA não fez uma boa avaliação dos momentos fletores M_x no vigamento dos pórticos, já que os módulos das diferenças percentuais ultrapassaram 16% em todos os andares; o valor máximo alcançado foi 96,39% no 16º andar do Pórtico 3; nos andares inferiores (1º ao 8º), onde os momentos fletores são maiores, o Modelo PPA é melhor do que o Modelo PPI-CT, exceto no 8º andar do Pórtico 1; nos andares superiores (9º ao 16º), onde os momentos fletores são menores, o Modelo PPI-CT é melhor do que o Modelo PPA, exceto nos andares 14º, 15º e 16º do Pórtico 1 e 15º e 16º do Pórtico 2; note-se que os momentos fletores M_x nos andares superiores são pequenos, o que distorce os resultados obtidos com a expressão (6.1); portanto, entre os modelos planos utilizados, o Modelo PPA é o que melhor avaliou os momentos fletores na Estrutura 3.

9

Análise dos Resultados da Estrutura 4

Neste capítulo, são feitas análises comparativas dos resultados obtidos através dos processamentos realizados para a Estrutura 4.

Os resultados comparados são:

- cargas na fundação;
- deslocamentos laterais nos pórticos;
- momentos fletores no vigamento dos pórticos.

9.1 - Cargas nas Fundações

Na TAB. 9.1, são apresentados os valores dos esforços nas fundações da Estrutura 4 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

F_y , F_z e M_x são cargas nas fundações que serão analisadas na Estrutura 4 e significam, respectivamente:

F_y – força na direção y;

TABELA 9.1 – Esforços nas fundações da Estrutura 4.

PILAR	MODELO PPI-AI			MODELO PPI-CT			MODELO PPA			MODELO PE		
	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x	F _y	F _z	M _x
P1	7,03	105,07	-10,95	5,66	84,51	-8,80	11,95	214,35	-18,65	8,38	263,78	-13,12
P2	10,09	165,35	-15,71	11,00	180,97	-17,13	11,95	216,04	-18,65	10,90	69,94	-16,93
P3	37,99	54,37	-73,13	30,66	43,88	-58,98	62,90	110,10	-123,23	45,11	93,91	-87,44
P4	53,28	92,55	-103,79	58,23	101,24	-113,47	62,54	120,54	-122,79	56,40	114,33	-110,38
P5	48,60	333,12	-107,72	59,44	404,12	-131,46	50,64	315,93	-110,81	54,46	336,79	-120,09
P6	38,18	-54,56	-73,44	30,66	-43,88	-58,98	62,90	-110,10	-123,23	45,13	-77,57	-87,43
P7	57,38	-11,37	-107,86	62,77	-12,55	-118,01	67,49	-15,99	-127,75	60,65	-12,13	-114,60
P8	66,37	0,03	-125,82	80,30	0,00	-152,33	67,95	0,00	-128,13	73,32	26,01	-138,91
P9	81,94	661,54	-185,08	59,09	476,15	-133,41	51,58	285,55	-111,72	64,13	356,21	-141,34
P10	70,50	364,79	-168,05	80,78	417,23	-192,44	45,83	193,81	-105,95	64,39	351,35	-153,21
P11	7,11	-105,08	-11,06	5,66	-84,51	-8,80	11,95	-214,35	-18,65	8,36	-206,68	-13,06
P12	43,44	-246,53	-93,93	47,66	-269,66	-102,91	50,86	-320,59	-111,11	45,77	-248,28	-99,70
P13	49,23	-333,15	-108,76	59,44	-404,12	-131,46	50,64	-315,93	-110,81	54,16	-357,57	-119,72
P14	82,25	-661,54	-185,61	59,09	-476,15	-133,41	51,58	-285,55	-111,72	64,12	-432,53	-141,33
P15	19,83	-364,79	-30,74	22,54	-417,23	-34,95	12,25	-193,81	-18,94	17,97	-277,56	-27,84

F_z – força na direção z;

M_x – momento na direção x.

Os sentidos considerados positivos para as cargas nas fundações da Estrutura 4 estão mostrados na FIG. 6.1.

Os valores de F_x , M_y e M_z são sempre nulos para os modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA. Por este motivo, não são apresentados na TAB. 9.1.

Para uma melhor visualização, os valores dos esforços nas fundações da Estrutura 4 da TAB. 9.1 estão representados na forma de gráficos nas FIG. 9.1, 9.2 e 9.3.

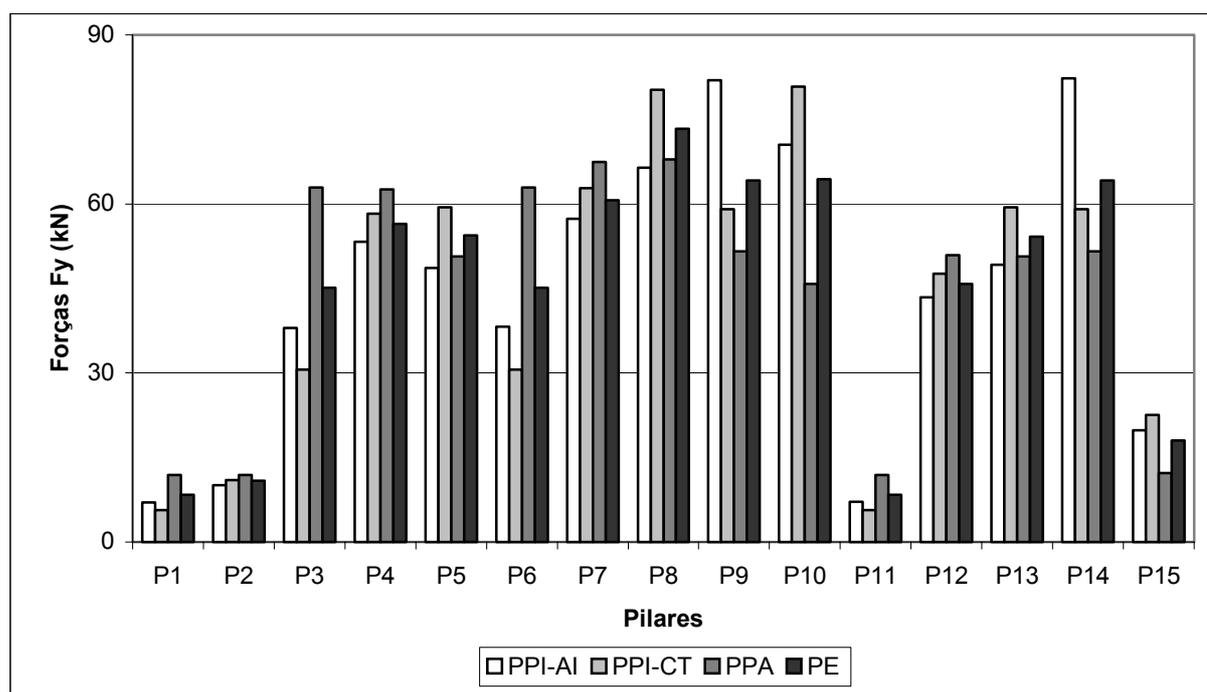
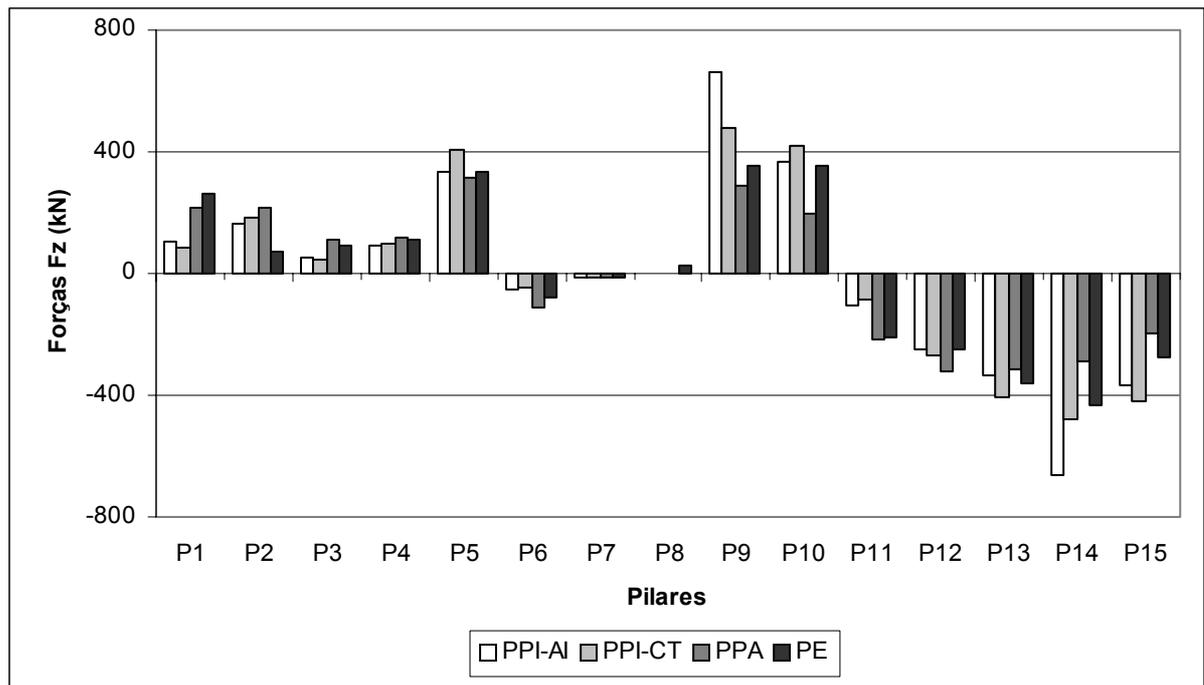
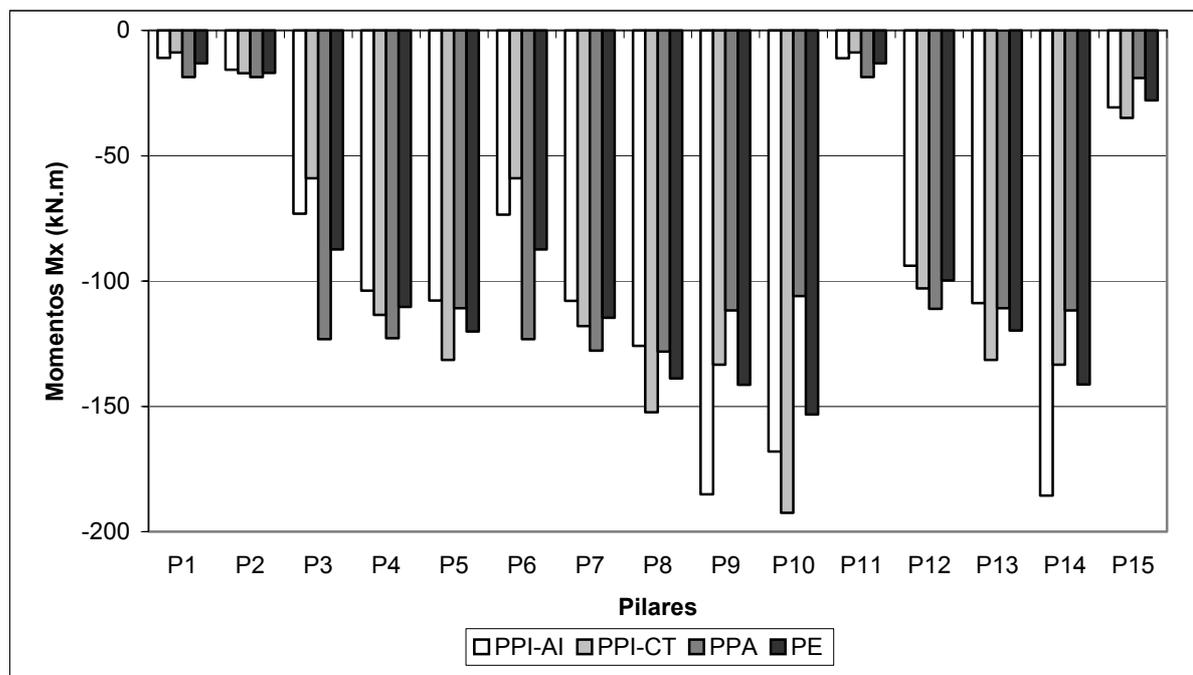


FIGURA 9.1 – Forças F_y nas fundações da Estrutura 4.

FIGURA 9.2 – Forças F_z nas fundações da Estrutura 4.FIGURA 9.3 – Momentos M_x nas fundações da Estrutura 4.

A seguir, na TAB. 9.2 são apresentadas as diferenças percentuais dos esforços nas fundações da Estrutura 4 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE. Os valores destas diferenças percentuais são obtidos através da expressão (6.1).

O Modelo PE é tomado como referência, entre os quatro modelos existentes neste trabalho, por ser o que mais se aproxima do real comportamento da Estrutura 4.

TABELA 9.2 – Diferenças em % dos esforços nas fundações da Estrutura 4.

PILAR	$\Delta(F_y)\%$			$\Delta(F_z)\%$			$\Delta(M_x)\%$		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
P1	-16,11	-32,46	42,60	-60,17	-67,96	-18,74	16,54	32,93	-42,15
P2	-7,43	0,92	9,63	136,42	158,75	208,89	7,21	-1,18	-10,16
P3	-15,78	-32,03	39,44	-42,10	-53,27	17,24	16,37	32,55	-40,93
P4	-5,53	3,24	10,89	-19,05	-11,45	5,43	5,97	-2,80	-11,24
P5	-10,76	9,14	-7,01	-1,09	19,99	-6,19	10,30	-9,47	7,73
P6	-15,40	-32,06	39,38	29,66	43,43	-41,94	16,00	32,54	-40,95
P7	-5,39	3,50	11,28	6,27	-3,46	-31,82	5,88	-2,98	-11,47
P8	-9,48	9,52	-7,32	-99,88	-100,00	-100,00	9,42	-9,66	7,76
P9	27,77	-7,86	-19,57	85,72	33,67	-19,84	-30,95	5,61	20,96
P10	9,49	25,45	-28,82	3,83	18,75	-44,84	-9,69	-25,61	30,85
P11	-14,95	-32,30	42,94	49,16	59,11	-3,71	15,31	32,62	-42,80
P12	-5,09	4,13	11,12	0,70	-8,61	-29,12	5,79	-3,22	-11,44
P13	-9,10	9,75	-6,50	6,83	-13,02	11,65	9,15	-9,81	7,44
P14	28,28	-7,84	-19,56	-52,95	-10,08	33,98	-31,33	5,60	20,95
P15	10,35	25,43	-31,83	-31,43	-50,32	30,17	-10,42	-25,54	31,97

Na Tabela 9.2, observa-se que:

- as forças F_y , Modelo PPI-AI, apresentam módulos das diferenças percentuais variando entre 5% e 29%, aproximadamente; o módulo máximo é de 28,28% em P14;
- as forças F_y , Modelo PPI-CT, apresentam diferenças percentuais, em valor absoluto, que variam entre 0,92% e 32,46%; o valor máximo é da ordem de 33%, nos pilares P1, P3, P6 e P11;

- c) as forças F_y , Modelo PPA, apresentam módulos das diferenças percentuais variando de 6,50% a 42,94%; nos pilares P1 e P11 são observados os maiores módulos, da ordem de 43%;
- d) as forças F_z , Modelo PPI-AI, apresentam módulos das diferenças percentuais que variam de 0,7% a 136,42%; o módulo máximo é da ordem de 137%, em P2;
- e) as forças F_z , Modelo PPI-CT, apresentam diferenças percentuais, em valores absolutos, que variam entre 3% e 159%, aproximadamente; o valor máximo é de 158,75%, em P2;
- f) as forças F_z , Modelo PPA, apresentam módulos das diferenças percentuais que variam de 3,71% a 208,89%; o módulo máximo ocorre no pilar P2 e é da ordem de 209%;
- g) os momentos M_x , Modelo PPI-AI, apresentam diferenças percentuais, em valores absolutos, que variam de 6% a 31% aproximadamente; o valor máximo é de 31,33%, em P14;
- h) os momentos M_x , Modelo PPI-CT, apresentam módulos das diferenças percentuais variando entre 1% e 33%, aproximadamente; o módulo máximo é de 32,93%, no pilar P1;
- i) os momentos M_x , Modelo PPA, apresentam módulos das diferenças percentuais que variam entre 7% e 43%, aproximadamente; o módulo máximo é de 42,80%, em P11.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar as cargas nas fundações, pode-se afirmar que:

- a) o Modelo PPI-AI apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 29% para F_y , 137% para F_z e 31% para M_x ; observa-se que o modelo foi incapaz de avaliar adequadamente os esforços nas fundações o que comprova sua baixa qualidade; isto porque a determinação do carregamento em cada painel vertical enrijecido obedece a critérios geométricos e não leva em consideração as rigidezes dos painéis verticais e seu comportamento conjunto;
- b) o Modelo PPI-CT apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 33% para F_y , 159% para F_z e 33% para M_x ; este modelo, mesmo sendo superior ao Modelo PPI-AI, por levar em consideração as rigidezes dos painéis verticais e a compatibilidade dos

deslocamentos laterais Δ_y no topo, também não foi capaz de fazer uma boa avaliação dos esforços nas fundações da Estrutura 4; isto porque seu comportamento conjunto deixa a desejar uma vez que a compatibilização dos deslocamentos laterais Δ_y ocorre apenas no topo do edifício e a ação dos pórticos transversais à direção do vento não é considerada (os deslocamentos laterais Δ_x não são sequer calculados); desta forma, os resultados obtidos não são confiáveis;

c) o modelo PPA apresenta módulos máximos das diferenças percentuais da ordem de 43% para F_y , 209% para F_z e 43% para M_x ; este modelo, apesar de ter sido superior aos Modelos PPI-AI e PPI-CT nas Estruturas 1, 2 e 3, por levar em consideração a rigidez lateral dos painéis verticais e ter os deslocamentos laterais Δ_y compatibilizados em todos os andares, também não fez uma boa avaliação dos esforços nas fundações da Estrutura 4; isto porque este modelo não leva em consideração as rotações θ_z das lajes e, conseqüentemente, a ação dos pórticos transversais à direção do vento.

9.2 – Deslocamentos Laterais nos Pórticos

As FIG. 9.4, 9.5, 9.6 e 9.7 mostram os deslocamentos Δ_y no topo dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE, respectivamente.

As FIG. 9.8, 9.9, 9.10 e 9.11 apresentam, nos diversos andares, os deslocamentos nodais Δ_{yz} nos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE, respectivamente.

A FIG. 9.12 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 1 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 9.13 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 2 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 9.14 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 3 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 9.15 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 4 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 9.16 apresenta, nos diversos andares, os valores dos deslocamentos nodais Δ_{yz} no Pórtico 5 para os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

O exame da FIG. 9.7 mostra que os segmentos de reta que unem os pórticos devem estar sobre uma mesma reta em função da hipótese das lajes terem sido consideradas como diafragmas rígidos. Observa-se também que a reta deve sofrer uma rotação θ_z .

Através da FIG. 9.4 observa-se no Modelo PPI-AI que os segmentos de reta que unem os pórticos não estão sobre uma mesma reta, conforme exige a hipótese da laje ser considerada um diafragma rígido. Este fato sinaliza, à priori, que o Modelo PPI-AI não é confiável.

Através da FIG. 9.5 observa-se no Modelo PPI-CT que os segmentos de reta que unem os pórticos estão sobre uma mesma reta. Assim sendo, este modelo é, em princípio, superior ao Modelo PPI-AI.

Através da FIG. 9.6 observa-se no Modelo PPA que os segmentos de reta que unem os pórticos estão sobre uma mesma reta. Todavia, esta reta apenas translada sendo a rotação $\theta_z = 0$. Por este motivo pode-se afirmar, à priori, que o Modelo PPA também não é confiável.

O exame da FIG. 9.12 mostra que os deslocamentos Δ_{yz} no Pórtico 1 calculados com os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE divergem entre si. O mesmo se pode dizer em relação ao Pórtico 2 (FIG. 9.13), Pórtico 3 (FIG. 9.14), Pórtico 4 (FIG. 9.15) e Pórtico 5 (FIG. 9.16).

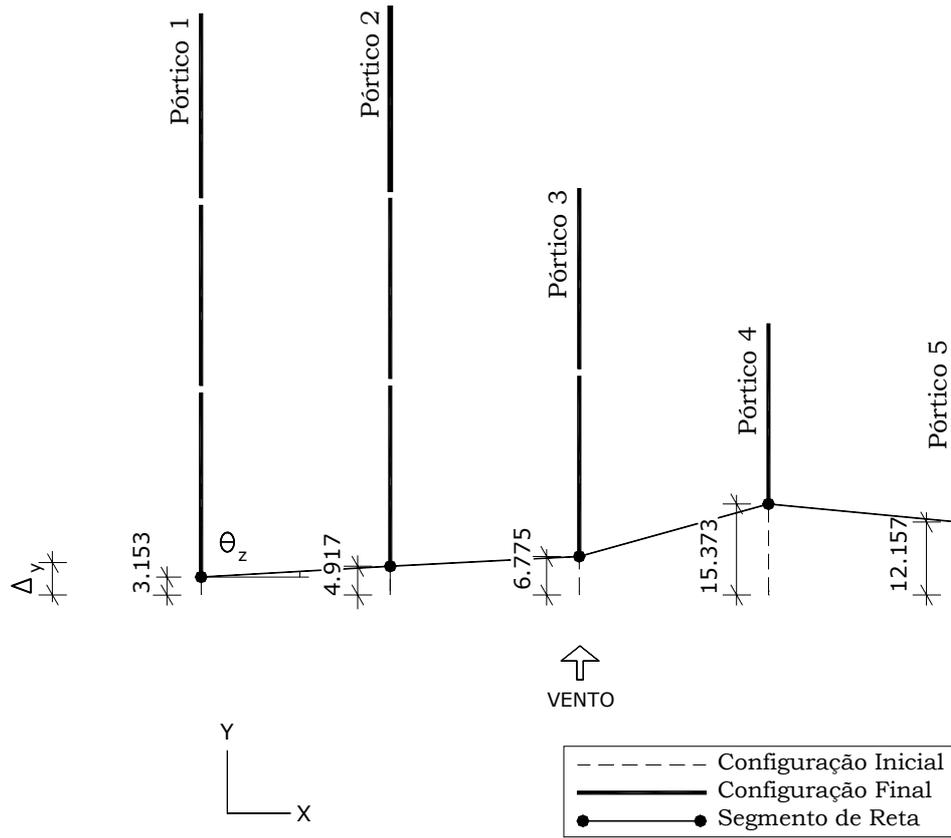


FIGURA 9.4 – Modelo PPI-AI da Estrutura 4: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

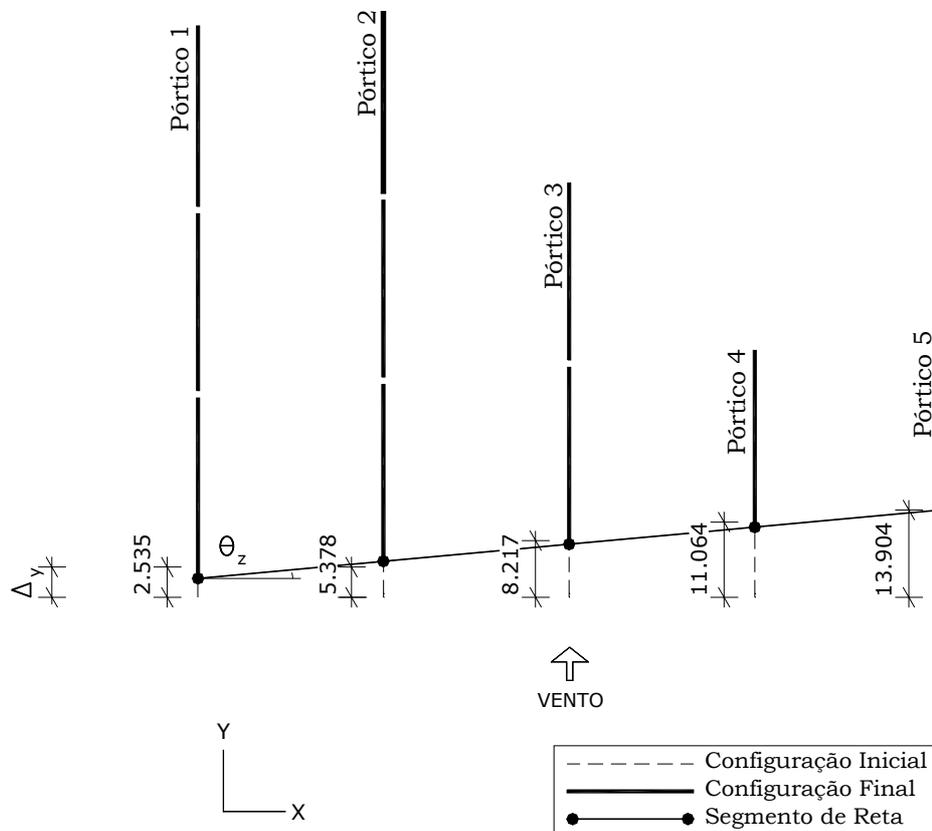


FIGURA 9.5 – Modelo PPI-CT da Estrutura 4: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

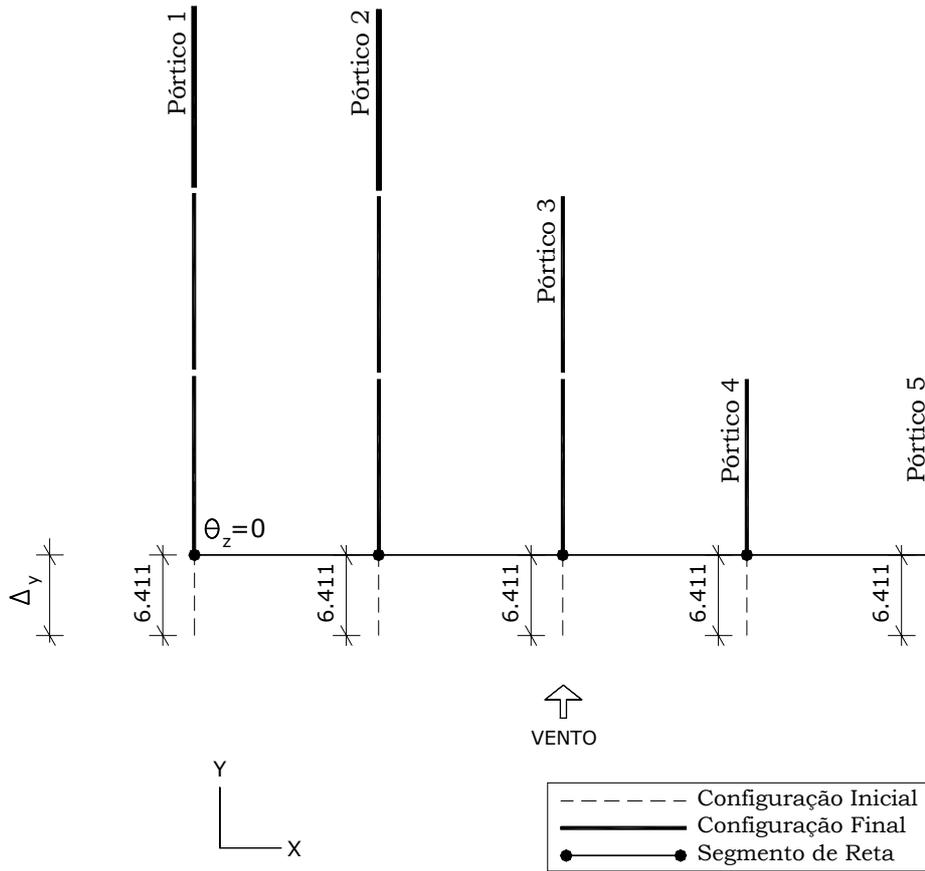


FIGURA 9.6 – Modelo PPA da Estrutura 4: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

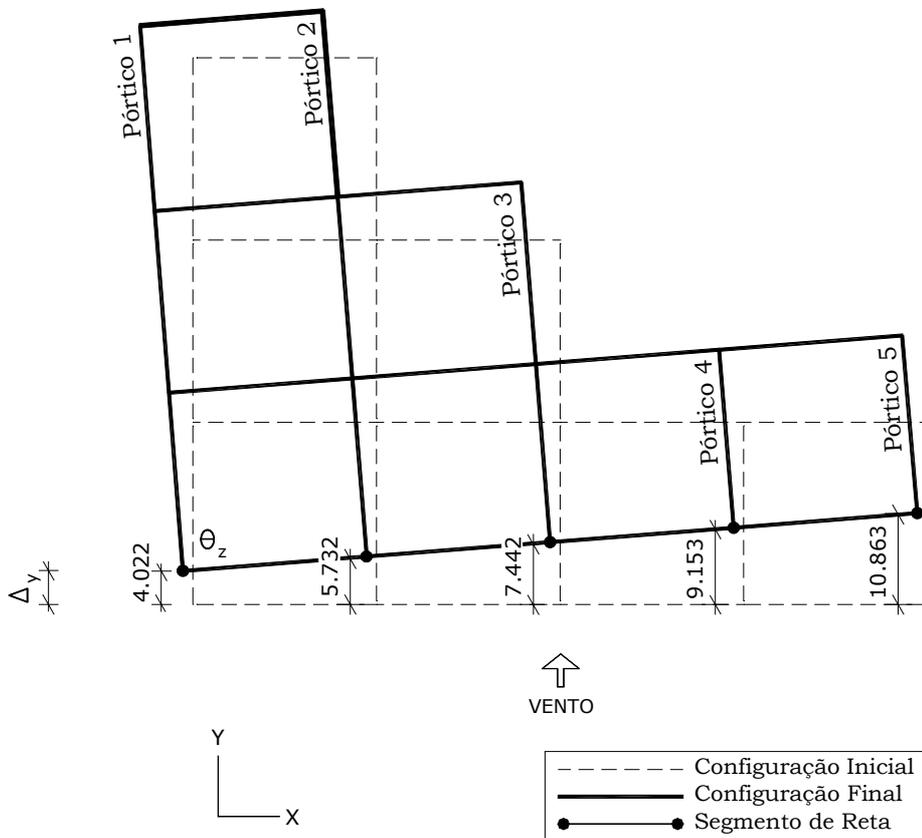


FIGURA 9.7 – Modelo PE da Estrutura 4: deslocamentos Δ_y no topo (em cm).

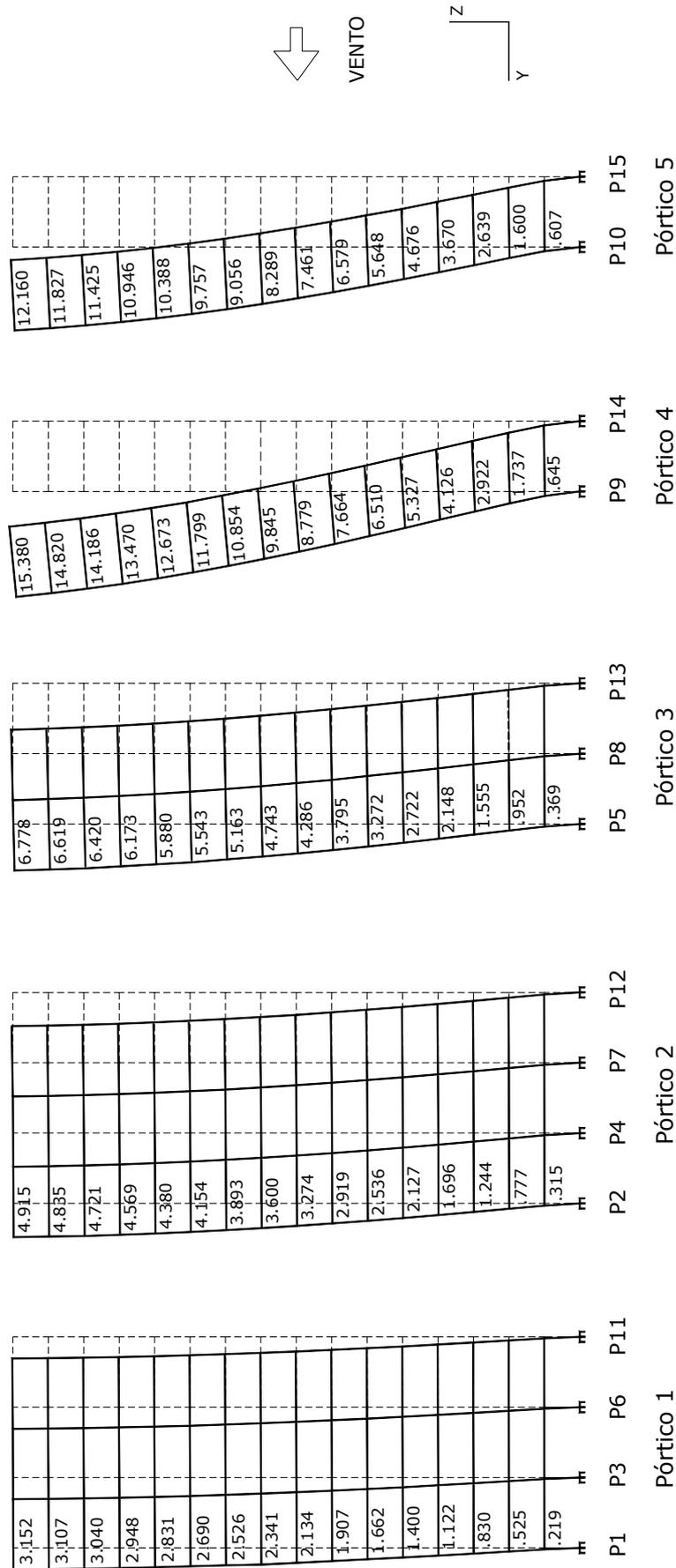


FIGURA 9.8 – Modelo PPI-AI da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

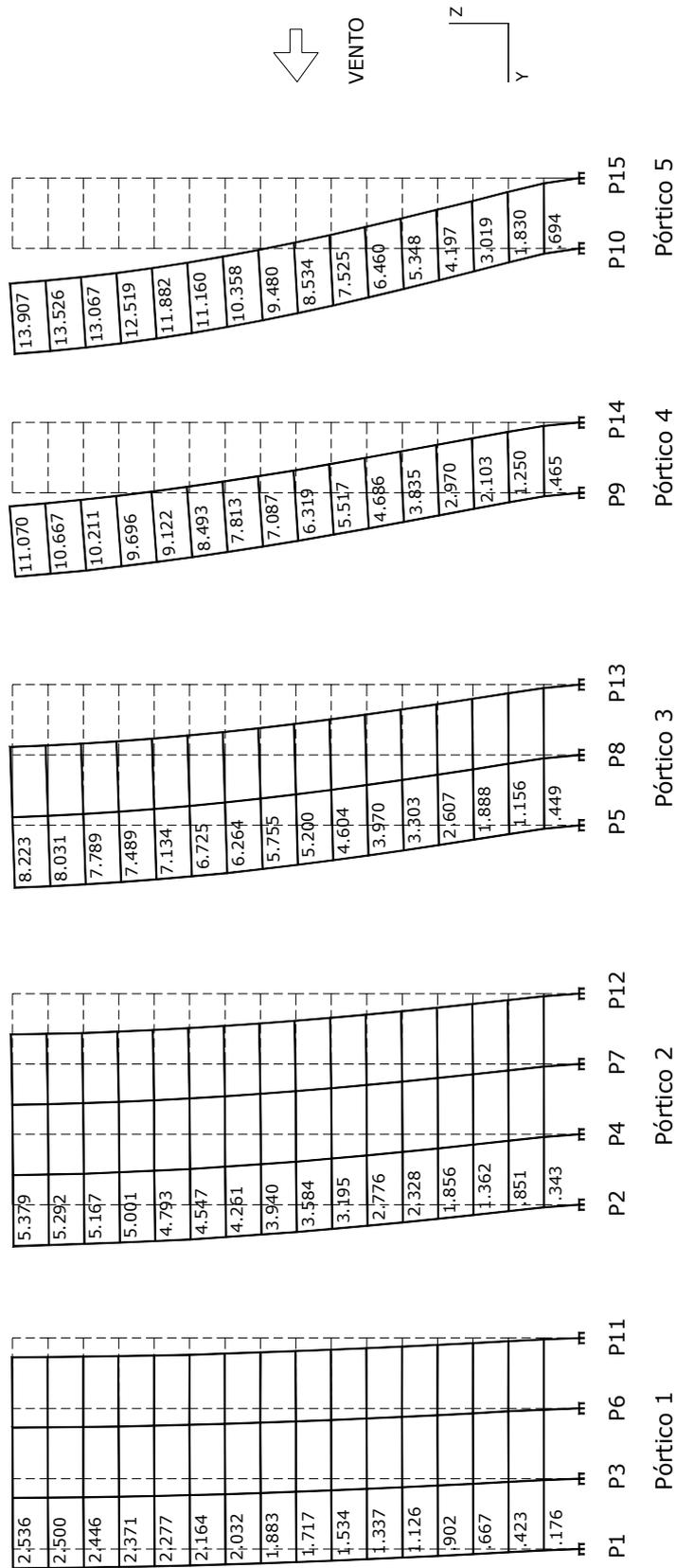


FIGURA 9.9 – Modelo PPI-CT da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

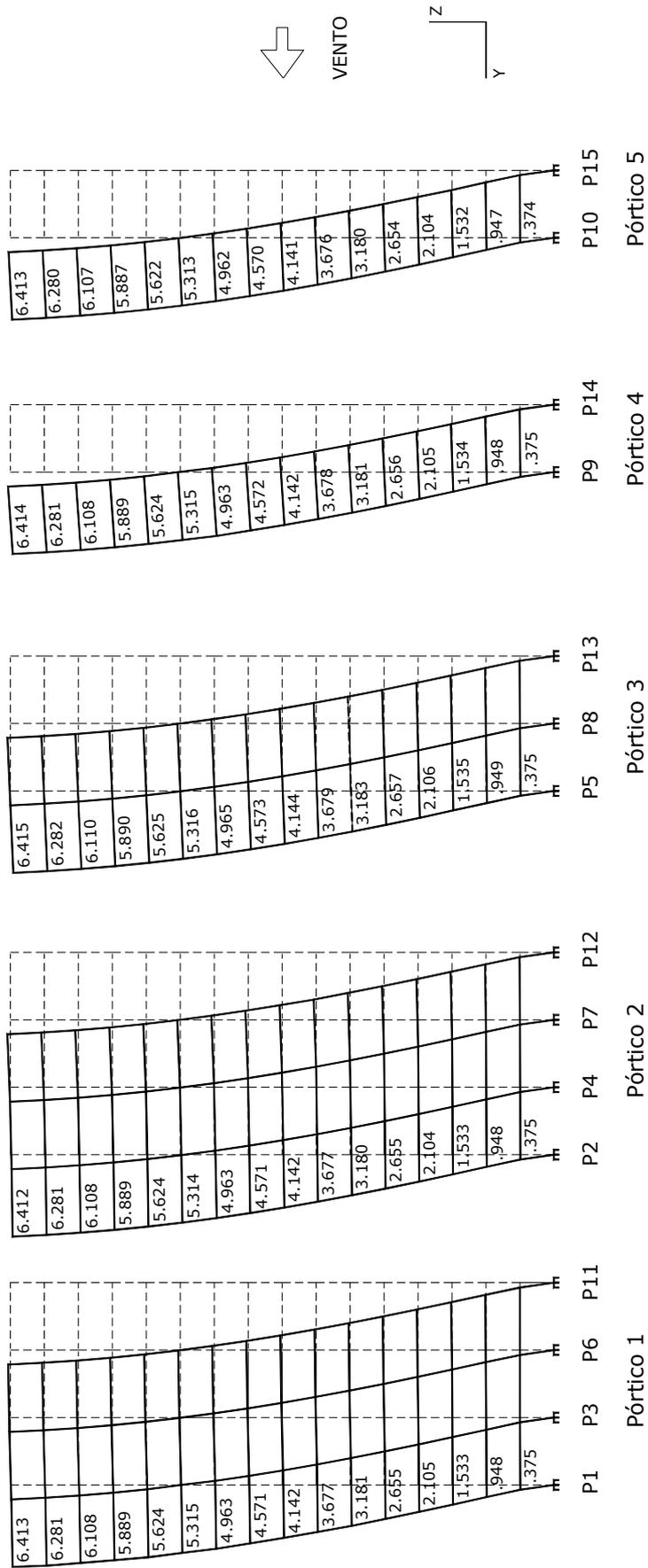


FIGURA 9.10 – Modelo PPA da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

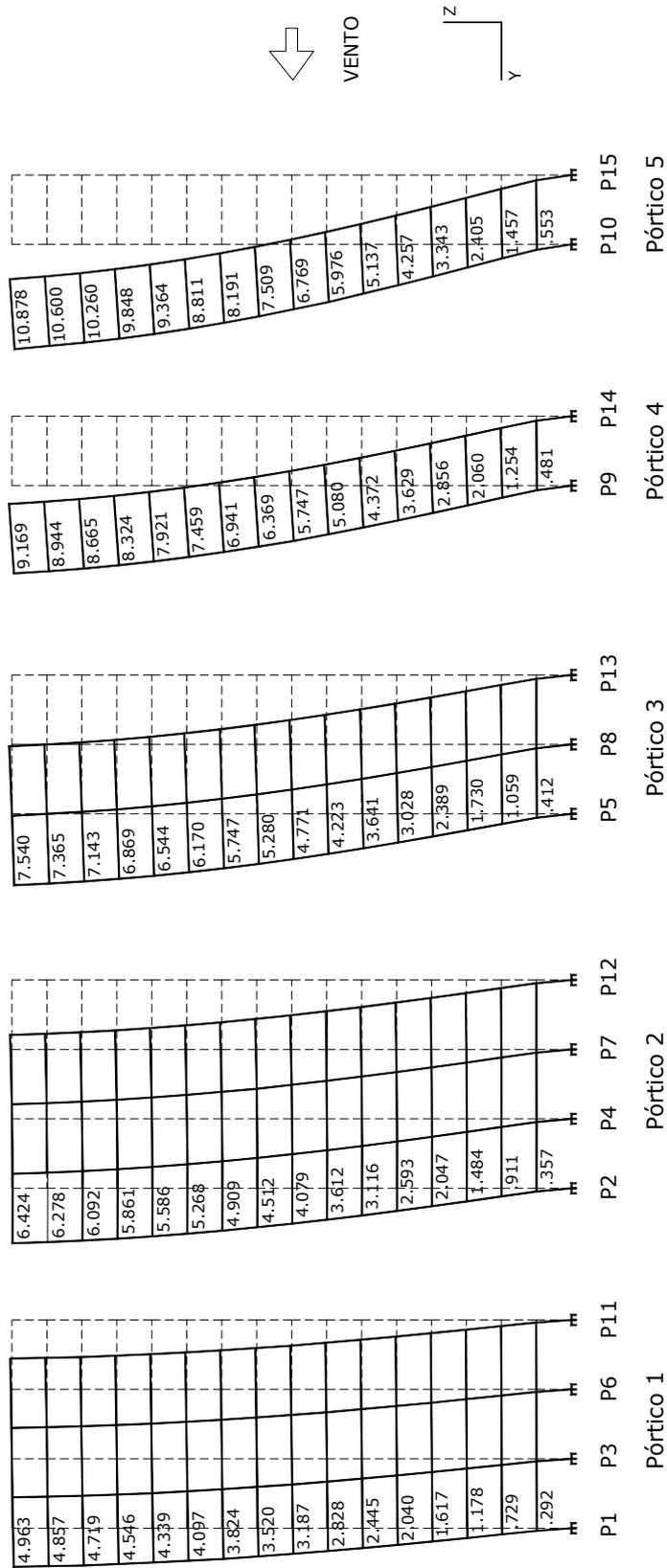


FIGURA 9.11 – Modelo PE da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

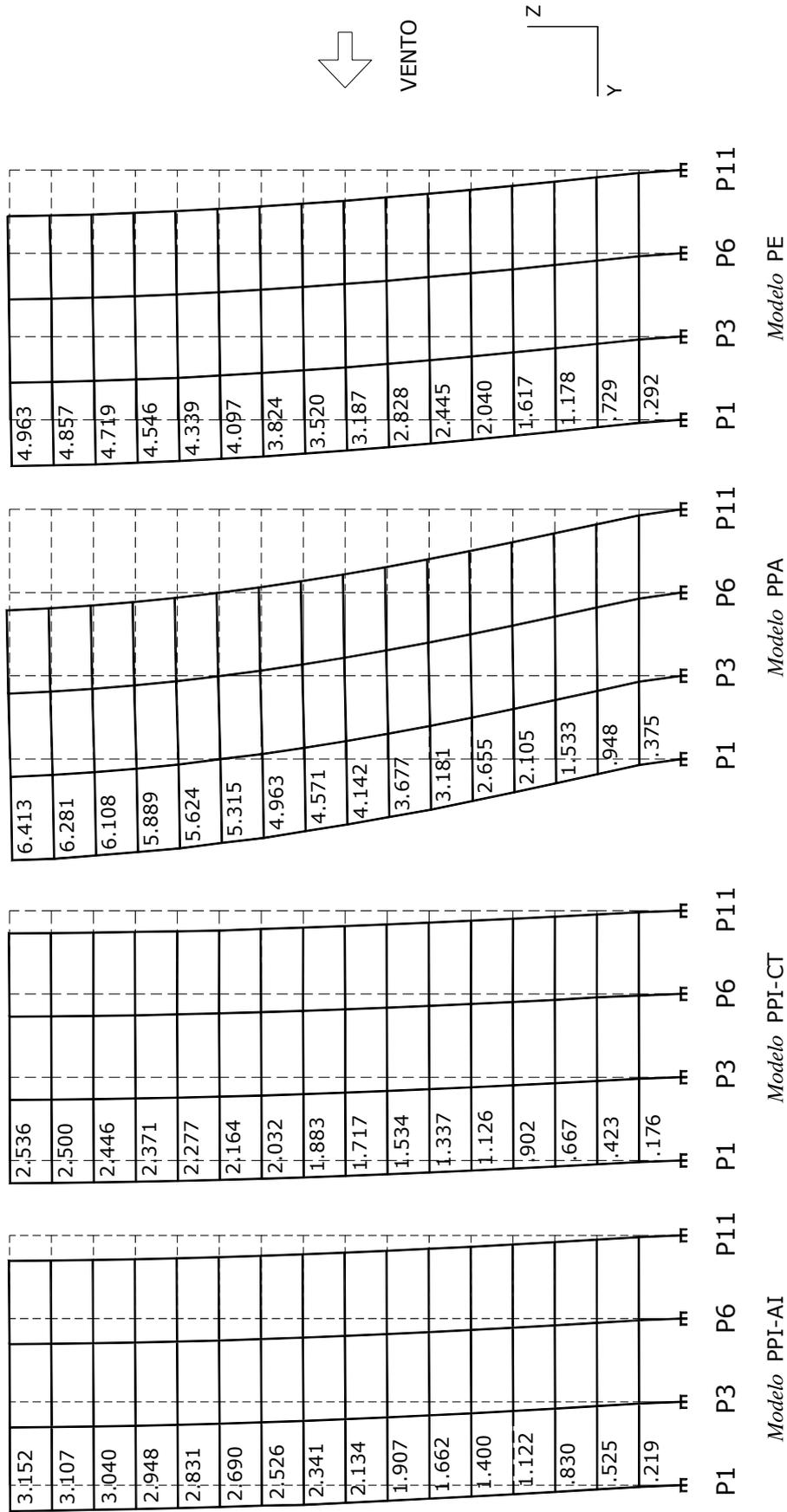


FIGURA 9.12 – Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

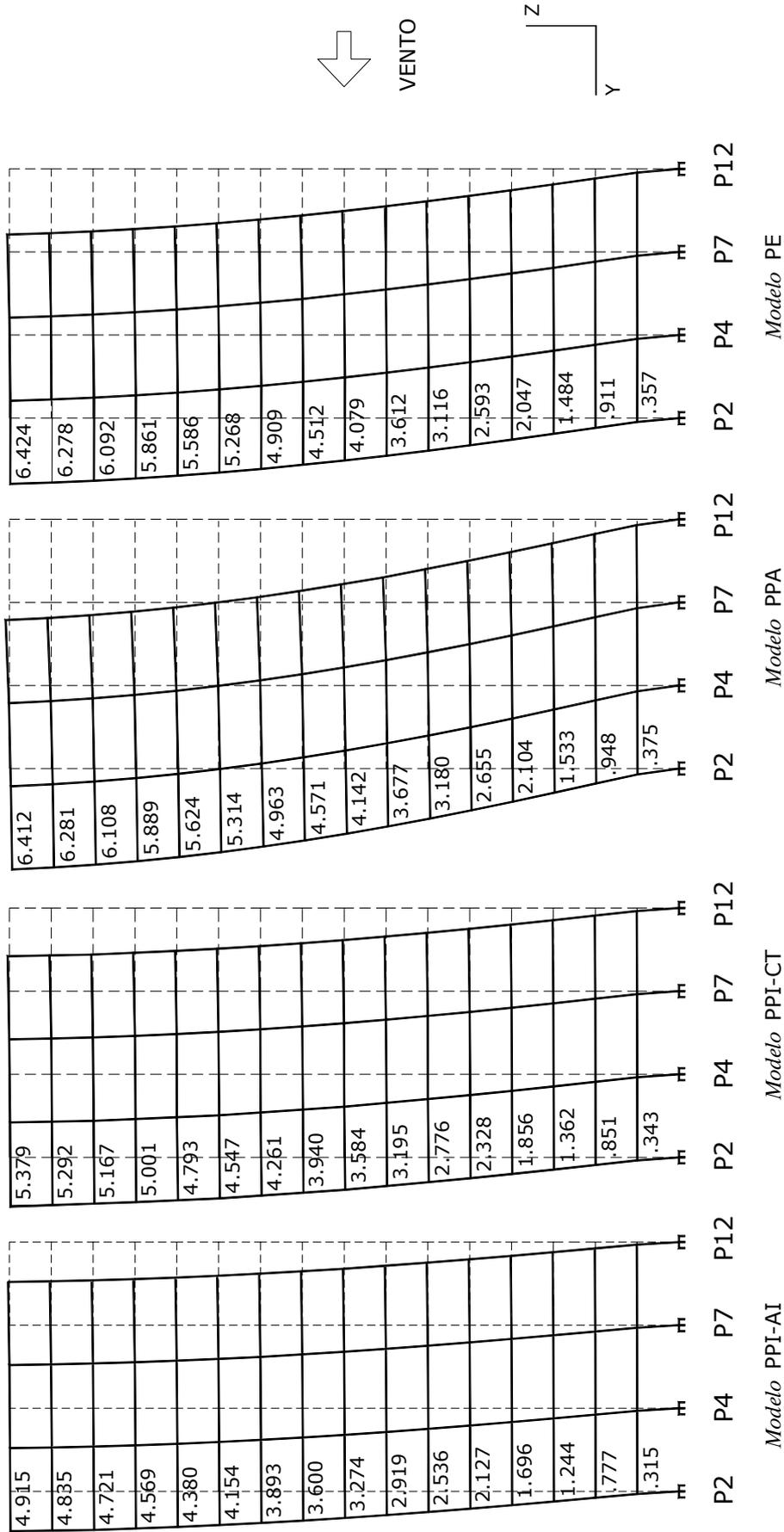


FIGURA 9.13 – Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

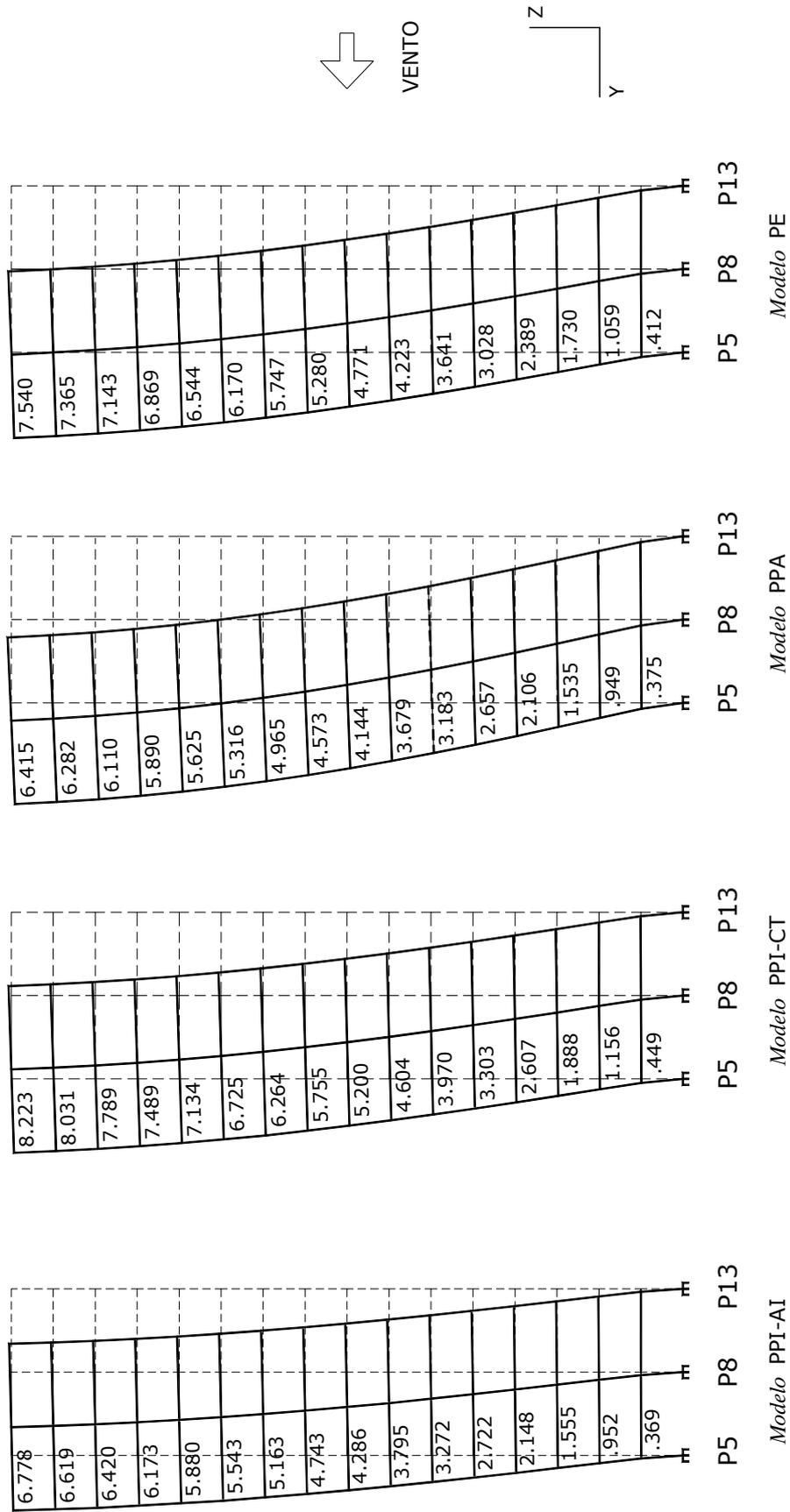


FIGURA 9.14 – Modelos do Pórtico 3 da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

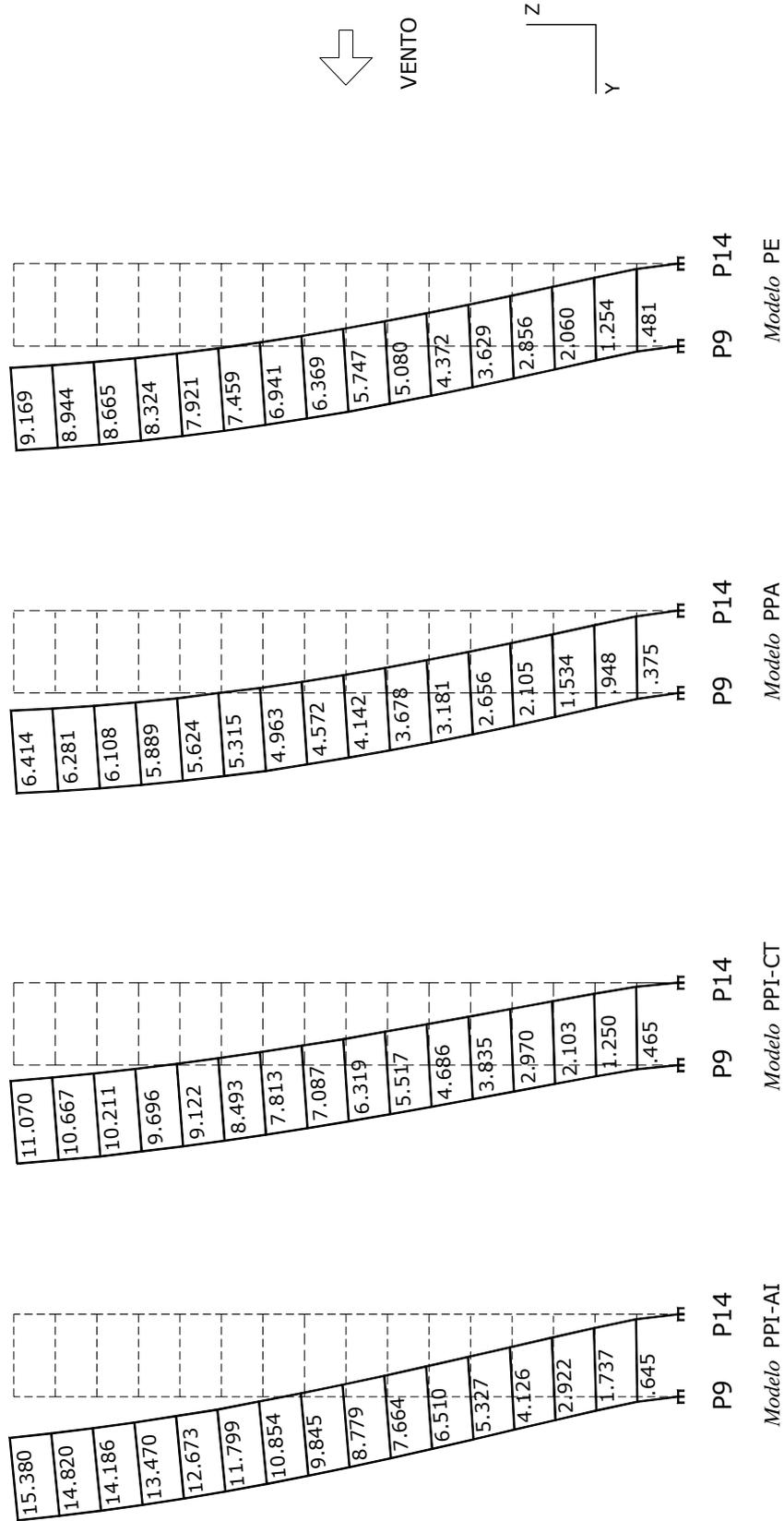


FIGURA 9.15 – Modelos do Pórtico 4 da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

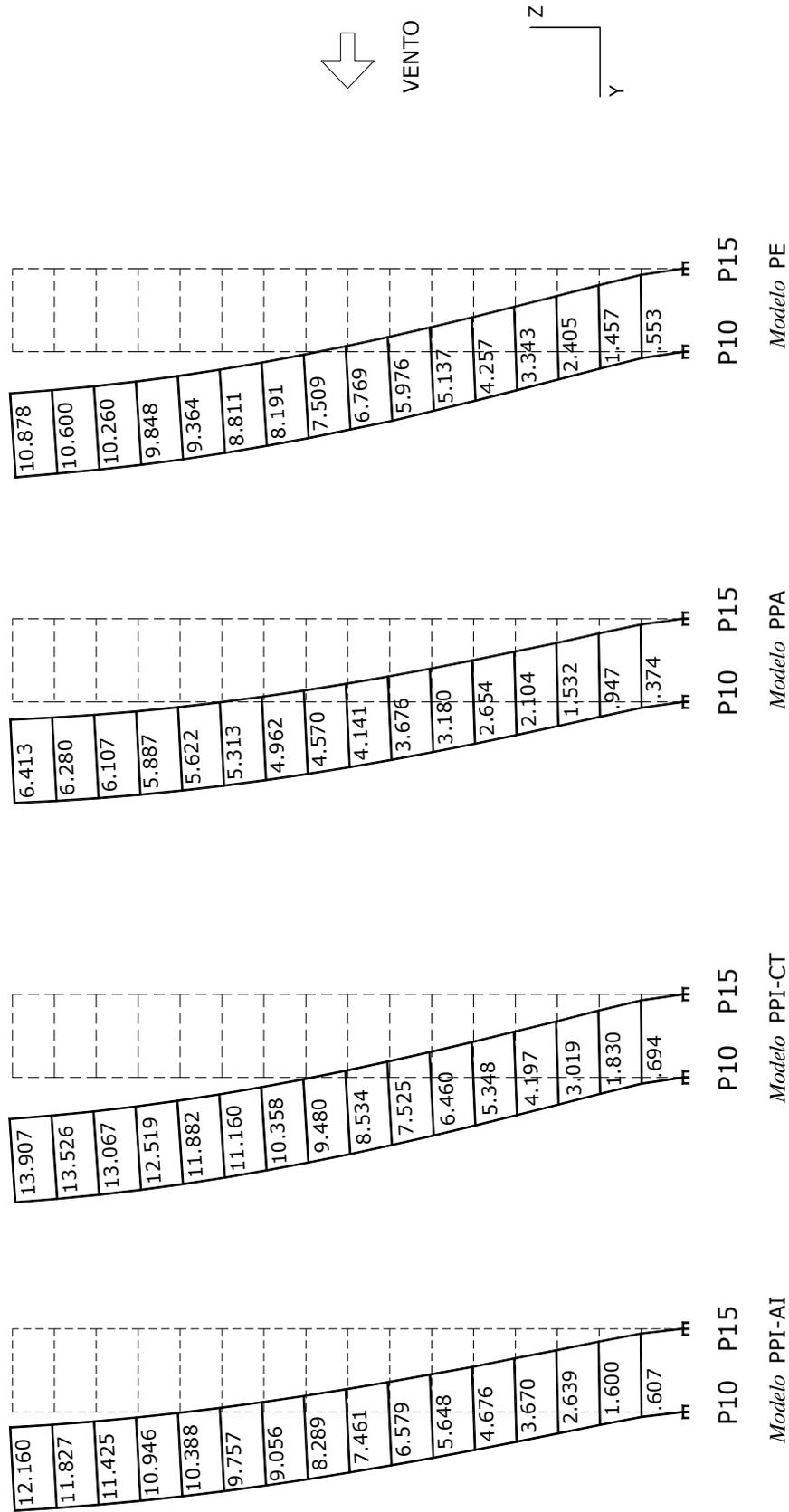


FIGURA 9.16 – Modelos do Pórtico 5 da Estrutura 4: deslocamentos Δ_{yz} no plano YZ (em cm).

Na TAB. 9.3 são apresentadas, para os Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5, as diferenças em porcentagem dos deslocamentos Δ_{yz} nos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE.

Os valores destas diferenças percentuais são obtidos através das FIG. 9.12, 9.13, 9.14, 9.15 e 9.16, utilizando-se a expressão (6.1).

Comparando as diferenças percentuais entre os deslocamentos Δ_{yz} dos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA e os do Modelo PE (TAB 9.3), observa-se que:

- a) no Pórtico 1, Modelo PPI-AI, os valores absolutos das diferenças percentuais variam entre 25% e 36% aproximadamente; o valor máximo de 36,49% ocorre no 16º andar;
- b) no Pórtico 1, Modelo PPI-CT, os módulos das diferenças percentuais variam entre 40% e 49% aproximadamente; o módulo máximo é de 48,90% no 16º andar;
- c) no Pórtico 1, Modelo PPA, as diferenças percentuais são da ordem de 30% na maioria dos andares (2º ao 13º) sendo o valor máximo de 30,18%, no 4º andar;
- d) no Pórtico 2, Modelo PPI-AI, as diferenças percentuais, em valor absoluto, variam de 11,76% a 23,49%; o valor máximo é da ordem de 23% e ocorre no 16º andar;
- e) no Pórtico 2, Modelo PPI-CT, os módulos das diferenças percentuais variam entre 4% e 16% aproximadamente; o módulo máximo também ocorre no 16º andar com valor de 16,27%;
- f) no Pórtico 2, Modelo PPA, as diferenças percentuais, em valor absoluto, são pequenas e alcançam valor máximo de 5,04%, no 1º andar;
- g) no Pórtico 3, Modelo PPI-AI, os módulos das diferenças percentuais são da ordem de 10% em todos os andares;
- h) no Pórtico 3, Modelo PPI-CT, as diferenças percentuais são da ordem de 9% em todos os andares;

TABELA 9.3 – Diferenças em % dos deslocamentos Δ_{yz} dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 da Estrutura 4.

ANDAR	$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 1			$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 2			$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 3			$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 4			$\Delta(\Delta_{yz})\%$ do Pórtico 5		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
16°	-36,49	-48,90	29,22	-23,49	-16,27	-0,19	-10,11	9,06	-14,92	67,74	20,73	-30,05	11,79	27,85	-41,05
15°	-36,03	-48,53	29,32	-22,99	-15,71	0,05	-10,13	9,04	-14,70	65,70	19,26	-29,77	11,58	27,60	-40,75
14°	-35,58	-48,17	29,43	-22,50	-15,18	0,26	-10,12	9,04	-14,46	63,72	17,84	-29,51	11,35	27,36	-40,48
13°	-35,15	-47,84	29,54	-22,04	-14,67	0,48	-10,13	9,03	-14,25	61,82	16,48	-29,25	11,15	27,12	-40,22
12°	-34,75	-47,52	29,62	-21,59	-14,20	0,68	-10,15	9,02	-14,04	59,99	15,16	-29,00	10,94	26,89	-39,96
11°	-34,34	-47,18	29,73	-21,15	-13,69	0,87	-10,16	9,00	-13,84	58,18	13,86	-28,74	10,74	26,66	-39,70
10°	-33,94	-46,86	29,79	-20,70	-13,20	1,10	-10,16	9,00	-13,61	56,38	12,56	-28,50	10,56	26,46	-39,42
9°	-33,49	-46,51	29,86	-20,21	-12,68	1,31	-10,17	9,00	-13,39	54,58	11,27	-28,21	10,39	26,25	-39,14
8°	-33,04	-46,12	29,97	-19,74	-12,14	1,54	-10,17	8,99	-13,14	52,76	9,95	-27,93	10,22	26,07	-38,82
7°	-32,57	-45,76	30,02	-19,19	-11,54	1,80	-10,13	9,02	-12,88	50,87	8,60	-27,60	10,09	25,92	-38,49
6°	-32,02	-45,32	30,10	-18,61	-10,91	2,05	-10,13	9,04	-12,58	48,90	7,18	-27,24	9,95	25,75	-38,10
5°	-31,37	-44,80	30,15	-17,97	-10,22	2,39	-10,11	9,08	-12,25	46,79	5,68	-26,81	9,84	25,63	-37,66
4°	-30,61	-44,22	30,18	-17,15	-9,33	2,78	-10,09	9,13	-11,85	44,47	3,99	-26,30	9,78	25,55	-37,06
3°	-29,54	-43,38	30,14	-16,17	-8,22	3,30	-10,12	9,13	-11,27	41,84	2,09	-25,53	9,73	25,53	-36,30
2°	-27,98	-41,98	30,04	-14,71	-6,59	4,06	-10,10	9,16	-10,39	38,52	-0,32	-24,40	9,81	25,60	-35,00
1°	-25,00	-39,73	28,42	-11,76	-3,92	5,04	-10,44	8,98	-8,98	34,10	-3,33	-22,04	9,76	25,50	-32,37

- i) no Pórtico 3, Modelo PPA, os módulos das diferenças percentuais variam entre 9% e 15% aproximadamente; o módulo máximo é de 14,92%, no 16º andar;
- j) no Pórtico 4, Modelo PPI-AI, as diferenças percentuais apresentam valores significativos que variam de 34% a 68%, aproximadamente; o valor máximo é de 67,74%, no 16º andar;
- k) no Pórtico 4, Modelo PPI-CT, as diferenças percentuais alcançam valor máximo da ordem de 21%, também no 16º andar;
- l) no Pórtico 4, Modelo PPA, os módulos das diferenças percentuais variam entre 22% e 30%, aproximadamente; o maior módulo é de 30,05% no 16º andar;
- m) no Pórtico 5, Modelo PPI-AI, as diferenças percentuais apresentam valores pequenos que não ultrapassam 12%;
- n) no Pórtico 5, Modelo PPI-CT, as diferenças percentuais variam de 26% a 28%, aproximadamente; o valor máximo é de 27,85%, no 16º andar;
- o) no Pórtico 5, Modelo PPA, os módulos das diferenças percentuais apresentam valores significativos que variam de 32% a 41% aproximadamente; o valor máximo é de 41,05%, também no 16º andar.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar os deslocamentos Δ_{yz} dos pórticos da Estrutura 4, pode-se afirmar que:

- a) o Modelo PPI-AI não fez uma boa avaliação dos deslocamentos Δ_{yz} nos Pórticos 1, 2 e 4 da Estrutura 4, onde os módulos das diferenças percentuais variam entre 12% e 68%, aproximadamente; note-se que para os Pórticos 3 e 5 este modelo apresenta bons resultados, por mera coincidência; a má avaliação observada neste modelo deve-se ao fato de que os pórticos são processados independentemente uns dos outros e o quinhão de carga para cada um deles é obtido simplesmente por área de influência, sem levar em consideração as rigidezes laterais de cada pórtico e seu comportamento conjunto;

b) o Modelo PPI-CT não fez uma boa avaliação dos deslocamentos Δ_{yz} nos Pórticos 1 e 5 da Estrutura 4, onde os módulos das diferenças percentuais variam entre 26% e 49% aproximadamente; note-se que para os Pórticos 2, 3 e 4 este modelo apresenta resultados razoáveis; as discrepâncias nos resultados devem-se, principalmente, ao fato de que no Modelo PPI-CT não há nenhuma interação transversal entre os diversos pórticos e, além disso, seu comportamento conjunto ocorre apenas no topo do edifício;

c) o Modelo PPA não avaliou adequadamente os deslocamentos laterais Δ_{yz} dos Pórticos 1, 4 e 5, já que os módulos das diferenças percentuais variam de 22,04% a 41,05%; observa-se que para os Pórticos 2 e 3 o modelo fez uma boa avaliação dos deslocamentos laterais Δ_{yz} onde os módulos não ultrapassam 15%; no Modelo PPA, as discrepâncias observadas nos resultados devem-se ao fato de que, como se constatou no exame da FIG. 9.6, este modelo não leva em consideração as rotações θ_z das lajes; conseqüentemente, a avaliação dos quinhões de carga nos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 é incorreta e, além disso, não é levada em conta a ação dos pórticos transversais à direção do vento.

9.3 – Momentos Fletores nos Pórticos

A FIG. 9.17 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigaamento do Pórtico 1 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 9.18 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigaamento do Pórtico 2 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 9.19 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigaamento do Pórtico 3 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 9.20 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigaamento do Pórtico 4 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

A FIG. 9.21 apresenta os diagramas dos momentos fletores M_x no vigaamento do Pórtico 5 nos Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE.

O exame da FIG. 9.17 mostra que os momentos fletores M_x no Pórtico 1 calculados com os Modelos PPI-AI, PPI-CT, PPA e PE divergem entre si. O mesmo pode-se dizer em relação ao Pórtico 2 (FIG. 9.18), Pórtico 3 (FIG. 9.19), Pórtico 4 (FIG. 9.20) e Pórtico 5 (FIG. 9.21).

Na TAB. 9.4 são apresentadas as diferenças em porcentagem dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5, calculadas comparando-se os Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA em relação ao Modelo PE.

Os valores destas diferenças são obtidos através das FIG. 9.17, 9.18, 9.19, 9.20 e 9.21, utilizando-se a expressão (6.1). Para os Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 são utilizados os valores dos momentos fletores nas prumadas P11 (FIG. 9.17), P12 (FIG. 9.18), P13 (FIG. 9.19), P14 (FIG. 9.20) e P15 (FIG. 9.21), respectivamente.

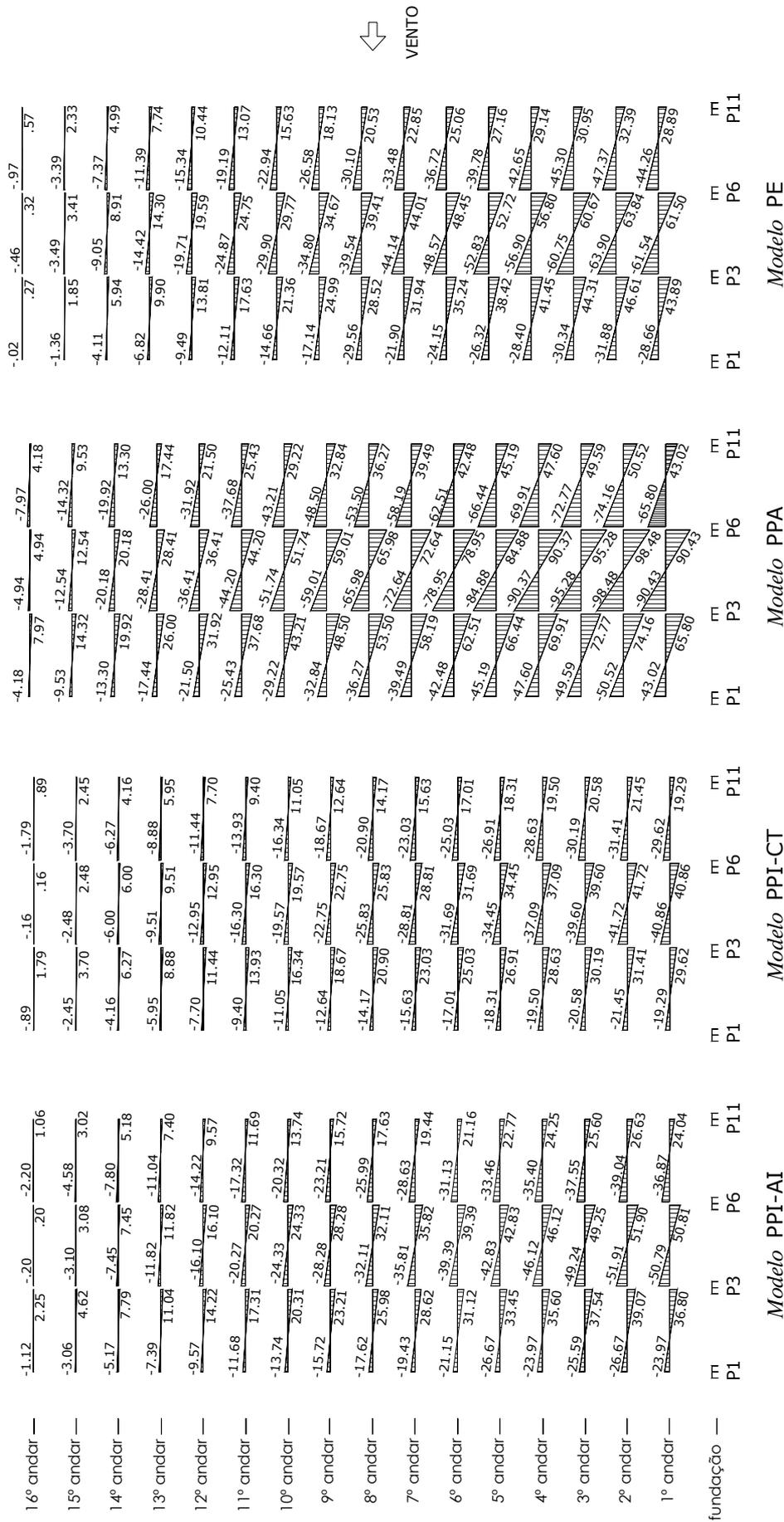


FIGURA 9.17 – Modelos do Pórtico 1 da Estrutura 4: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m).

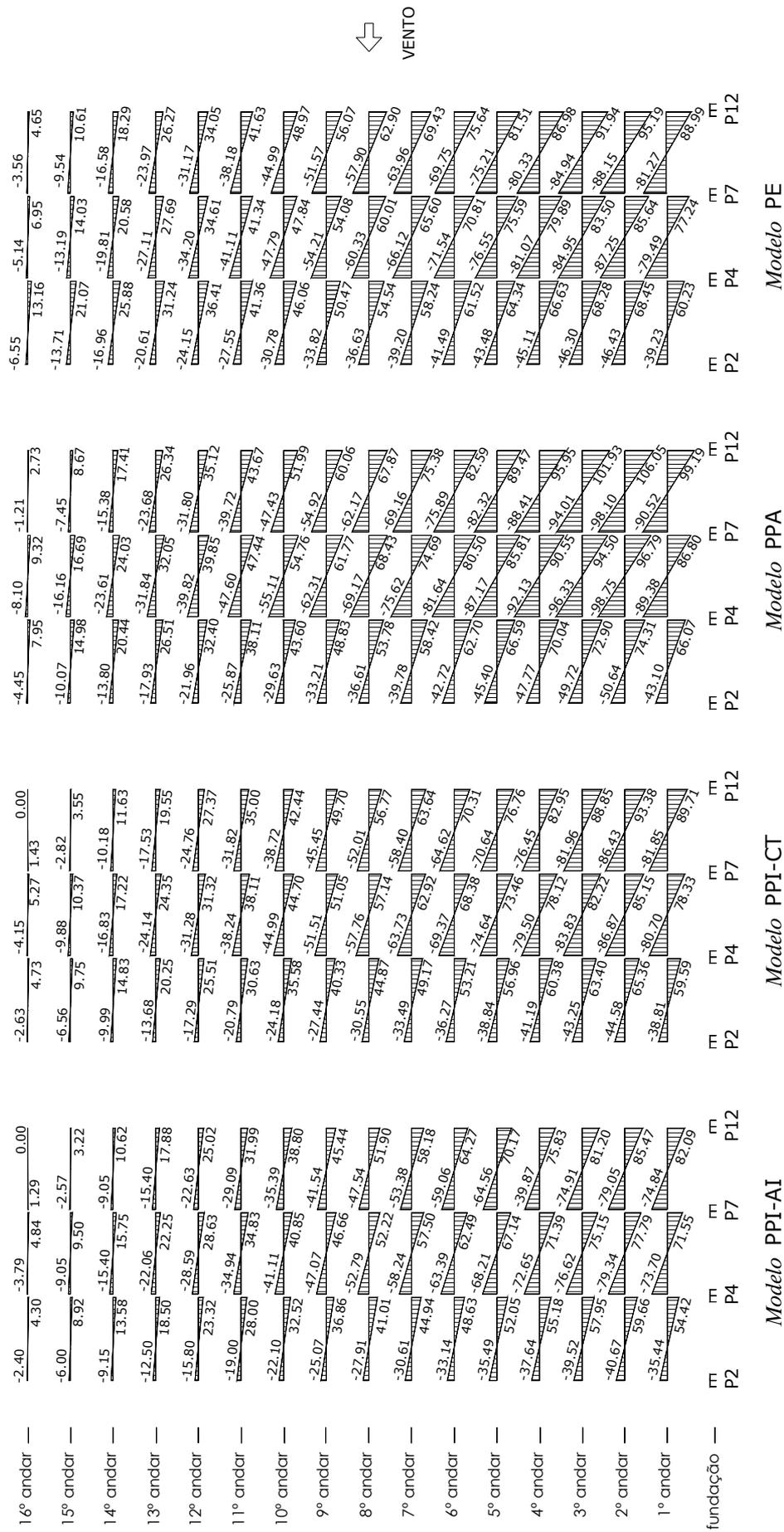


FIGURA 9.18– Modelos do Pórtico 2 da Estrutura 4: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m).

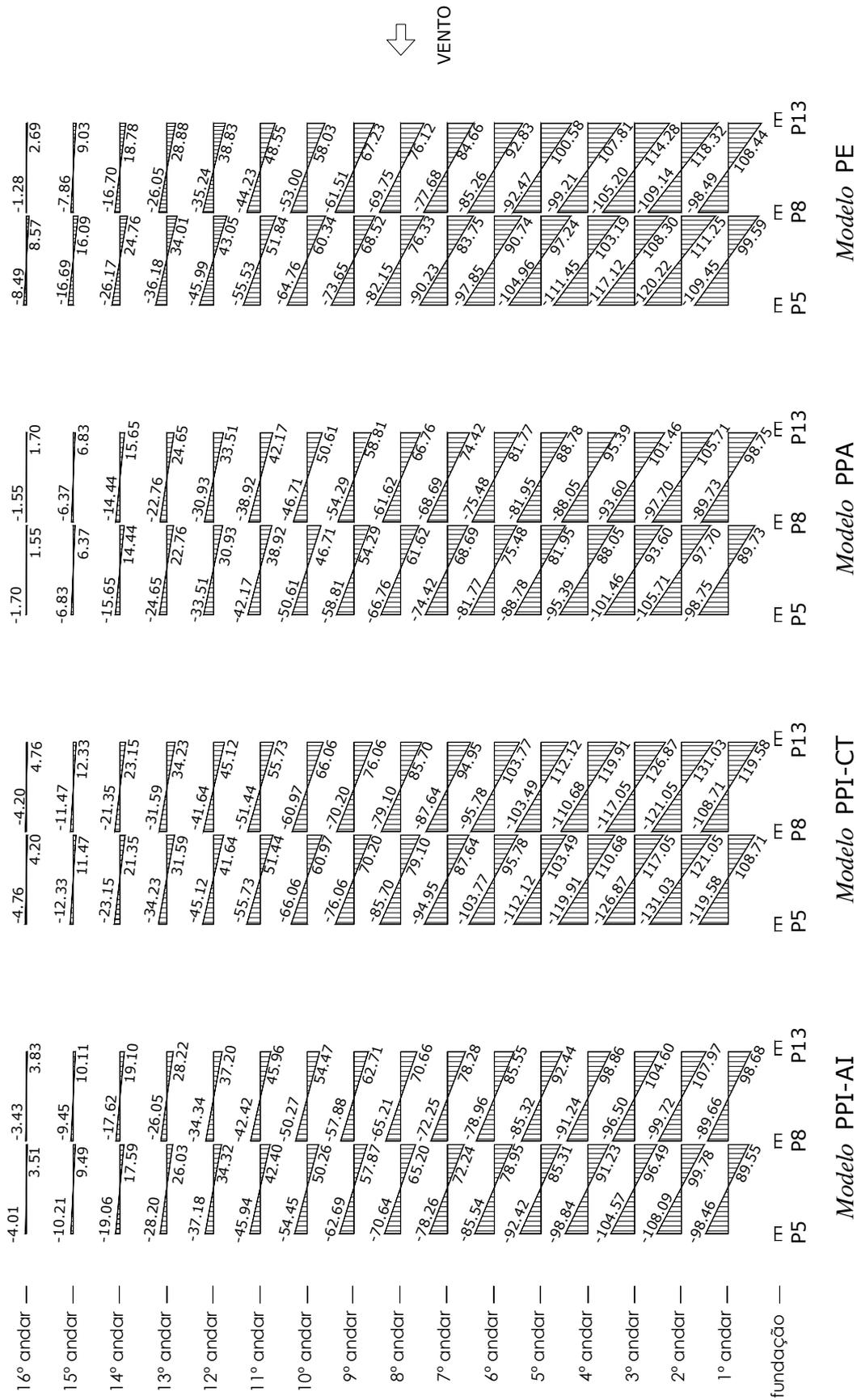


FIGURA 9.19– Modelos do Pórtico 3 da Estrutura 4: diagramas dos momentos fletores M_x no vigaento (em kN.m).

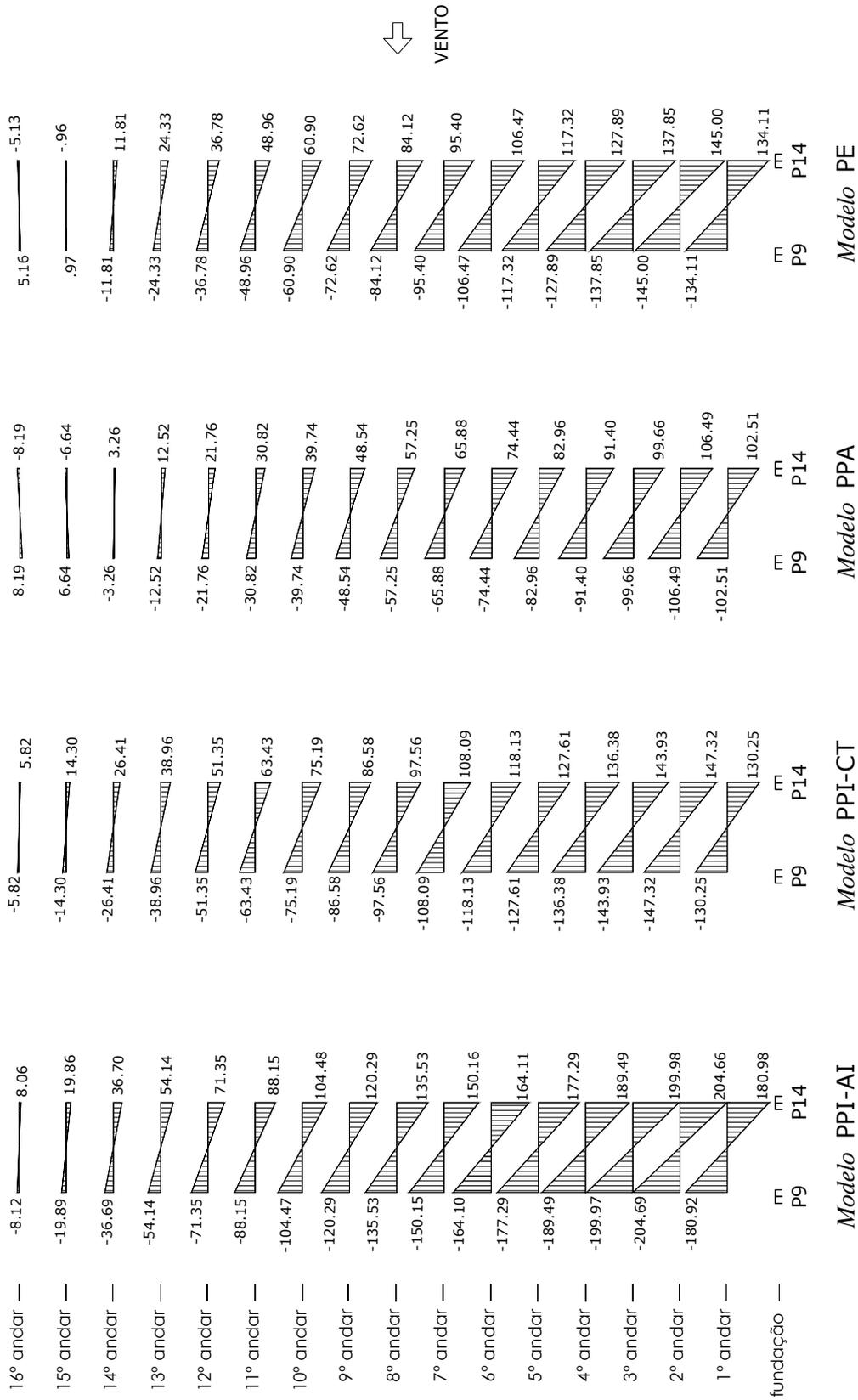


FIGURA 9.20– Modelos do Pórtico 4 da Estrutura 4: diagramas dos momentos fletores M_x no vigaento (em kN.m).

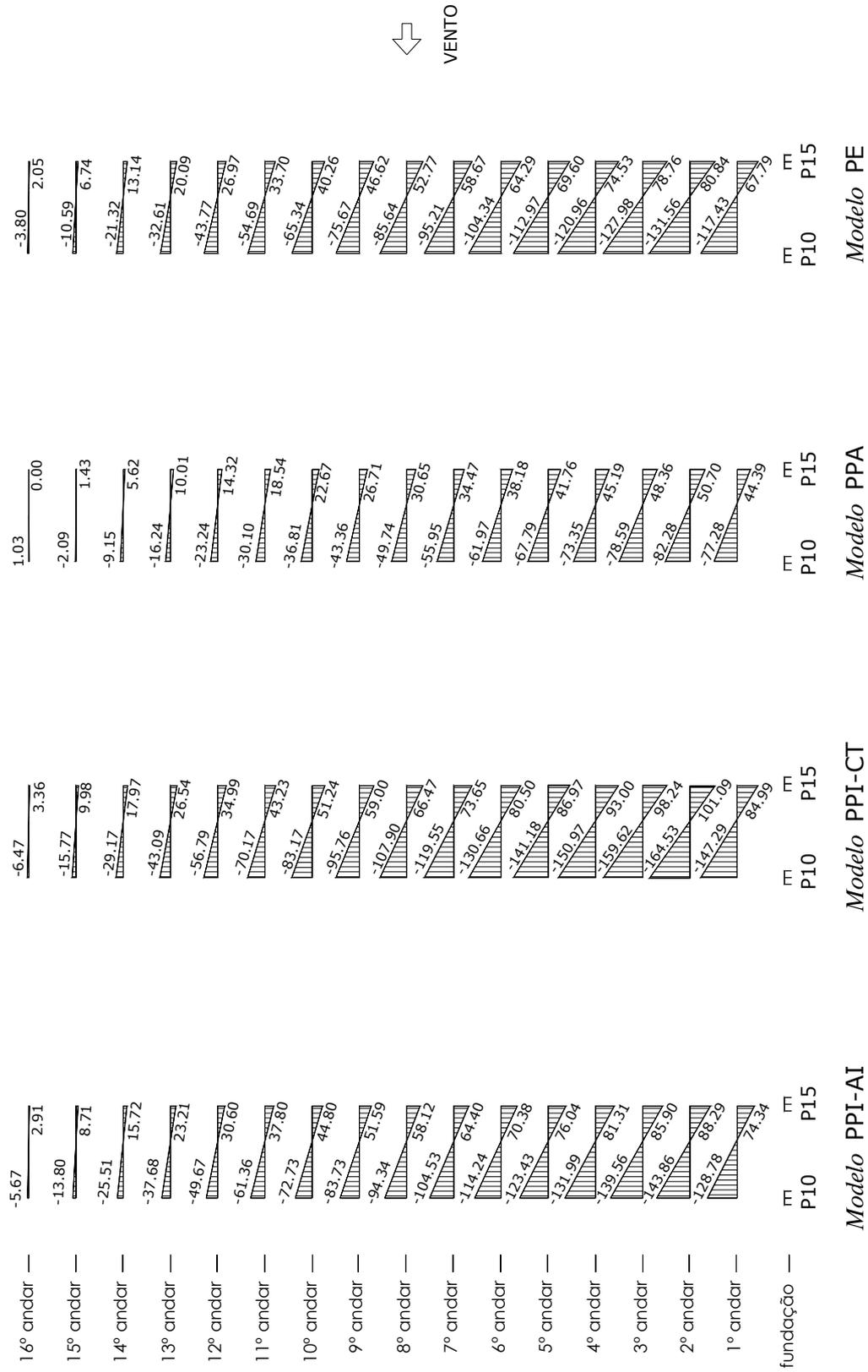


FIGURA 9.21 – Modelos do Pórtico 5 da Estrutura 4: diagramas dos momentos fletores M_x no vigamento (em kN.m).

TABELA 9.4 – Diferenças em % dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 da Estrutura 4.

ANDAR	$\Delta(M_x)\%$ do Pórtico 1			$\Delta(M_x)\%$ do Pórtico 2			$\Delta(M_x)\%$ do Pórtico 3			$\Delta(M_x)\%$ do Pórtico 4			$\Delta(M_x)\%$ do Pórtico 5		
	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA	PPI-AI	PPI-CT	PPA
16°	85,96	56,14	633,33	-100,00	-100,00	-41,29	42,38	76,95	-36,80	257,12	213,45	-59,65	41,95	63,90	-100,00
15°	29,61	5,15	309,01	-69,65	-66,54	-18,28	11,96	36,54	-24,36	2168,75	1589,58	-591,67	29,23	48,07	-78,78
14°	3,81	-16,63	166,53	-41,94	-36,41	-4,81	1,70	23,27	-16,67	210,75	123,62	-72,40	19,63	36,76	-57,23
13°	-4,39	-23,13	125,32	-31,94	-25,58	0,27	-2,29	18,52	-14,65	122,52	60,13	-48,54	15,53	32,11	-50,17
12°	-8,33	-26,25	105,94	-26,52	-19,62	3,14	-4,20	16,20	-13,70	93,99	39,61	-40,84	13,46	29,74	-46,90
11°	-10,56	-28,08	94,57	-23,16	-15,93	4,90	-5,33	14,79	-13,14	80,04	29,55	-37,05	12,17	28,28	-44,99
10°	-12,09	-29,30	86,95	-20,77	-13,33	6,17	-6,13	13,84	-12,79	71,56	23,46	-34,75	11,28	27,27	-43,69
9°	-13,29	-30,28	81,14	-18,96	-11,36	7,12	-6,72	13,13	-12,52	65,64	19,22	-33,16	10,66	26,56	-42,71
8°	-14,13	-30,98	76,67	-17,49	-9,75	7,90	-7,17	12,59	-12,30	61,12	15,98	-31,94	10,14	25,96	-41,92
7°	-14,92	-31,60	72,82	-16,20	-8,34	8,57	-7,54	12,15	-12,10	57,40	13,30	-30,94	9,77	25,53	-41,25
6°	-15,56	-32,12	69,51	-15,03	-7,05	9,19	-7,84	11,78	-11,91	54,14	10,95	-30,08	9,47	25,21	-40,61
5°	-16,16	-32,58	66,38	-13,91	-5,83	9,77	-8,09	11,47	-11,73	51,12	8,77	-29,29	9,25	24,96	-40,00
4°	-16,78	-33,08	63,35	-12,82	-4,63	10,31	-8,30	11,22	-11,52	48,17	6,64	-28,53	9,10	24,78	-39,37
3°	-17,29	-33,51	60,23	-11,68	-3,36	10,87	-8,47	11,02	-11,22	45,07	4,41	-27,70	9,07	24,73	-38,60
2°	-17,78	-33,78	55,97	-10,21	-1,90	11,41	-8,75	10,74	-10,66	41,14	1,60	-26,56	9,22	25,05	-37,28
1°	-16,79	-33,23	48,91	-7,75	0,81	11,46	-9,00	10,27	-8,94	34,95	-2,88	-23,56	9,66	25,37	-34,52

Comparando as diferenças percentuais dos momentos fletores M_x no vigamento dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 da Estrutura 4, observa-se que:

- a) no Pórtico 1, Modelo PPI-AI, os valores absolutos das diferenças percentuais variam entre 4% e 86%, aproximadamente; o valor máximo de 85,96% ocorre no 16º andar;
- b) no Pórtico 1, Modelo PPI-CT, os módulos das diferenças percentuais apresentam valores que variam entre 5,15% e 56,14%; o maior módulo é da ordem de 56%, no 16º andar;
- c) no Pórtico 1, Modelo PPA, são apresentadas diferenças percentuais bastante significativas que variam entre 48,91% e 633,33%; o maior módulo é da ordem de 633%, também no 16º andar;
- d) no Pórtico 2, Modelo PPI-AI, os módulos das diferenças percentuais apresentam valores que variam entre 7,75% e 100%; o maior módulo é de 100%, no 16º andar;
- e) no Pórtico 2, Modelo PPI-CT, as diferenças percentuais apresentam resultados, em valores absolutos, que variam de 0,9% a 100%; o maior módulo é de 100%, no 16º andar;
- f) no Pórtico 2, Modelo PPA, as diferenças percentuais apresentam valores absolutos pequenos que não ultrapassam 12%, exceto nos andares 15º e 16º, onde os valores são da ordem de 18% e 41%, respectivamente;
- g) no Pórtico 3, Modelo PPI-AI, os módulos das diferenças percentuais são pequenos e não ultrapassam 12%, exceto no 16º andar onde o módulo é de 42,38%;
- h) no Pórtico 3, Modelo PPI-CT, as diferenças percentuais variam entre 10% e 77%, aproximadamente; a diferença percentual máxima é de 76,95%, no 16º andar;
- i) no Pórtico 3, Modelo PPA, as diferenças percentuais apresentam valores absolutos que variam de 9% a 37% aproximadamente; o valor absoluto máximo é de 36,80%, também no 16º andar;

- j) no Pórtico 4, Modelo PPI-AI, as diferenças percentuais são bastante significativas e variam entre 34,95% e 2168,75%; o valor máximo é da ordem de 2169%, no 15º andar;
- k) no Pórtico 4, Modelo PPI-CT, os módulos das diferenças percentuais também são bastante significativos e variam entre 1,60% e 1589,58%; o valor máximo é da ordem de 1590%, no 15º andar;
- l) no Pórtico 4, Modelo PPA, são apresentadas diferenças percentuais, em valor absoluto, bastante significativas que variam de 23,56% a 591,67%; no 15º andar ocorre o maior valor absoluto da ordem de 592%;
- m) no Pórtico 5, Modelo PPI-AI, as diferenças percentuais são pequenas e não ultrapassam 16%, exceto nos andares 14º, 15º e 16º, onde os valores são da ordem de 20%, 29% e 42%, respectivamente;
- n) no Pórtico 5, Modelo PPI-CT, são apresentadas diferenças percentuais significativas, cujos valores variam de 25% a 64%, aproximadamente; a diferença percentual máxima é de 63,90%, no 16º andar;
- o) no Pórtico 5, Modelo PPA, os módulos das diferenças percentuais variam entre 34,52% e 100%; o módulo máximo de 100% ocorre no 16º andar.

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar os momentos fletores M_x no vigamento dos pórticos da Estrutura 4, pode-se afirmar que:

- a) o Modelo PPI-AI não fez uma boa avaliação dos momentos fletores M_x dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 da Estrutura 4, onde os módulos das diferenças percentuais variam entre 1,70% e 2169%, aproximadamente; a má avaliação observada neste modelo deve-se ao fato de que os pórticos são processados independentemente uns dos outros e o quinhão de carga para cada um deles é obtido simplesmente por área de influência, sem levar em consideração as rigidezes laterais de cada pórtico e seu comportamento conjunto;
- b) o Modelo PPI-CT não fez uma boa avaliação dos momentos fletores M_x dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 da Estrutura 4, onde os módulos das diferenças percentuais variam entre 0,9% a

1590%, aproximadamente; estas discrepâncias nos resultados devem-se, principalmente, ao fato de que no Modelo PPI-CT não há nenhuma interação transversal entre os diversos pórticos e, além disso, seu comportamento conjunto ocorre apenas no topo do edifício;

c) o Modelo PPA não avaliou adequadamente os momentos fletores M_x dos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 da Estrutura 4, já que os módulos das diferenças percentuais variam de 1% a 633%, aproximadamente; no Modelo PPA, as discrepâncias observadas nos resultados devem-se ao fato de que, como se constatou no exame da FIG. 9.6, este modelo não leva em consideração as rotações θ_z das lajes; conseqüentemente, a avaliação dos quinhões de carga nos Pórticos 1, 2, 3, 4 e 5 é incorreta e, além disso, não é levada em conta a ação dos pórticos transversais à direção do vento.

10

CONCLUSÕES

Neste trabalho, quatro estruturas distintas de edifícios de andares múltiplos foram analisadas através de quatro modelos estruturais para ação de forças laterais, de uso corrente nos escritórios de projeto, sendo três modelos planos e um modelo espacial. O modelo espacial foi tomado como referência, entre os quatro modelos utilizados, por ser o que mais se aproxima do real comportamento das estruturas.

A seguir, duas tabelas são apresentadas e descritas com o intuito de oferecer uma visão geral das análises realizadas neste trabalho.

A TAB. 10.1 foi construída reunindo-se os valores mínimos, médios e máximos dos módulos das diferenças percentuais das cargas nas fundações F_y , F_z e M_x , dos deslocamentos Δ_{yz} dos pórticos e pilares isolados e dos momentos fletores M_x no vigamento das Estruturas 1, 2, 3 e 4. Alguns resultados considerados espúrios, devido a pequenos valores de $|V_E|$ no denominador da expressão (6.1), foram expurgados desta tabela. Ressalta-se que para chegar a este resumo todas as tabelas relativas aos Modelos PPI-AI, PPI-CT e PPA foram examinadas.

A TAB. 10.2 foi construída a partir da TAB. 10.1 computando-se, inicialmente, em cada quadrinho, o valor M_{mm} igual à média dos valores médios dos módulos das diferenças

TABELA 10.1 – Resumo das diferenças percentuais mínimas, médias e máximas de módulos das grandezas avaliadas.

DIFERENÇAS PERCENTUAIS $\Delta(V)\%$ NO MODELO PPI-AI												
Grandezas Avaliadas	Estrutura 1			Estrutura 2			Estrutura 3			Estrutura 4		
	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.
F _y / fundação	2,8	4,3	6,9	24,3	55,1	100,0	58,8	498,8	794,2	5,1	11,6	27,8
F _z / fundação	0,0	3,9	8,9	0,0	59,2	100,0	22,7	78,9	111,5	0,7	34,9	99,9
M _x / fundação	2,2	3,6	6,5	22,4	52,7	100,0	50,1	427,3	629,8	5,8	12,1	31,0
Δ_{yz} / Pórtico 1	0,0	6,4	9,6	0,0	2,1	13,7	56,4	125,1	327,0	25,0	32,4	36,0
Δ_{yz} / Pórtico 2	0,4	2,9	4,8	10,4	12,7	16,5	82,2	145,3	325,5	11,8	19,1	23,0
Δ_{yz} / Pórtico 3	-	-	-	-	-	-	8,1	25,5	42,9	10,1	10,1	10,2
Δ_{yz} / Pórtico 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34,1	51,9	65,7
Δ_{yz} / Pórtico 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,8	10,4	11,6
Δ_{yz} / Pilar Isolado	-	-	-	100,0	100,0	100,0	-	-	-	-	-	-
M _x / Pórtico 1	0,8	11,6	32,5	0,3	8,1	21,6	3,3	60,7	206,0	3,8	14,1	29,6
M _x / Pórtico 2	0,4	4,2	13,4	2,1	3,7	12,5	32,7	79,9	239,0	7,8	22,5	69,7
M _x / Pórtico 3	-	-	-	-	-	-	45,8	60,0	68,7	1,7	6,9	12,0
M _x / Pórtico 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,0	86,3	257,1
M _x / Pórtico 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,1	12,5	29,2
DIFERENÇAS PERCENTUAIS $\Delta(V)\%$ NO MODELO PPI-CT												
Grandezas Avaliadas	Estrutura 1			Estrutura 2			Estrutura 3			Estrutura 4		
	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.
F _y / fundação	7,0	11,0	19,3	18,6	56,3	98,5	45,7	412,8	695,6	0,9	14,5	32,3
F _z / fundação	0,0	1,7	4,3	0,0	59,5	100,0	19,5	63,1	100,0	3,5	35,2	100,0
M _x / fundação	6,4	10,2	18,9	16,8	50,5	88,8	22,9	340,3	526,0	1,2	14,2	32,6
Δ_{yz} / Pórtico 1	0,4	4,1	11,6	10,9	13,3	26,4	41,9	104,2	287,4	39,7	45,6	48,5
Δ_{yz} / Pórtico 2	0,1	1,3	3,9	5,3	7,5	11,2	42,0	91,2	231,7	3,9	11,5	15,7
Δ_{yz} / Pórtico 3	-	-	-	-	-	-	0,6	16,8	38,0	9,0	9,0	9,1
Δ_{yz} / Pórtico 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	9,8	19,3
Δ_{yz} / Pórtico 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,5	26,3	27,6
Δ_{yz} / Pilar Isolado	-	-	-	1,1	40,5	78,8	-	-	-	-	-	-
M _x / Pórtico 1	0,1	5,5	24,7	1,3	6,1	27,0	4,2	51,6	177,6	5,2	28,0	33,8
M _x / Pórtico 2	0,2	2,0	8,5	0,4	2,5	8,3	3,4	50,4	164,3	0,8	15,4	66,5
M _x / Pórtico 3	-	-	-	-	-	-	16,2	38,3	51,7	10,3	15,2	36,5
M _x / Pórtico 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	38,2	213,5
M _x / Pórtico 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24,7	28,7	48,1
DIFERENÇAS PERCENTUAIS $\Delta(V)\%$ NO MODELO PPA												
Grandezas Avaliadas	Estrutura 1			Estrutura 2			Estrutura 3			Estrutura 4		
	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.
F _y / fundação	0,0	0,1	0,2	0,2	0,6	0,9	0,1	7,7	16,4	6,5	20,4	42,6
F _z / fundação	0,0	1,7	4,3	0,0	58,6	100,0	9,1	52,9	100,0	3,7	28,2	100,0
M _x / fundação	0,0	0,1	0,1	0,1	0,8	1,2	1,5	7,2	15,0	7,4	21,1	42,8
Δ_{yz} / Pórtico 1	0,0	0,1	0,2	1,3	4,8	8,7	9,0	22,3	26,6	28,4	29,7	30,2
Δ_{yz} / Pórtico 2	0,1	0,1	0,2	1,6	4,9	8,7	10,1	22,4	27,0	0,1	1,5	4,1
Δ_{yz} / Pórtico 3	-	-	-	-	-	-	8,5	22,1	26,9	9,0	12,8	14,7
Δ_{yz} / Pórtico 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22,0	27,4	29,8
Δ_{yz} / Pórtico 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32,4	38,2	40,8
Δ_{yz} / Pilar Isolado	-	-	-	1,0	4,7	8,7	-	-	-	-	-	-
M _x / Pórtico 1	0,1	2,7	11,7	0,7	8,1	35,5	16,7	28,0	40,0	48,9	98,9	309,0
M _x / Pórtico 2	0,2	2,5	12,8	0,3	3,8	17,8	17,8	30,0	42,5	0,3	8,3	18,3
M _x / Pórtico 3	-	-	-	-	-	-	18,9	46,2	88,3	8,9	13,2	24,4
M _x / Pórtico 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23,6	37,0	72,4
M _x / Pórtico 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34,5	45,2	78,8

TABELA 10.2 – Conceitos atribuídos aos modelos planos.

MODELO PPI-AI				
Grandezas Avaliadas	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 4
F_y / fundação F_z / fundação M_x / fundação	A*	E	E	B*
Δ_{yz} / Pórtico 1 Δ_{yz} / Pórtico 2 Δ_{yz} / Pórtico 3 Δ_{yz} / Pórtico 4 Δ_{yz} / Pórtico 5 Δ_{yz} / Pilar Isol.	A*	D*	E	C*
M_x / Pórtico 1 M_x / Pórtico 2 M_x / Pórtico 3 M_x / Pórtico 4 M_x / Pórtico 5	A*	A*	E	C*
MODELO PPI-CT				
Grandezas Avaliadas	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 4
F_y / fundação F_z / fundação M_x / fundação	A	E	E	C
Δ_{yz} / Pórtico 1 Δ_{yz} / Pórtico 2 Δ_{yz} / Pórtico 3 Δ_{yz} / Pórtico 4 Δ_{yz} / Pórtico 5 Δ_{yz} / Pilar Isol.	A	C	E	C
M_x / Pórtico 1 M_x / Pórtico 2 M_x / Pórtico 3 M_x / Pórtico 4 M_x / Pórtico 5	A	A	E	C
MODELO PPA				
Grandezas Avaliadas	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 4
F_y / fundação F_z / fundação M_x / fundação	A	B	C	C
Δ_{yz} / Pórtico 1 Δ_{yz} / Pórtico 2 Δ_{yz} / Pórtico 3 Δ_{yz} / Pórtico 4 Δ_{yz} / Pórtico 5 Δ_{yz} / Pilar Isol.	A	A	C	C
M_x / Pórtico 1 M_x / Pórtico 2 M_x / Pórtico 3 M_x / Pórtico 4 M_x / Pórtico 5	A	A	D	E

* conceitos não confiáveis.

percentuais. Em seguida foram atribuídos conceitos para a capacidade de avaliação dos modelos, em função dos valores M_{mm} , respeitando-se as seguintes faixas:

CONCEITOS	FAIXAS DE VALORES
A	$0\% \leq M_{mm} \leq 10\%$
B	$10\% < M_{mm} \leq 20\%$
C	$20\% < M_{mm} \leq 30\%$
D	$30\% < M_{mm} \leq 40\%$
E	$40\% < M_{mm}$

Em relação à capacidade dos modelos de avaliar as diversas grandezas listadas na TAB. 10.2, pode-se afirmar o seguinte:

a) o Modelo PPI-AI, como já se disse diversas vezes ao longo do texto, não é um modelo confiável porque baseia-se em critérios geométricos para determinar o carregamento em cada painel vertical enrijecido. Portanto, os conceitos mostrados na TAB. 10.2 devem, até certo ponto, ser vistos com reserva;

b) o Modelo PPI-CT mostrou-se melhor que o Modelo PPI-AI nos casos das Estruturas 1, 2 e 4; todavia, no caso da Estrutura 3 o Modelo PPI-CT foi incapaz de fazer uma avaliação adequada;

c) o Modelo PPA, entre os modelos planos, foi o que fez as melhores avaliações no caso das Estruturas 1, 2 e 3; no caso da Estrutura 4, ficou clara sua incapacidade de lidar com estruturas fortemente assimétricas; neste caso o Modelo PPA foi inferior ao Modelo PPI-CT.

Através do exame das TAB. 10.1 e 10.2 pode-se, ainda, afirmar que:

a) melhor avaliação da Estrutura 1 foi feita pelo Modelo PPA e a pior pelo Modelo PPI-AI;

b) melhor avaliação da Estrutura 2 foi feita pelo Modelo PPA e a pior pelo Modelo PPI-AI;

c) melhor avaliação da Estrutura 3 foi feita pelo Modelo PPA e a pior pelo Modelo PPI-AI;

d) melhor avaliação da Estrutura 4 foi feita pelo Modelo PPI-CT e a pior pelo Modelo PPI-AI.

Em função dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se fazer os seguintes comentários finais sobre os modelos planos apresentados:

a) pelas razões já expostas, o uso do Modelo PPI-AI deve ser limitado a avaliações expeditas e apenas para os casos de estruturas simples e simétricas, como ocorre na Estrutura 1; mesmo assim é necessário que as rigidezes laterais dos painéis verticais sejam proporcionais ao quinhão de carga de cada um deles; como se vê na TAB. 10.2 o Modelo PPI-AI obteve quatro conceitos A*, um conceito B*, dois conceitos C*, um conceito D* e quatro conceitos E; estes conceitos confirmam que o Modelo PPI-AI é o pior dos três modelos planos e não deve ser utilizado em projetos finais;

b) o Modelo PPI-CT mostrou-se superior ao Modelo PPI-AI; ele obteve quatro conceitos A, quatro conceitos C e quatro conceitos E; apesar de ser um modelo ainda utilizado em escritórios de cálculo, os quatro conceitos C e os quatro conceitos E mostram claramente que o Modelo PPI-CT não deve ser utilizado indiscriminadamente em projetos finais; seu uso deve ser restrito aos casos em que o projetista de estruturas sabe antecipadamente, por experiência passada, que os resultados com ele obtidos são da mesma ordem de grandeza dos obtidos com o Modelo PE;

c) o Modelo PPA mostrou-se superior ao Modelo PPI-CT, exceto no caso da Estrutura 4; a ele foram atribuídos cinco conceitos A, um conceito B, quatro conceitos C, um conceito D e um conceito E; este é um modelo de uso corrente nos escritórios de cálculo; todavia, os conceitos a ele atribuídos mostram ser necessário, assim como no Modelo PPI-CT, limitar seu uso em projetos finais; por exemplo, os dois conceitos C e um conceito E obtidos na Estrutura 4 mostram claramente que o Modelo PPA não deve ser utilizado em estruturas assimétricas; da mesma forma os dois conceitos C e um conceito D obtidos na Estrutura 3 mostram que mesmo em estruturas simétricas o Modelo PPA poderá levar a resultados inadmissíveis; portanto, o seu uso também deve ser limitado aos casos em que o projetista de estruturas sabe antecipadamente, pela experiência passada, que os resultados com ele obtidos são da mesma ordem de grandeza que os resultados obtidos com o Modelo PE.

BIBLIOGRAFIA

AÇOMINAS – SIDERBRÁS, *Edifícios de Andares Múltiplos*. Aço Minas Gerais S. A. – Belo Horizonte, 1979.

ASSIS, V. M. de. *Análise de Edifícios de Andares Múltiplos com Estrutura Metálica*. Mestrado em Estruturas – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001. 133 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 6118 – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado*. Rio de Janeiro, 1980. 76 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 6123– Forças Devidas ao Vento em Edificações*. Rio de Janeiro, 1988. 110 p.

CÂMARA JÚNIOR, V. F. *Análise dos Esforços em Edifícios Altos*. Dissertação de Mestrado – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1978. 196 p.

CIFÚ, S.; GODOY, M. A. P. de.; BELLA, J. C. D.; SERRANO, G. de O. *Recomendações e Cuidados na Modelagem e Interpretação de Resultados de Estruturas Analisadas a partir de Modelos Matemáticos com base no M. E. F.* In: 42º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza, Ceará, 2000.

CORRÊA, M. R. S. *Aperfeiçoamento de Modelo Usualmente Empregado no Projeto de Sistemas Estruturais de Edifícios*. Tese de Doutorado – EESC/USP. São Paulo, 1991. 331 p.

DAVENPORT, A. G. *Past, Present and Future of Wind Engineering*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002. v. 90, p. 1371-1380.

ENGEL, H. *Sistemas de Estruturas*. 4ª edição. São Paulo: Hemus, 1981. 146 p.

FINTEL, M. *Handbook of Concrete Engineering*. 1ª edição. Chicago: Van Nostrand Reinhold Company, 1974. 801 p.

FONTE, A. O. C. da. *Análise Não-Linear Geométrica de Edifícios Altos*. Tese de Doutorado – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992. 223 p.

FONTE, A. O. C. da. *Curso de Atualização em Edifícios Altos*. Recife. Universidade Federal de Pernambuco, 1994. 210 p. Apostila.

FRANCO, M.; ISYUMOV, N. *Overview of Procedures for Evaluating the Effect of Wind on Tall Buildings*. In: II International Conference on High Technology Buildings, São Paulo, 1997. p. 1-10. Artigo.

FRANCO, M. *Three Tall Buildings in Sao Paulo, Brazil*. Structural Engineering International. 1999. p. 25-26.

FUSCO, P. B. *Estruturas de Concreto*. 1ª edição. São Paulo: McGRAW-HILL, 1976. 298 p.

GERE, J. M.; WEAVER JR., W. *Matrix Analysis of Framed Structures*. 3ª edição. New York: Van Nostrand, 1990. 546 p.

KHAN, F. R. *The Future of High-Rise Structures*. Progressive Architecture, October, 1972.

KHAN, F. R. *Tubular Structures for Tall Buildings* In: Fintel, M. *Handbook of Concrete Engineering*. 1ª edição. Chicago: Van Nostrand Reinhold Company, 1974. Capítulo 11, p. 345 – 355.

KRIPKA, M. de. *Análise Incremental Construtiva de Edificações*. Dissertação de Mestrado – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990. 129 p.

LARANJEIRAS, A. C. R. *Garantia de Qualidade dos Projetos*, In: III Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 1993. p.49-61.

LIN, T. Y.; STOTESBURY, S. D. *Structural Concepts and Systems for Architects and Engineers*. New York: John Wiley, 1981. 549 p.

PEREZ, G. B. *Análise Comparativa de Modelos do Sistema Estrutural de um Edifício de Andares Múltiplos*. Mestrado em Estruturas – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999. 406 p.

SANTOS FILHO, G. *Análise Tridimensional de Estruturas de Edifícios*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1970.

STAFFORD SMITH, B. S.; COULL, A. *Tall Building Structures: Analysis and Design*. 1ª edição. New York: John Wiley, 1991. 537 p.

SORIANO, H. L.; FONTE, A. C. *Computação de Efeito Construtivo Incremental em Edifícios Altos*. In: Congresso Íbero-Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia, Porto, 1989. [s.n].

SORIANO, H. L. *Análise de Esforços em Estruturas de Edifícios Altos*. In: Conferência, Clube dos Engenheiros. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 1983. 40 p.

STAMATO, M. C. *Distribuição das Cargas do Vento entre Painéis de Contraventamento*. 2ª edição. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 1971. 30 p. Publicação nº 1311.

STAMATO, M. C. *Estado Atual da Análise de Estruturas Tridimensionais de Edifícios Altos*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 1972. 28 p. Publicação nº 163.

STAMATO, M. C.; STAFFORD-SMITH, B. *Análise Aproximada de Estruturas Tridimensionais de Edifícios Elevados*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 1968. 23 p. Publicação nº 155.

SUSSEKIND, J. C. *Curso de Concreto*. Rio de Janeiro: Globo, 1984. 280 p. vol. II.

TARANATH, B. S. *Structural Analysis and Design of Tall Buildings*. New York: McGraw – Hill, 1988. 739 p.

TQS INFORMÁTICA, CAD/Formas. *Entrada Gráfica de Formas*. versão 8.0. São Paulo, SP, 1997.

TQS INFORMÁTICA, CAD/Formas. *Interface e Processamento de Pórticos Espaciais*. versão 8.0. São Paulo, SP, 1997.

TQS INFORMÁTICA, CAD/Formas. *Manual do Usuário*. versão 8.0. São Paulo, 1997.

VASCONCELLOS FILHO, A. *Edifícios de Andares Múltiplos*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1981. 148 p. Tese (Concurso de Professor Titular).

VASCONCELLOS FILHO, A. *Teoria das Estruturas*. 1ª edição. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1986. 457 p.

VASCONCELLOS FILHO, A. *Técnicas Aproximadas de Análise de Edifícios Altos*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2001. Notas de Aula.