

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Dayene Cardoso de Siqueira

Avaliação dos Efeitos de 2ª Ordem em Pórticos Planos de Aço Considerando Apoios  
Teóricos e Interação Solo-Estrutura

*Second-order Analysis in Plane Steel Frames Considering Theoretical Supports  
and the Soil-Structure Interaction*

Belo Horizonte

2019

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE 2ª ORDEM EM PÓRTICOS PLANOS DE AÇO  
CONSIDERANDO APOIOS TEÓRICOS E INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Dayene Cardoso de Siqueira

Orientadora: Profa. Dra. Renata Gomes Lanna da Silva  
Co-Orientador: Prof. Dr. Thiago Luiz Coelho Morandini

Belo Horizonte

2019

S618a Siqueira, Dayene Cardoso de  
Avaliação dos efeitos de 2ª ordem em pórticos planos de aço considerando apoios teóricos e interação solo-estrutura / Dayene Cardoso de Siqueira. – 2019.  
146 f. : il., gráfs, tabs.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.

Orientadora: Renata Gomes Lanna da Silva.

Coorientador: Thiago Luiz Coelho Morandini.

Bibliografia: f. 91-93.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Pórticos estruturais – Teses. 2. Análise elástica (Engenharia) – Teses. 3. Interação solo-estrutura – Teses. I. Silva, Renata Gomes Lanna da. II. Morandini, Thiago Luiz Coelho. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 624.1821

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus sem a necessidade de justificativas!!

À Professora Dra. Renata Lanna que, por empatia, respeitou e me ajudou nos meus limites de prazos quando precisei pausar o trabalho em um dos momentos mais felizes e conturbados da minha vida, o nascimento de Catarina, tão amada e desejada.

Ao Professor Dr. Thiago Morandini, cuja colaboração na orientação do meu trabalho foi essencial, tendo em vista seu caráter multidisciplinar.

Ao CEFET-MG, que preza pela qualidade dos trabalhos desenvolvidos pelos seus alunos, através da dedicação do professores e coordenadores no ensino e orientação. Trabalho exaustivo na busca pela evolução da pesquisa no Brasil que, por muitas vezes, é pouco valorizado pelos governantes e pouco conhecido pela população.

A todos da LD Engenharia Ltda, que de forma direta ou indireta, contribuíram no desenvolvimento dessa pesquisa, em especial, ao estagiário e estudante de engenharia civil na UFMG, Rafael Christo, que teve participação direta na pesquisa e contribuiu com sua boa energia no desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos sempre presentes, em especial à Nana que, com sua grande experiência como professora doutora da Escola de Enfermagem da UFMG, me ajudou com incentivos e com ações na apresentação dessa pesquisa.

À minha amada família, que supriram minha filha com muito amor e cuidado em todas as minhas ausências durante o período de finalização desse projeto. A eles meu muito obrigada: minha mãe Rosana, meu quase pai Marcinho e minha sogra Anny.

E o que dizer do meu esposo? Leonardo é parte de tudo de bom que acontece na minha vida e corresponsável pelo meu crescimento pessoal e profissional, com sua visão empreendedora e grande incentivador do estudo que, por vezes, acredita mais em mim e no meu potencial do que eu mesma.

*“Só sei que nada sei por completo  
Só sei que nada sei que só eu saiba  
Só sei que nada sei que eu não possa vir a saber  
Só sei que nada sei que outra pessoa não saiba  
Só sei que nada sei que eu e outra pessoa não saibamos juntos”.*

*“Cuidado com gente que não tem dúvida. Gente que não tem  
dúvida não é capaz de inovar, de reinventar, não é capaz de  
fazer de outro modo. Gente que não tem dúvida só é capaz de  
repetir”.*

Mário Sérgio Cortella

## RESUMO

Tradicionalmente, na análise estrutural a hipótese de apoios indeslocáveis é utilizada devido a sua simplicidade. Entretanto, o projeto convencional no qual os deslocamentos dos elementos de fundação são desconsiderados, pode conduzir a resultados físicos incompatíveis com a realidade. Com o desenvolvimento de microcomputadores e de programas computacionais, já é possível realizar análises mais rigorosas, que levam em consideração a rigidez do solo junto às fundações. Os objetivos principais do presente trabalho são analisar a influência da consideração da interação solo-estrutura (ISE) sobre os elementos estruturais de aço quando da análise considerando a não linearidade geométrica e avaliar a diferença entre os tipos de procedimentos para a consideração da rigidez do solo na análise, que podem ser considerados pela substituição do solo por molas ou pela modelagem de um meio contínuo em elementos finitos. Os modelos de mola adotados são baseados nas teorias de Winkler e de Pasternak e, também considerando uma malha de molas contínuas. As análises foram realizadas com o auxílio do software comercial SAP2000. Modelagens de pórticos planos considerando apoios convencionais e levando-se em conta a interação solo-estrutura foram abordadas. Três pórticos com as mesmas características, porém com o número de pavimentos diferentes foram analisados, mostrando a influência do aumento da altura e da rigidez da edificação nos resultados da ISE. Foi demonstrado que a consideração dos efeitos da interação solo-estrutura na análise estrutural de edificações pode ter influência significativa na distribuição dos esforços solicitantes, nos deslocamentos e no comportamento da estrutura. O comportamento dos pórticos de aço pode ser afetado pelo tipo de apoio adotado e variando-se o tipo de modelagem para a consideração da deformação do solo. A utilização de modelos mais simplificados em comparação com modelos mais elaborados alteram os resultados da análise estrutural.

Palavras-chave: Análise em 2ª ordem, Pórticos Planos de Aço, Interação Solo-Estrutura (ISE)

## **ABSTRACT**

Traditionally, structural analysis is based on the hypothesis of indeslocables due to its simplicity. However, the conventional project design in which displacements of foundation elements are disregarded, can lead to physical results incompatible with reality. With the development of microcomputers and computer programs, it is already possible to perform more rigorous analyzes, which take into account the rigidity of the soil near the foundations. The main objectives of the present work are to analyze the influence of the consideration of soil-structure interaction (ISE) on steel structural elements when considering the geometric nonlinearity and to evaluate the difference between the types of procedures for the consideration of soil stiffness. in the analysis, which can be considered by replacing the soil by springs or by modeling a continuous finite element medium. The spring models adopted are based on the Winkler and Pasternak theories and also considering a continuous spring mesh. The analyzes were performed with the help of commercial software SAP2000. Flat gantry modeling considering conventional supports and taking into account the soil-structure interaction were approached. Three frames with the same characteristics, but with the number of different floors were analyzed, showing the influence of the height increase and the stiffness of the building in the ISE results. It has been shown that consideration of the effects of soil-structure interaction on structural analysis of buildings can have a significant influence on the distribution of stresses, displacements and structure behavior. The behavior of steel frames can be affected by the type of support adopted and by varying the type of modeling to consider soil deformation. Using simpler models compared to more elaborate models alters the results of structural analysis.

Key words: Second order analysis, Plane Steel Frames, Soil-Structure Interaction (ISE)

## **LISTA DE FIGURAS**

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Contribuição de diferentes estruturas na rigidez do conjunto .....                                                                     | 8  |
| Figura 2 - Conjunto constituído por (a) fundação e superestrutura e (b) por fundação e viga<br>equivalente .....                                  | 9  |
| Figura 3 - Modelo de Winkler (a) Pressões de contato proporcionais ao recalque e (b) Carga Normal<br>proporcional ao recalque .....               | 10 |
| Figura 4 - Elementos de placa sobre apoio elástico .....                                                                                          | 10 |
| Figura 5 - Modelo de Filonenko-Borodich .....                                                                                                     | 17 |
| Figura 6 - Modelo de Hetenyi .....                                                                                                                | 17 |
| Figura 7 - Modelo de Pasternak .....                                                                                                              | 18 |
| Figura 8 - Modelo de Kerr .....                                                                                                                   | 18 |
| Figura 9 - Modelo de Viga-Coluna .....                                                                                                            | 19 |
| Figura 10 - Novo Modelo Contínuo de Winkler - 2001 .....                                                                                          | 19 |
| Figura 11 - Modelo do Meio Contínuo: elástico (a) e elastoplástico (b) .....                                                                      | 21 |
| Figura 12 - Elementos de placa sobre elementos sólidos .....                                                                                      | 22 |
| Figura 13 - Bulbo de tensões baseado na equação de Boussinesq .....                                                                               | 25 |
| Figura 14 - Efeito P-Delta na estrutura .....                                                                                                     | 29 |
| Figura 15 – Efeito N-deltinha na barra .....                                                                                                      | 29 |
| Figura 16 - Tipos de Análise .....                                                                                                                | 31 |
| Figura 17 - Efeitos P-Delta .....                                                                                                                 | 33 |
| Figura 18 - Tipos de Apoios para os pórticos .....                                                                                                | 35 |
| Figura 19 - Pórticos Planos de Aço com três alturas diferentes (a) 4 andares (b) 7 andares e (c) 11<br>andares .....                              | 36 |
| Figura 20 - Numeração das barras e nós para os pórticos de 2 vãos não contraventados (a) 4 andares<br>(b) 7 andares (c) 11 andares .....          | 39 |
| Figura 21 - Carregamento de cálculo para os pórticos de (a) 4 andares, (b) 7 andares e (c) 11<br>andares - dois vãos .....                        | 40 |
| Figura 22 - Sistema de coordenadas locais dos elementos de barra do SAP2000 .....                                                                 | 41 |
| Figura 23 - Sistema de coordenadas locais dos elementos de placa do SAP2000 .....                                                                 | 42 |
| Figura 24 - Sistema de coordenadas locais dos elementos sólidos do SAP2000 .....                                                                  | 43 |
| Figura 25 – Pórtico com apoio teórico – Modelo extraído do software SAP2000 .....                                                                 | 44 |
| Figura 26 – Boletim de Sondagem .....                                                                                                             | 45 |
| Figura 27 - Reações de Apoio para o pórtico de 11 Pavimentos .....                                                                                | 47 |
| Figura 28 – Pórtico com apoio do tipo Molas de Winkler – Modelo extraído do software SAP2000 .....                                                | 49 |
| Figura 29 – Pórtico com apoio do tipo Pasternak – Modelo extraído do software SAP2000 .....                                                       | 51 |
| Figura 30 – Pórtico com apoio do tipo Meio Contínuo – Modelo extraído do software SAP2000 .....                                                   | 53 |
| Figura 31 – Representação do Cubo de Molas (a) indeformado, (b) deformado sob carregamento<br>axial e (c) sistema de eixos no cubo de molas ..... | 54 |
| Figura 32 - Pórtico com apoio por Malha de Molas – Modelo extraído do software SAP2000 .....                                                      | 55 |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 33 - Bulbo de Tensões - Pórtico de 11 pavimentos.....                                | 57  |
| Figura 34 - Deformação - Modelo MC.....                                                     | 59  |
| Figura 35- Deformação - Modelo MM .....                                                     | 59  |
| Figura 36 - Deformação - Modelo P.....                                                      | 60  |
| Figura 37 - Deformação - Modelo W .....                                                     | 60  |
| Figura 38 - Diagramas de Força Normal (kN) nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos.....        | 101 |
| Figura 39 - Diagramas de Força Normal (kN) nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos.....        | 102 |
| Figura 40 - Diagramas de Força Normal (kN) nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos.....       | 105 |
| Figura 41 - Diagramas de Força Normal (kN) nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos.....      | 108 |
| Figura 42 - Diagramas de Força Normal (kN) nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos.....      | 110 |
| Figura 43 - Diagramas de Força Normal (kN) nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos.....     | 113 |
| Figura 44 - Diagramas de Força Cortante (kN) nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos .....     | 116 |
| Figura 45 - Diagramas de Força Cortante (kN) nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos .....     | 118 |
| Figura 46 - Diagramas de Força Cortante (kN) nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos .....    | 121 |
| Figura 47 - Diagramas de Força Cortante (kN) nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos .....   | 124 |
| Figura 48 - Diagramas de Força Cortante (kN) nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos .....   | 126 |
| Figura 49 - Diagramas de Força Cortante (kN) nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos .....  | 129 |
| Figura 50 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos.....    | 132 |
| Figura 51 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos.....    | 134 |
| Figura 52 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos.....   | 137 |
| Figura 53 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos.....  | 140 |
| Figura 54 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos.....  | 142 |
| Figura 55 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos ..... | 145 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Fator de forma $I_s$ .....                                                                                      | 14  |
| Tabela 2 - Valores de $I_s$ $I_h$ para carregamentos na superfície ( $I_d = 1,0$ ) de um meio de espessura finita .....    | 14  |
| Tabela 3 - Valores do fator de influência de $I_w$ .....                                                                   | 15  |
| Tabela 4 – Valores de $K_\tau$ em função do coeficiente de Poisson e da relação $B/L$ .....                                | 16  |
| Tabela 5 - Valores de $K$ .....                                                                                            | 23  |
| Tabela 6 - Valores de $\alpha$ .....                                                                                       | 23  |
| Tabela 7 - Valores típicos do coeficiente de Poisson .....                                                                 | 24  |
| Tabela 8 - Perfis adotados para os pilares e vigas do Pórtico Tipo 1.....                                                  | 40  |
| Tabela 9 - Parâmetros do solo adotados a partir da sondagem de referência.....                                             | 46  |
| Tabela 10 - Valores de $K_v$ e $K_h$ – Sapata Central.....                                                                 | 48  |
| Tabela 11 - Valores de $K_v$ e $K_h$ – Sapatas externas .....                                                              | 49  |
| Tabela 12 - Valores de $K_v$ – Sob a placa de cisalhamento .....                                                           | 50  |
| Tabela 13 – Identificação das barras referente aos pilares dos eixos 1, 2 e 3.....                                         | 58  |
| Tabela 14 - Recalques diferenciais na fundação para os modelos de ISE .....                                                | 65  |
| Tabela 15 - Deslocamentos Horizontais nos nós ( $D_x$ ) em mm .....                                                        | 83  |
| Tabela 16 - Avaliação da Influência da Flexibilização dos apoios nos elementos estruturais nos esforços solicitantes ..... | 87  |
| Tabela 17 - Deslocamentos Horizontais nos nós ( $D_x$ ) - Pórticos de 4 Pavimentos .....                                   | 94  |
| Tabela 18 - Deslocamentos Horizontais nos nós ( $D_x$ ) - Pórticos de 7 Pavimentos .....                                   | 95  |
| Tabela 19 - Deslocamentos Horizontais nos nós ( $D_x$ ) - Pórticos de 11 Pavimentos .....                                  | 96  |
| Tabela 20 - Deslocamentos Verticais nos nós ( $D_z$ ) - Pórticos de 4 Pavimentos .....                                     | 97  |
| Tabela 21 - Deslocamentos Verticais nos nós ( $D_z$ ) - Pórticos de 7 Pavimentos .....                                     | 98  |
| Tabela 22 - Deslocamentos Verticais nos nós ( $D_z$ ) - Pórticos de 11 Pavimentos .....                                    | 99  |
| Tabela 23 - Força Normal nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos .....                                                        | 100 |
| Tabela 24 - Força Normal nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos .....                                                        | 102 |
| Tabela 25 - Força Normal (kN) nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos .....                                                  | 104 |
| Tabela 26 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos .....                                                      | 107 |
| Tabela 27 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos .....                                                      | 109 |
| Tabela 28 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos .....                                                     | 112 |
| Tabela 29 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos .....                                                      | 115 |
| Tabela 30 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos .....                                                      | 117 |
| Tabela 31 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos .....                                                     | 120 |
| Tabela 32 - Força Cortante nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos .....                                                    | 123 |
| Tabela 33 - Força Cortante nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos .....                                                    | 125 |
| Tabela 34 - Força Cortante nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos.....                                                     | 127 |
| Tabela 35 - Momento Fletor nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos.....                                                       | 131 |
| Tabela 36 - Momento Fletor (kNxm) nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos .....                                               | 133 |

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 37 - Momento Fletor nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos.....  | 135 |
| Tabela 38 - Momento Fletor nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos..... | 139 |
| Tabela 39 - Momento Fletor nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos..... | 141 |
| Tabela 40 - Momento fletor nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos..... | 143 |

## **LISTA DE GRÁFICOS**

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 - Comparação dos deslocamentos horizontais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 4 Pavimentos .....  | 61 |
| Gráfico 2 - Comparação dos deslocamentos horizontais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 7 Pavimentos .....  | 62 |
| Gráfico 3 - Comparação dos deslocamentos horizontais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 11 Pavimentos ..... | 62 |
| Gráfico 4 - Comparação dos deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 4 Pavimentos .....    | 63 |
| Gráfico 5 - Comparação dos deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 7 Pavimentos .....    | 64 |
| Gráfico 6 - Comparação dos deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 4 Pavimentos .....    | 64 |
| Gráfico 7 - Força Normal nas Vigas do Pórtico de 4 Pavimentos.....                                                                         | 66 |
| Gráfico 8 - Força Normal nas Vigas do Pórtico de 7 Pavimentos.....                                                                         | 67 |
| Gráfico 9 - Força Normal nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos.....                                                                        | 67 |
| Gráfico 10 - Força Normal nos Pilares do Pórtico de 4 Pavimentos.....                                                                      | 68 |
| Gráfico 11 - Força Normal nos Pilares do Pórtico de 7 Pavimentos.....                                                                      | 68 |
| Gráfico 12 - Força Normal nos Pilares do Pórtico de 11 Pavimentos.....                                                                     | 69 |
| Gráfico 13 - Força Cortante nas Vigas do Pórtico de 4 Pavimentos .....                                                                     | 70 |
| Gráfico 14 - Força Cortante nas Vigas do Pórtico de 7 Pavimentos .....                                                                     | 70 |
| Gráfico 15 - Força Cortante nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos .....                                                                    | 71 |
| Gráfico 16 - Força Cortante nos Pilares do Pórtico de 4 Pavimentos .....                                                                   | 72 |
| Gráfico 17 - Força Cortante nos Pilares do Pórtico de 7 Pavimentos .....                                                                   | 72 |
| Gráfico 18 - Força Cortante nos Pilares do Pórtico de 11 Pavimentos .....                                                                  | 73 |
| Gráfico 19 - Força Cortante nos Pilares do Eixo 1 - Pórtico de 11 Pavimentos .....                                                         | 74 |
| Gráfico 20 - Força Cortante nos Pilares do Eixo 2 - Pórtico de 11 Pavimentos .....                                                         | 74 |
| Gráfico 21 - Força Cortante nos Pilares do Eixo 3 - Pórtico de 11 Pavimentos .....                                                         | 75 |
| Gráfico 22 - Momento fletor nas Vigas do Pórtico de 4 Pavimentos .....                                                                     | 76 |
| Gráfico 23 - Momento Fletor nas Vigas do Pórtico de 7 Pavimentos .....                                                                     | 76 |
| Gráfico 24 - Momento Fletor nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos .....                                                                    | 77 |
| Gráfico 25 - Momento Fletor nos Pilares do Pórtico de 4 Pavimentos .....                                                                   | 78 |
| Gráfico 26 - Momento Fletor nos Pilares do Pórtico de 7 Pavimentos .....                                                                   | 78 |
| Gráfico 27 - Momento Fletor nos Pilares do Pórtico de 11 Pavimentos .....                                                                  | 79 |
| Gráfico 28 - Momento Fletor nos Pilares do Primeiro Pavimento - Pórtico de 4 Pavimentos .....                                              | 80 |
| Gráfico 29 - Momento Fletor nos Pilares do Primeiro Pavimento - Pórtico de 7 Pavimentos .....                                              | 80 |
| Gráfico 30 - Momento Fletor nos Pilares do Primeiro Pavimento - Pórtico de 11 Pavimentos .....                                             | 81 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS e SÍMBOLOS**

AT – Apoio Teórico

ABNT – Associação Brasileira de Normas e Técnicas

B – Menor dimensão da fundação

CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica-Minas Gerais

c – Coesão

$D_x$  – Deslocamentos horizontais na direção x

$D_z$  – Deslocamentos verticais na direção z (recalque vertical)

E – Módulo de Elasticidade (Módulo de Young)

EA – Rigidez Axial

EI – Rigidez à Flexão

ELS – Estado Limite de Serviço

$F_{ck}$  – Resistência característica do concreto à compressão

$l_d$  – Fato de Profundidade/Embutimento

$l_h$  – Fator de Espessura da Camada Compressível

$l_s$  – Fator de Forma da Fundação

ISE – Interação Solo Estrutura

$l_w$  – Fator de Influência da Fundação

$K_h$  – Coeficiente de reação horizontal

$K_v$  – Coeficiente de reação vertical

$K_x$  – Constante de mola na direção axial

M – Momento fletor

MC – Modelo de meio contínuo

MEF – Método dos Elementos Finitos

MM – Modelo de malha de molas contínuas

N – Força normal

$N_{SPT}$  – Índice de resistência à penetração do solo da camada de fundação

P – Modelo de Pasternak

$P-\Delta$  – Efeito Global de Segunda Ordem

$P-\delta$  – Efeito Local de Segunda Ordem

$P_{cr}$  – Carga Crítica Elástica

$P_p$  – Carga Limite Plástica

q – Pressão

SPT – Standard Penetration Test

$u_1$  – Deslocamento da Estrutura em Análise de Primeira Ordem

$u_2$  – Deslocamento da Estrutura em Análise de Segunda Ordem

$V$  – Força cortante

$W$  – Molas de Winkler

$\varphi$  – Ângulo de Atrito interno do solo

$\sigma$  – Tensão normal

$\varepsilon$  – Deformação longitudinal

$\sigma_{adm}$  – Tensão Admissível

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

## **SUMÁRIO**

| <b><u>ITEM</u></b> | <b><u>DESCRIÇÃO</u></b>                                            | <b><u>PÁGINA</u></b> |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b>1.0</b>         | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                            | <b>1</b>             |
| 1.1                | CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....                                        | 1                    |
| 1.2                | OBJETIVOS .....                                                    | 4                    |
| 1.2.1              | Objetivo Geral.....                                                | 4                    |
| 1.2.2              | Objetivos Específicos .....                                        | 4                    |
| 1.3                | ESTRUTURA DO TRABALHO.....                                         | 4                    |
| <b>2.0</b>         | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                  | <b>6</b>             |
| 2.1                | INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA (ISE) .....                               | 6                    |
| 2.1.1              | Conceituação.....                                                  | 6                    |
| 2.1.2              | Recalques na Fundação.....                                         | 7                    |
| 2.1.3              | Modelos Teóricos para Consideração da ISE .....                    | 9                    |
| 2.1.3.1            | Modelo de Winkler.....                                             | 9                    |
| 2.1.3.2            | Modelo de Filonenko-Borodich – 1940 .....                          | 17                   |
| 2.1.3.3            | Modelo de Fundação de Hetenyi – 1946 .....                         | 17                   |
| 2.1.3.4            | Modelo de Pasternak – 1954 .....                                   | 18                   |
| 2.1.3.5            | Modelo de Kerr – 1965.....                                         | 18                   |
| 2.1.3.6            | Modelo de Analogia Viga-Coluna – 1993.....                         | 19                   |
| 2.1.3.7            | Malha de molas (Novo Modelo Contínuo de Winkler) – 2001 .....      | 19                   |
| 2.1.3.8            | Meio Contínuo .....                                                | 21                   |
| 2.1.4              | Parâmetros do Solo .....                                           | 22                   |
| 2.1.5              | Distribuição de Tensões ao Longo da Profundidade do Solo .....     | 24                   |
| 2.2                | ANÁLISE EM TEORIA DE SEGUNDA ORDEM DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO ..... | 27                   |
| 2.2.1              | Linearidade e Não Linearidade Física.....                          | 27                   |
| 2.2.2              | Linearidade e Não Linearidade Geométrica.....                      | 27                   |
| 2.2.3              | Tipos de Análises .....                                            | 30                   |
| 2.2.4              | Método P-Delta.....                                                | 32                   |
| <b>3.0</b>         | <b>METODOLOGIA .....</b>                                           | <b>34</b>            |
| 3.1                | CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....                                    | 34                   |
| 3.2                | PROPOSTA DA PESQUISA .....                                         | 34                   |
| 3.3                | SEQUÊNCIA EXECUTIVA.....                                           | 35                   |
| 3.4                | DEFINIÇÃO DO PÓRTICO DE AÇO.....                                   | 38                   |
| 3.5                | ANÁLISE E MODELAGEM PELO MEF .....                                 | 41                   |
| 3.5.1              | Elementos de barra (frame).....                                    | 41                   |

|            |                                                                           |           |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.2      | <i>Elementos de placa (shell)</i> .....                                   | 42        |
| 3.5.3      | <i>Elementos sólidos (solid)</i> .....                                    | 42        |
| 3.6        | PARÂMETRO DE NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA: P-DELTA .....                    | 43        |
| 3.7        | PARÂMETROS PARA O MODELO COM APOIOS TEÓRICOS .....                        | 43        |
| 3.8        | DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO .....                                    | 44        |
| 3.8.1      | <i>Boletim de Sondagem</i> .....                                          | 44        |
| 3.8.2      | <i>Parâmetros adotados para o Solo</i> .....                              | 46        |
| 3.9        | DEFINIÇÃO DA FUNDAÇÃO .....                                               | 46        |
| 3.10       | DIMENSIONAMENTO DAS SAPATAS DE FUNDAÇÃO .....                             | 47        |
| 3.11       | PARÂMETROS PARA OS MODELOS ISE .....                                      | 48        |
| 3.11.1     | <i>Parâmetros para o Modelo de Winkler (W)</i> .....                      | 48        |
| 3.11.2     | <i>Parâmetros para o Modelo de Pasternak (P)</i> .....                    | 50        |
| 3.11.3     | <i>Parâmetros para a Modelagem do Meio Contínuo (MC)</i> .....            | 52        |
| 3.11.4     | <i>Parâmetros para a Modelagem da Malha de Molas Contínuas (MM)</i> ..... | 54        |
| <b>4.0</b> | <b>RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....                                        | <b>56</b> |
| 4.1        | BULBO DE TENSÕES NO MODELO DE MEIO CONTÍNUO .....                         | 56        |
| 4.2        | COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA OS PÓRTICOS ESTUDADOS .....                | 58        |
| 4.3        | ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS .....                                           | 58        |
| 4.3.1      | <i>Avaliação qualitativa dos deslocamentos</i> .....                      | 58        |
| 4.3.2      | <i>Avaliação quantitativa dos deslocamentos</i> .....                     | 61        |
| 4.4        | ANÁLISE DOS ESFORÇOS SOLICITANTES .....                                   | 65        |
| 4.4.1      | <i>Força normal</i> .....                                                 | 65        |
| 4.4.2      | <i>Força cortante</i> .....                                               | 69        |
| 4.4.3      | <i>Momento fletor</i> .....                                               | 75        |
| <b>5.0</b> | <b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....                                     | <b>82</b> |
| <b>6.0</b> | <b>CONCLUSÃO</b> .....                                                    | <b>88</b> |
| 6.1        | LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....                                              | 90        |
| 6.2        | SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....                                    | 90        |
| <b>7.0</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                                   | <b>91</b> |
|            | <b>APÊNDICE</b> .....                                                     | <b>94</b> |

## **1.0 INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A utilização de apoios teóricos (fixos, móveis e engaste perfeito) restringem totalmente alguns deslocamentos como, por exemplo, o deslocamento vertical da estrutura em contato com o solo, o que não é uma situação real.

Uma etapa importante na análise e dimensionamento de estruturas está relacionada com uma avaliação mais precisa dos modelos estruturais utilizados nas modelagens numéricas. Com o desenvolvimento de microcomputadores e de programas computacionais, já é possível realizar estudos que levam em consideração a rigidez do solo junto às fundações. Este tipo de análise recebe o nome de Interação Solo-Estrutura (ISE) e seria ideal que fosse realizada de forma multidisciplinar, ou seja, por engenheiros especialistas em cálculo estrutural em conjunto com os engenheiros geotécnicos especialista em fundações, visando obter análises mais rigorosas do comportamento da estrutura.

De forma geral, há duas condições essenciais a serem cumpridas com relação às estruturas: ter estabilidade/segurança e durabilidade conforme critérios estabelecidos por normas técnicas.

Atualmente esses parâmetros de estabilidade e durabilidade estão descritos de forma clara e objetiva nas diversas normas brasileiras e internacionais, sempre baseados em teorias bem consolidadas e com o acréscimo de coeficientes de segurança, cujos valores são bastante significativos de forma a cercar as incertezas dos modelos estruturais e parâmetros de cálculo adotados com relação à situação real da edificação. Dentre as simplificações realizadas, está a utilização de apoios teóricos (fixos, móveis e engaste perfeito) na análise.

Para que o modelo estrutural se aproxime do comportamento estrutural esperado, um dos parâmetros a ser considerado é a interação solo-estrutura. Essa interação pode ser feita por meio da modelagem do solo ou da substituição dos apoios por molas que simulem a rigidez do solo nas regiões dos apoios. E, tudo isso pode ser feito com softwares que utilizam da teoria de elementos finitos.

Diversas pesquisas têm demonstrado que os esforços calculados considerando-se os apoios fixos são diferentes daqueles encontrados ao se adotar apoios elásticos por meio da ISE.

Segundo KHOURI (2001), análises estruturais que se aproximam mais da realidade, vem da atual e crescente exigência de concepções estruturais cada vez mais arrojadas, das obras de arte e edificações de forma geral, bem como a constante busca pela economia.

Conforme SOUZA e REIS (2008), utilizar a hipótese dos vínculos que não se deslocam pode conduzir a obtenção de resultados distantes da realidade física numa análise estrutural.

No trabalho realizado por CATARINO (2009), foram realizadas análises estruturais de um mesmo edifício sob duas hipóteses, inicialmente considerando apoios teóricos rígidos e indeslocáveis, e posteriormente, com apoios elásticos (considerando-se o solo como “molas de Winkler”). Comparativamente, foram encontradas variações significativas dos esforços solicitantes nos elementos estruturais analisados em cada caso. Em alguns pontos apresentando até mesmo inversão do sinal do momento fletor nos pilares. Verificou-se uma redistribuição de esforços, no caso onde se considera a ISE, evidenciando uma tendência de transferência de cargas para as regiões mais periféricas (pilares externos) com consequente alívio das regiões centrais (pilares internos).

Em FAROUK e FAROUK (2014), para demonstrar o efeito da ISE, um pórtico de dois vãos e um pavimento, com fundações tipo sapata, foi analisado sob três modelos distintos de suporte. O suporte da estrutura foi considerado com apoios teóricos, apoios elásticos ou modelo de Winkler e com o modelo de meio contínuo com comportamento elástico linear. A maior diferença foi encontrada entre os modelos de apoios teóricos e o modelo de meio contínuo. Nesta comparação, a força normal no modelo de meio contínuo foi 18% superior ao do modelo de apoios teóricos nos pilares externos e 15% inferior no pilar interno.

Na análise de um edifício de 180 metros de altura, submetido a ações de vento, VENANZI; SALCIARINI & TAMAGNINI (2014) verificaram que a ISE tem impactos significativos no resultado dos momentos fletores e forças cortantes da estrutura. A consideração da ISE foi realizada de duas maneiras distintas, por meio da modelagem do maciço em comportamento elástico linear e por meio de um macro elemento hipoplástico para fundações superficiais assentes em solos grosseiros, capaz de considerar o acúmulo de deformações irreversíveis do solo, ao longo do tempo. A resposta desses dois modelos foi comparada com a resposta do modelo considerando apoios teóricos. A maior diferença ocorreu entre o modelo teórico e o modelo de

elemento hipoplástico, onde foram observadas diferenças na ordem de 28% para o momento fletor e de 22% para a força cortante, na base do edifício. Entre os modelos ISE observaram-se diferenças consideráveis de resposta até a altura de 60 metros para o momento fletor e até a altura de 120 metros para a força cortante. Para ambos os casos a maior diferença de resposta se encontra na base do edifício e se atenuam com o aumento da altura, sendo que na altura de 180 metros os esforços são praticamente coincidentes com o modelo teórico (engaste perfeito), evidenciando o papel da superestrutura em atenuar os efeitos da ISE.

MITROPOULOU et al. (2016) analisaram a influência da ISE na resposta de edifícios de concreto armado e de aço de diferentes alturas. O solo foi considerado tanto como modelo de Winkler como com o maciço do solo modelado por elementos finitos. Os autores observaram uma maior diferença de resposta entre os modelos de consideração do maciço geotécnico nos edifícios mais altos, o que indica que o comportamento de estruturas mais altas é mais complexo e que estas são mais sensíveis ao modelo adotado para a consideração da ISE.

Em NIKOLAOU; GEORGIADIS e BISBOS (2016) foram realizadas análises em pórticos planos de aço, levando em consideração a interação solo estrutura. Os autores verificaram que a carga de colapso da estrutura diminui significativamente quando a ISE é considerada. Os autores também evidenciaram que o modo de colapso da estrutura difere de forma considerável entre as análises que não consideram e que consideram a interação solo-estrutura.

A utilização de recursos computacionais com modelos mais reais leva a um dimensionamento mais preciso e refinado do comportamento estrutural das edificações, evitando que regiões sejam superdimensionadas ou subdimensionadas. Podendo, em um futuro não muito distante, até mesmo conduzir a uma adequação dos atuais coeficientes de segurança.

Portanto, a importância desse trabalho, está na avaliação da influência da interação solo-estrutura sobre os elementos de estrutura de aço. Espera-se obter resultados que demonstrem as diferenças de uma análise convencional para uma análise que contempla o efeito da interação solo-estrutura e, conseqüentemente, da rigidez do solo de fundação.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho consiste em investigar diversos tipos de modelos de cálculo considerando-se os efeitos da interação do solo com a estrutura de aço e compará-los com a mesma estrutura utilizando engastes perfeitos como apoio.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar estudos comparativos dos esforços solicitantes e dos deslocamentos verticais e horizontais de pórticos, considerando os cinco modelos propostos:
  - Apoios Teóricos (AT);
  - ISE baseado na teoria de Winkler (W);
  - ISE baseado na teoria de Pasternak (P);
  - ISE considerando-se uma malha de molas contínuas (MM);
  - ISE considerando-se a modelagem do solo como um meio contínuo em elementos finitos (MC).
- Avaliar a influência dos modelos de ISE no comportamento dos pórticos considerando-se a análise de 2<sup>a</sup> ordem.
- Modelar pórticos com alturas diferentes para avaliar o efeito da altura dos edifícios nos resultados.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para se alcançar os objetivos deste trabalho, apresenta-se no capítulo 2 uma revisão da literatura buscando-se mostrar o estado da arte do tema proposto, a fundamentação teórica e a importância do estudo realizado. Para tal, são apresentados resultados de trabalhos acadêmicos realizados na área. São apresentados nesse capítulo, um estudo sobre a interação solo-estrutura (ISE) e análise em teoria de segunda ordem em pórticos planos de aço com alguns conceitos fundamentais importantes sobre a flexibilização dos apoios, recalques nas edificações, modelos e teorias propostos por diversos autores para a representação

do solo como meio elástico e tipos de análises da não linearidade física e geométrica das edificações.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia adotada para a elaboração dos estudos propostos, no qual está descrita a sequência executiva para as análises de pórticos planos de aço considerando apoios teóricos e a ISE.

No capítulo 4, estão apresentados os valores de deslocamentos, distribuição de tensões no solo, esforços solicitantes nas barras para os modelos analisados. Uma comparação de resultados dos modelos é realizada, bem como a apresentação das variáveis que influenciam nos mesmos.

No capítulo 5 é feita uma discussão em torno das análises feitas anteriormente na tentativa de se estabelecer uma relação entre os diversos resultados obtidos e suas implicações gerais para o tipo de estudo realizado.

E, por fim, no capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões no que tange às diferenças encontradas nos resultados dos cinco modelos de cálculo apresentados para os três tipos de pórticos. Nesse mesmo capítulo estão apresentadas as limitações dessa pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## **2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA (ISE)**

#### **2.1.1 Conceituação**

O procedimento mais utilizado na análise estrutural de edificações de uma forma geral é aquele no qual se faz a análise da superestrutura separadamente da infraestrutura. Esse tipo de procedimento pode levar a valores de deslocamentos globais e reações na estrutura muito diferentes dos reais, tendo em vista que, ao modelar os apoios da estrutura supondo-os indeformáveis ou infinitamente rígidos, admite-se que a fundação não apresenta recalques, premissa incompatível com o comportamento real dos solos.

Sabe-se que a segurança das estruturas está diretamente ligada ao correto projeto da fundação, assim, uma análise de interação solo-estrutura torna-se uma ferramenta muito útil para avaliar os deslocamentos da estrutura de uma forma integrada e rigorosa.

Para COLARES (2006), o conceito de ISE está associado à forma como ocorre a influência entre o sistema de fundação e a superestrutura, sendo que um influencia no outro de forma mútua, cujo processo vai desde a fase construtiva até a fase em que um estado de equilíbrio seja atingido, no qual as tensões e as deformações se encontram estabilizadas, tanto do solo quanto da estrutura.

PORTO (2010) cita que a análise estrutural considerando-se a ISE, não necessariamente irá promover uma estrutura mais econômica e sim uma estrutura mais realista, pois será avaliada a distribuição de tensões considerando-se a rigidez do solo.

RIBEIRO, ALMEIDA e PAIVA (2011) constataram que a flexibilidade das fundações promove uma redistribuição de esforços na estrutura, que pode ser contra ou a favor da segurança, e isso vai depender do elemento estrutural analisado.

Segundo VELLOSO e LOPES (2011), uma análise de interação solo-fundação, que pode também ser estendida para considerar a superestrutura, denominada interação solo-estrutura (ISE), leva em consideração a rigidez real dos elementos estruturais e tem por objetivo fornecer os deslocamentos reais da fundação (infraestrutura) e também da estrutura, bem como seus esforços internos.

### 2.1.2 Recalques na Fundação

A conceituação sobre ISE apresentada anteriormente, deixa claro que, pelo fato do solo sofrer deformações quando submetido a cargas externas, ocorrem deslocamentos (recalques) na fundação que, por consequência, tem efeitos na superestrutura.

Se os recalques superarem os limites suportáveis pela edificação, ou seja, alterarem os esforços solicitantes de tal forma que não foram previstos no dimensionamento, a estrutura poderá ser levada ao colapso.

Denomina-se como recalque admissível de uma estrutura como sendo o valor máximo de recalque que a estrutura pode suportar sem que ocorram danos não aceitáveis. Tais danos podem ser classificados como: estruturais, por exemplo, trincas, rachaduras ou ruptura que ocorrem nas peças da edificação (lajes, vigas e pilares), funcionais, que afetam o uso da edificação, tais como distorção em esquadrias e inversão de declividade para drenagem e arquitetônicos, que afetam a estética da edificação, (PORTO; 2010).

Na maioria das situações, o que causa danos estruturais nas edificações são os recalques diferenciais, ou seja, se um pilar da edificação tiver um deslocamento maior do que outro. Vários são os fatores que causam esses recalques diferenciais, dentre eles, os mais importantes estão relacionados a não uniformidade do material do solo de apoio, a alteração do uso da edificação com acréscimo de cargas não previstas em determinados pontos e falhas no dimensionamento e execução das fundações.

Uma maior rigidez da fundação acarretará recalques mais uniformes (VELLOSO e LOPES, 2011), sendo que, se o elemento de fundação receber mais de um pilar (sapata associada ou radier), os recalques diferenciais entre pilares serão menores.

Dessa forma, no que diz respeito à redução dos recalques diferenciais, a solução de associação de pilares, associado ao enrijecimento do elemento de fundação, contribui para a uniformização de recalques.

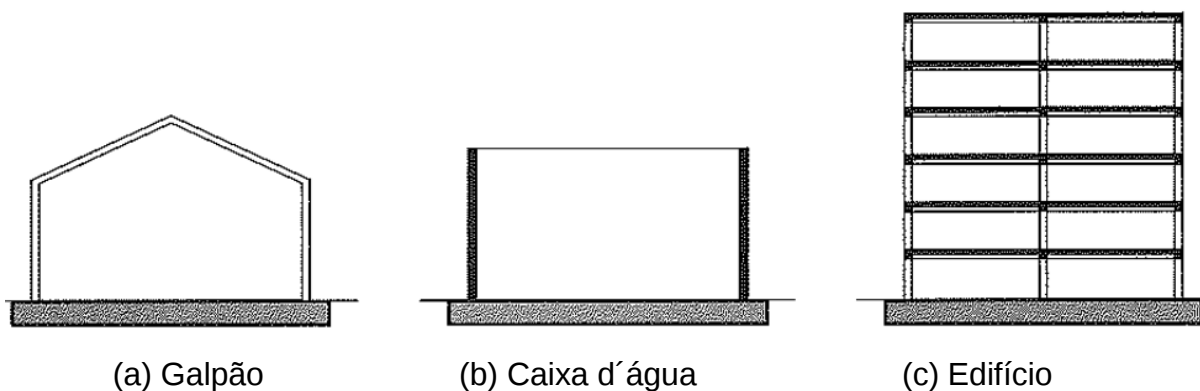
Nesse aspecto, ou seja, visando a uniformização dos recalques diferenciais na estrutura, quando se faz a análise conjunta do solo-fundação-estrutura, observa-se que a superestrutura aumenta a rigidez do conjunto.

No estudo desenvolvido por FAROUK e FAROUK (2016), foi avaliado o efeito da rigidez da superestrutura sobre o recalque diferencial das fundações do tipo sapata de um pórtico plano de dois vãos. Os autores trabalham com a análise dos recalques

diferenciais fazendo a variação da rigidez da superestrutura. O aumento da rigidez na edificação foi dado por meio do aumento nas dimensões das paredes, lajes e número de pavimentos. Os autores verificaram que o aumento da rigidez da superestrutura contribuiu para amortecer os recalques diferenciais e que uma redistribuição de esforços ocorreu na estrutura. As reduções nos recalques diferenciais foram tão significativas com o aumento da rigidez da superestrutura que os autores concluíram ser preferível utilizar a rigidez da própria estrutura para resistir aos recalques diferenciais em solos fracos, ao invés de empregar soluções mais caras, como fundações tipo estaca ou radier.

Para a fundação do tipo radier, conforme mostrado na Figura 1, apresentam-se três tipos de edificações: um galpão com pequena contribuição na rigidez do conjunto, uma caixa d'água com uma contribuição importante na rigidez e um edifício cuja contribuição de rigidez é considerada muito importante e, que, aumenta com o aumento do número de pavimentos (VELLOSO e LOPES, 2011).

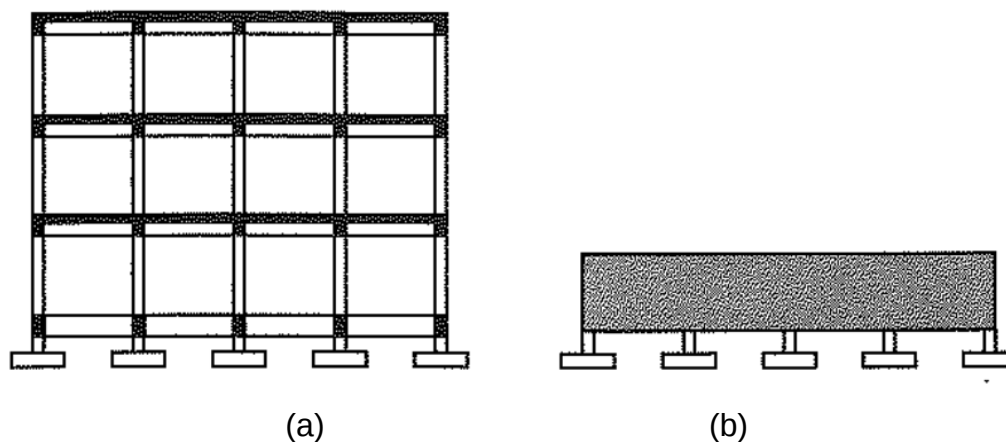
*Figura 1 - Contribuição de diferentes estruturas na rigidez do conjunto*



Fonte: VELLOSO e LOPES (2011)

Para a fundação do tipo sapatas isoladas, o papel da superestrutura é essencial, tendo em vista que as cintas e as vigas têm a função de absorver os recalques diferenciais da edificação, sendo possível, para tal, substituir a superestrutura por uma viga equivalente para facilitar a avaliação da uniformização dos recalques na fundação, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Conjunto constituído por (a) fundação e superestrutura e (b) por fundação e viga equivalente



Fonte: VELLOSO e LOPES (2011)

### 2.1.3 Modelos Teóricos para Consideração da ISE

Segundo ANTONIAZZI (2011), dentre os modelos conhecidos para se considerar a ISE nos projetos estruturais, os mais utilizados atualmente são aqueles em que a rigidez do solo pode ser representada por meio de molas elásticas na interface estrutura-solo, onde se consideram as propriedades elásticas do maciço e a compatibilização dos recalques. Outra modelagem comum é a imposição de deslocamentos verticais estimados, e isso ocorre em virtude da simplicidade desse método em comparação com aquele em que é feita a modelagem do solo.

Nos itens seguintes, estão apresentados alguns dos modelos utilizados para a avaliação da ISE

#### 2.1.3.1 Modelo de Winkler

A teoria de Winkler (Figura 3), proposta em 1867, pelo Engenheiro alemão Emil Winkler em seu trabalho “Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit”, se baseia na ideia de que o solo pode ser modelado como um sistema de molas com resposta linear, ou seja, as pressões de contato ( $q$ ) são proporcionais aos recalques ( $D_z$ ). A equação (1) representa essa proporcionalidade:

$$N = K_v D_z \quad (1)$$

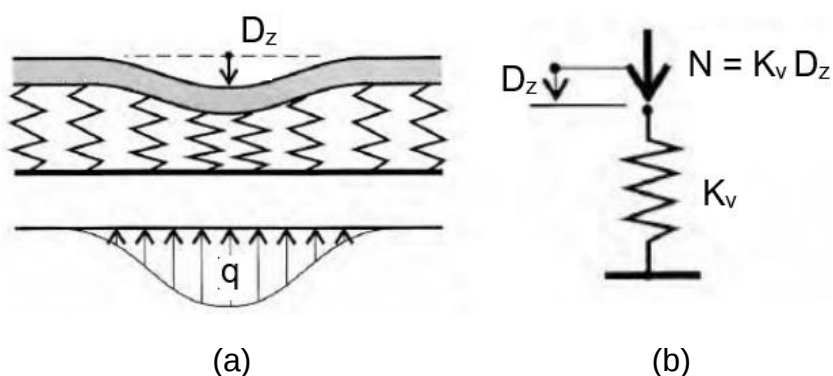
Onde:

$N$ : Carga Normal (kN);

$D_z$ : deslocamento vertical (recalque) apresentado (m);

$K_v$ : constante de proporcionalidade, conhecida também como coeficiente de reação vertical, coeficiente de reação do subsolo, ou simplesmente como coeficiente de mola (kN/m).

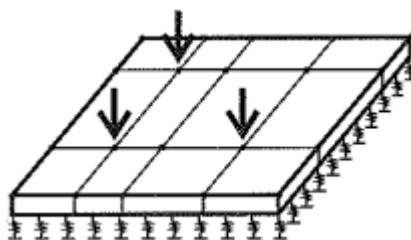
*Figura 3 - Modelo de Winkler (a) Pressões de contato proporcionais ao recalque e (b) Carga Normal proporcional ao recalque*



Fonte: Adaptado de VELLOSO e LOPES (2011)

A Figura 4 mostra a representação de elementos de placa sobre apoio elástico representado por molas:

*Figura 4 - Elementos de placa sobre apoio elástico*



Fonte: VELLOSO e LOPES (2011)

No sistema internacional de unidades,  $K_v$  é dado em (kN/m) quando está associado a um ponto e em (kN/m<sup>3</sup>) quando é aplicada em uma área. O valor da mola ( $K_v$ ) do solo pode ser determinado de diversas maneiras, as mais usuais são:

#### a) Correlações

Busca-se estimar o valor de  $K_v$  a partir de parâmetros do solo, como por exemplo o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, ou a tensão admissível do solo. A correlação pode ser feita por meio de fórmulas empíricas presentes na literatura, ou mediante manipulação de equações que preveem o recalque de uma dada fundação.

#### b) Ensaio de Placa

O ensaio de placa consiste em aplicar uma carga sobre uma placa apoiada no solo e avaliar, por meio das deformações, alguns parâmetros do solo, sendo um deles o coeficiente de reação vertical  $K_v$ . Na norma brasileira NBR 6489, para o ensaio de placa deve-se utilizar uma placa circular com área igual a  $0,5 \text{ m}^2$  ocupando o fundo da cava de assentamento da fundação com carregamento incremental mantido até a estabilização, cujos critérios estão descritos em norma, já os valores fornecidos por TERZAGHI (1955) são baseados em ensaios com placas quadradas com 30 cm de aresta.

VELLOSO, MARIA e LOPES (1996) consideraram como uma das limitações do ensaio de placa o fato desta solicitar um volume de solo pequeno sob a placa, enquanto a fundação real irá solicitar solos até uma profundidade mais elevada. FAROUK e FAROUK (2015) também salientaram que, devido ao fato da rigidez da placa ser diferente da rigidez real da sapata, as pressões de contato provocadas pela placa serão diferentes das provocadas pela fundação, de forma que o  $K_v$  do ensaio não corresponde exatamente ao  $K_v$  da fundação e, por isso, os autores concluíram que esse ensaio era inadequado para a determinação do  $K_v$ .

#### c) Tabela de valores típicos:

Na literatura, existem diversas tabelas com valores de  $K_v$  para diferentes tipos de solo, que possuem uma faixa grande de variação para um mesmo tipo de solo, tornando difícil a decisão de quais valores adotar.

#### d) Recalque real da fundação.

O coeficiente  $K_v$  também pode ser obtido mediante uma retro análise, onde se conhece o carregamento e o recalque sofrido, o  $K_v$  pode então ser obtido diretamente da relação de Winkler.

Dentre essas opções, optou-se por utilizar as correlações, buscando relações entre o  $K_v$  e o Módulo de Young do meio elástico, tornando possível utilizar os mesmos parâmetros para a definição da rigidez do solo nos quatro modelos de interação solo-estrutura que serão analisados no presente trabalho.

VELLOSO, MARIA e LOPES (1996) salientaram que o coeficiente  $K_v$  não é uma propriedade do solo, mas uma resposta deste a solicitação imposta por uma determinada estrutura, não sendo trivial estabelecer uma relação entre  $K_v$  e o módulo de Young de meio elástico  $E$ , o que explica a grande variação de valores desse parâmetro.

Um grande problema do modelo de Winkler é o fato do módulo de reação vertical depender das dimensões da área carregada e da profundidade de assentamento da fundação, não sendo, portanto, uma resposta direta da natureza do solo.

Em FAROUK e FAROUK (2014b), os autores observaram que o módulo de reação vertical do solo é não uniforme sob a base da sapata, e está relacionado com a forma da distribuição das pressões de contato na interface sapata-solo. Neste sentido, esses autores consideraram inadequado o cálculo do  $K_v$  pela simples divisão da capacidade de carga do solo pelo recalque máximo da sapata, processo que resultava em um  $K_v$  constante sob toda a base da sapata. Assim os autores propuseram a determinação do  $K_v$  a partir da análise da distribuição de pressões sob a base da sapata em um programa de elementos finitos geotécnico, já levando em conta a superestrutura e sua influência, ou seja, a ISE. Na análise de um pórtico plano de dois vãos, a resposta do modelo que considerou a ISE para a determinação  $K_v$  apresentou diferença de resposta, na força normal dos pilares, da ordem de 8% em relação ao modelo onde o solo foi representado por elementos finitos. O modelo que determinou o  $K_v$  da forma “tradicional”, sem considerar a ISE, apresentou diferença da ordem de 14%.

Segundo a visão de PORTO (2010), as principais deficiências do modelo de Winkler são:

- O modelo não considera a dispersão da carga sobre uma área de influência gradualmente crescente com a profundidade;
- Considera o solo como tendo relação tensão-deformação linear;
- Considera as molas independentes, o que na prática vale dizer que não existiriam forças coesivas entre as partículas do solo.

Para se determinar o  $K_v$  por meio de correlações, a proposta de PORTO (2010) foi calcular o recalque previsto para uma fundação a partir dos parâmetros do solo e então relacionar esse recalque com o Modelo de Winkler.

VELLOSO e LOPES (2011) propuseram o cálculo direto do recalque de uma fundação tipo sapata a partir de soluções da Teoria da Elasticidade. Segundo os autores, o recalque de uma sapata sob carga centrada pode ser previsto pela equação (2):

$$w = qB \frac{1 - \nu^2}{E} I_s I_d I_h \text{ (m)} \quad (2)$$

Onde:

$q$ : pressão média aplicada ( $\text{kN/m}^2$ );

$B$ : menor dimensão da fundação (sapata, viga ou radier) (m);

$\nu$ : Coeficiente de Poisson;

$E$ : Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young ( $\text{kN/m}^2$ );

$I_s$ : Fator de forma da fundação (função da forma da sapata e de sua rigidez);

$I_d$ : Fator de profundidade/embutimento;

$I_h$ : Fator de espessura de camada compressível.

Correlacionando a equação (1) de Winkler com a equação para o cálculo de recalque em sapatas, obtém-se a equação (3) apresentada abaixo:

$$K_v = \frac{1}{B} \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{1}{I_s I_d I_h} \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) \quad (3)$$

Na Tabela 1 estão apresentados os valores do fator de forma  $I_s$  para carregamento na superfície ( $I_d = 1,0$ ) de um meio de espessura infinita ( $I_h = 1,0$ ) e na Tabela 2 estão apresentados os valores de  $I_s I_h$  para carregamentos na superfície ( $I_d = 1,0$ ) de um meio de espessura finita, onde:  $h$ =espessura do meio;  $a = B/2$ ;  $m = L/B$ .

Tabela 1 - Fator de forma  $I_s$ 

| Forma       | Flexível         |       |       | Rígido |
|-------------|------------------|-------|-------|--------|
|             | Centro           | Borda | Média |        |
| Quadrado    | 1,12             | 0,56  | 0,95  | 0,99   |
| Retângulo   | Valores de $I_s$ |       |       |        |
| L/B = 1,5   | 1,36             | 0,67  | 1,15  |        |
| L/B = 2     | 1,52             | 0,76  | 1,3   |        |
| L/B = 3     | 1,78             | 0,88  | 1,52  |        |
| L/B = 5     | 2,1              | 1,05  | 1,83  |        |
| L/B = 10    | 2,53             | 1,26  | 2,25  |        |
| L/B = 100   | 4                | 2     | 3,7   |        |
| L/B = 1000  | 5,47             | 2,75  | 5,15  |        |
| L/B = 10000 | 6,9              | 3,5   | 6,6   |        |

Fonte: Adaptado de VELLOSO e LOPES (2011)

Tabela 2 - Valores de  $I_s$   $I_h$  para carregamentos na superfície ( $I_d = 1,0$ ) de um meio de espessura finita

| h/a | Retângulo |       |       |       |       |       |       |
|-----|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | m=1       | m=2   | m=3   | m=5   | m=7   | m=10  | m= ∞  |
| 0   | 0         | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0,2 | 0,096     | 0,098 | 0,098 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,1   |
| 0,5 | 0,225     | 0,231 | 0,233 | 0,236 | 0,237 | 0,238 | 0,239 |
| 1   | 0,396     | 0,427 | 0,435 | 0,441 | 0,444 | 0,446 | 0,452 |
| 2   | 0,578     | 0,698 | 0,727 | 0,748 | 0,757 | 0,764 | 0,784 |
| 3   | 0,661     | 0,856 | 0,91  | 0,952 | 0,965 | 0,982 | 1,018 |
| 5   | 0,74      | 1,01  | 1,119 | 1,201 | 1,238 | 1,256 | 1,323 |
| 7   | 0,776     | 1,094 | 1,223 | 1,346 | 1,402 | 1,442 | 1,532 |
| 10  | 0,818     | 1,155 | 1,309 | 1,475 | 1,556 | 1,619 | 1,758 |
| ∞   | 0,849     | 1,3   | 1,527 | 1,826 | 2,028 | 2,246 | ∞     |

Fonte: Adaptado de VELLOSO e LOPES (2011)

No mesmo sentido PERLOFF (1975) apud SOUZA e REIS (2008),  $K_v$  pode ser determinado da seguinte maneira:

$$K_v = \frac{1}{B} \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{1}{I_w} \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) \quad (4)$$

Em que:

B: menor dimensão da base da sapata (m);

$\nu$ : coeficiente de Poisson;

$I_w$ : fator de influência, que depende da forma e da rigidez da sapata (Tabela 3);

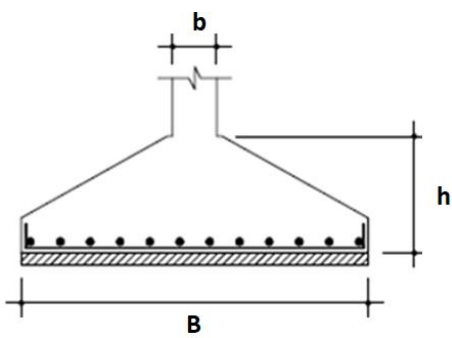
E: módulo de elasticidade do solo (kN/m<sup>2</sup>).

Na Tabela 3 estão apresentados valores do fator de influência  $I_w$ :

Tabela 3 - Valores do fator de influência de  $I_w$

| Forma             | Fundação Flexível                  |         |             | Rígida |
|-------------------|------------------------------------|---------|-------------|--------|
|                   | Centro                             | Vértice | Valor Médio |        |
| <b>Quadrada</b>   | 1,12                               | 0,56    | 0,95        | 0,82   |
| <b>Retangular</b> | <b>Valores de <math>I_w</math></b> |         |             |        |
| L/B = 1,5         | 1,36                               | 0,68    | 1,15        | 1,06   |
| L/B = 2           | 1,53                               | 0,77    | 1,3         | 1,2    |
| L/B = 5           | 2,1                                | 1,05    | 1,83        | 1,7    |
| L/B = 10          | 2,54                               | 1,27    | 2,25        | 2,1    |
| L/B = 100         | 4,01                               | 2       | 3,69        | 3,4    |



$$h \geq \frac{B-b}{3} \rightarrow \text{Sapata Rígida}$$

$$h \leq \frac{B-b}{3} \rightarrow \text{Sapata Flexível}$$

Fonte: Adaptado de SOUZA e REIS (2008)

Para a modelagem das sapatas também é necessário definir o coeficiente de reação horizontal do solo ( $K_h$ ). BARKAN (1962) apresentou a seguinte expressão, que tem como base, entre outros fatores, a teoria de Winkler (1867). A equação (5) é aplicada para fundações superficiais.

$$K_h = \frac{K_\tau C}{\sqrt{A}} \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right) \quad (5)$$

Onde:

$K_h$ : coeficiente de reação horizontal do solo (kN/m<sup>3</sup>);

$K_\tau$ : fator que correlaciona a razão das dimensões da sapata (B/L), apresentado na Tabela 4;

A: área em, em planta, da sapata (m<sup>2</sup>);

C: fator definido pela equação (6) (kN/m<sup>2</sup>):

$$C = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (6)$$

Em que:

E: módulo de elasticidade do solo;

$\nu$ : coeficiente de Poisson do solo.

*Tabela 4 – Valores de  $K_r$  em função do coeficiente de Poisson e da relação B/L*

| $\nu$ | (B/L) |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | 0,5   | 1,0   | 1,5   | 2,0   | 3,0   | 5,0   | 10,0  |
| 0,1   | 1,040 | 1,000 | 1,010 | 1,020 | 1,050 | 1,150 | 1,250 |
| 0,2   | 0,990 | 0,938 | 0,942 | 0,945 | 0,975 | 1,050 | 1,160 |
| 0,3   | 0,926 | 0,868 | 0,864 | 0,870 | 0,906 | 0,950 | 1,040 |
| 0,4   | 0,844 | 0,792 | 0,770 | 0,784 | 0,806 | 0,850 | 0,940 |
| 0,5   | 0,770 | 0,704 | 0,692 | 0,686 | 0,700 | 0,732 | 0,940 |

Fonte: Adaptado de BARKAN (1962)

Para o dimensionamento das sapatas, é necessário que se tenha o carregamento atuante, bem como a tensão admissível do solo na cota de assentamento.

Para a definição da tensão admissível do solo pode-se fazer também, correlações com o ensaio SPT, onde  $N_{SPT}$  é o índice de resistência à penetração do solo da camada de fundação. MORAES (1976) recomenda as seguintes expressões:

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{SPT}}{4} \left( \frac{Kgf}{cm^2} \right) \quad (\text{Argila Pura}) \quad (8)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{SPT}}{5} \left( \frac{Kgf}{cm^2} \right) \quad (\text{Argila Siltosa}) \quad (7)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{SPT}}{7,5} \left( \frac{Kgf}{cm^2} \right) \quad (\text{Argila Areno Siltosa}) \quad (9)$$

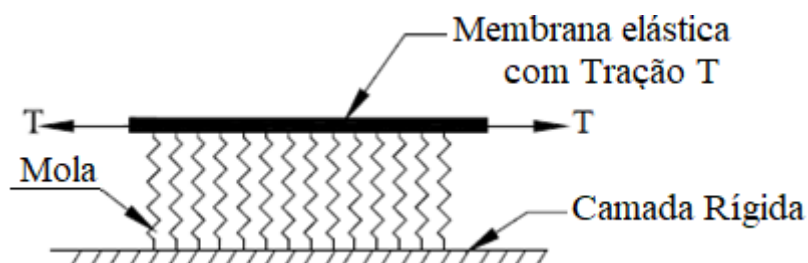
Após a formulação do modelo de interação solo-estrutura conhecido como modelo de Winkler, vários outros pesquisadores propuseram modelos semelhantes, com o intuito de aprimorar a resposta fornecida pelo modelo por meio da busca da conectividade entre as molas, e consequente interação entre essas.

SINGH e JHA (2014) apresentaram vários modelos, de forma sintética em seu trabalho, são alguns deles:

#### 2.1.3.2 Modelo de Filonenko-Borodich – 1940

O modelo utiliza uma membrana elástica fina sujeita a uma tração constante  $T$  afixada ao topo das molas de Winkler, garantindo assim a conectividade entre estas, permitindo a interação entre molas adjacentes.

*Figura 5 - Modelo de Filonenko-Borodich*

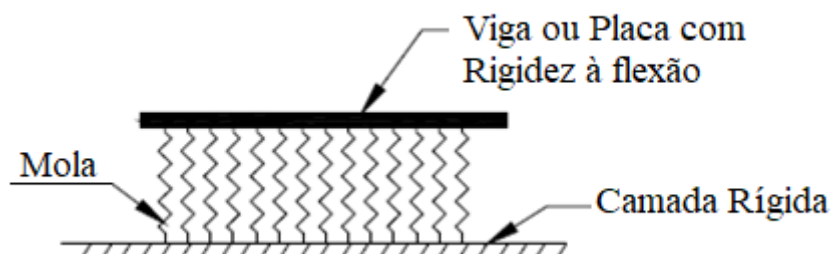


Fonte: SINGH e JHA (2014)

#### 2.1.3.3 Modelo de Fundação de Hetenyi – 1946

Neste modelo a interação entre as molas de Winkler é feita por uma viga ou placa elástica, que se deforma apenas por flexão, conectada ao topo das molas discretas.

*Figura 6 - Modelo de Hetenyi*

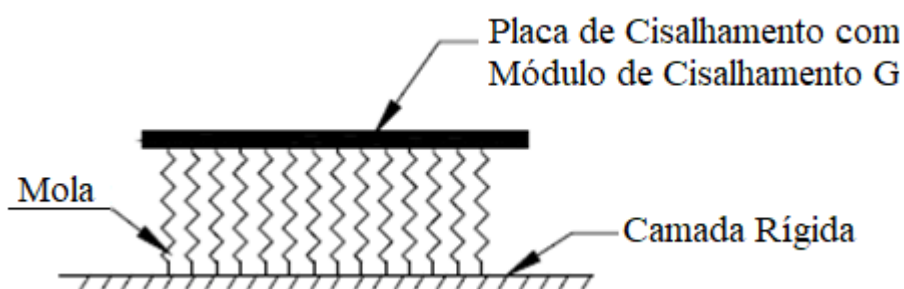


Fonte: SINGH e JHA (2014)

#### 2.1.3.4 Modelo de Pasternak – 1954

O modelo visa garantir a interação entre as molas de Winkler em função da interação de cisalhamento entre os elementos de mola, o que é garantido por meio da conexão das extremidades das molas à uma placa com espessura unitária constituída de elementos incompressíveis verticalmente, que se deforma apenas por cisalhamento.

*Figura 7 - Modelo de Pasternak*

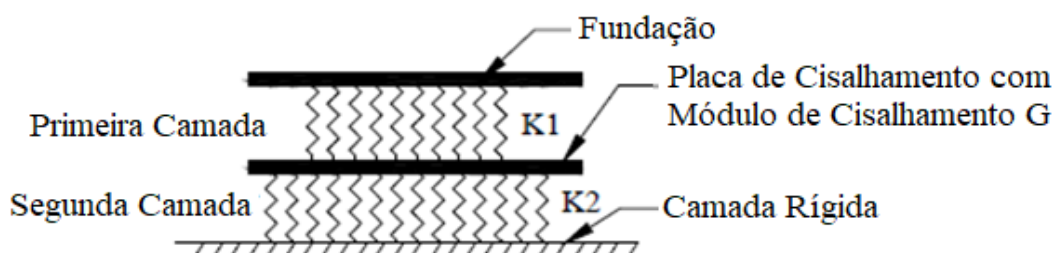


Fonte: SINGH e JHA (2014)

#### 2.1.3.5 Modelo de Kerr – 1965

O modelo é constituído por duas camadas de molas interconectadas por uma camada de cisalhamento introduzida ao modelo de Winkler. As constantes de mola acima e abaixo dessa camada,  $K_1$  e  $K_2$ , são assumidas como sendo de rigidez diferente. O que é conveniente, pois permite assumir o nível de continuidade dos deslocamentos verticais entre as camadas carregadas e não carregadas do solo, permitindo ao modelo efetuar uma distribuição de pressões correta de acordo com a natureza do solo, coesivo ou não coesivo.

*Figura 8 - Modelo de Kerr*

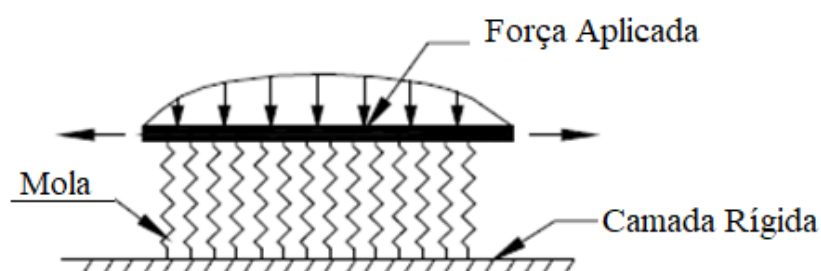


Fonte: SINGH e JHA (2014)

### 2.1.3.6 Modelo de Analogia Viga-Coluna – 1993

O modelo, apresentado por HORVATH (1993) apud SINGH e JHA (2014) considera o efeito do cisalhamento do subsolo na resposta da ISE. A parte superior (porção estrutural) do modelo é constituída de um elemento de flexão convencional. A parte inferior (porção do subsolo) assume as hipóteses do modelo de Pasternak, as quais são mais aprimoradas do que as hipóteses adotadas pelo modelo de Winkler.

*Figura 9 - Modelo de Viga-Coluna*

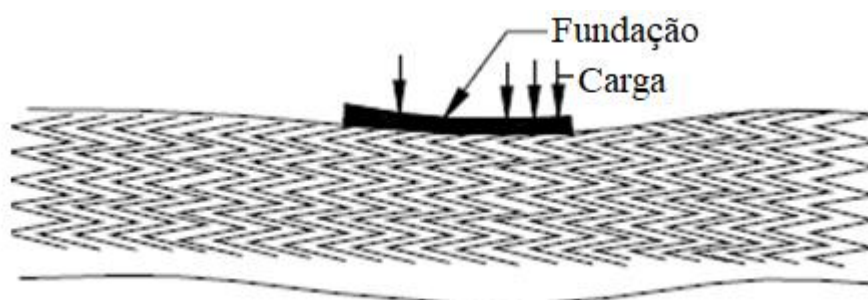


Fonte: SINGH e JHA (2014)

### 2.1.3.7 Malha de molas (Novo Modelo Contínuo de Winkler) – 2001

No modelo, proposto por KURIAN e MANOJKUMAR (2001) apud SINGH e JHA (2014), a interconexão das molas é garantida pela conexão das extremidades das molas verticais com molas horizontais, formando assim uma malha de molas contínuas. Este modelo apresenta a vantagem de levar em conta o efeito do solo para além da área carregada pela fundação.

*Figura 10 - Novo Modelo Contínuo de Winkler - 2001*



Fonte: SINGH e JHA (2014)

Para a modelagem da malha de molas é necessário que se defina a rigidez desses elementos. A rigidez de um elemento de mola é a relação entre as ações impostas a esse elemento e os deslocamentos sofridos por este, sendo que esta relação pode ou não ser linear. A relação é dita linear quando obedece a Lei de Hooke, ou seja, as deformações são diretamente proporcionais à carga (ação) imposta.

Segundo HIBBELER (2010), o deslocamento relativo elástico de um elemento submetido a carga axial é dado por:

$$\Delta_x = \int_0^L \frac{N(x)dx}{A(x)E} \quad (m) \quad (10)$$

Onde:

$\Delta_x$ : deslocamento de um ponto na barra relativo a outro ponto (m);

$N(x)$ : força axial interna na seção, localizada a distância  $x$  de uma extremidade (kN);

$A(x)$ : área da seção transversal expressa em função de  $x$  (m<sup>2</sup>);

$E$ : módulo de elasticidade do material (kN/m<sup>2</sup>).

Segundo ARANHA et al. (2016), a rigidez da mola, denominada de constante elástica  $k$  da mola, para molas lineares é dada por:

$$K_x = \frac{N}{\Delta_x} \left( \frac{kN}{m} \right) \quad (11)$$

Onde:

$K_x$ : constante elástica da mola na direção axial (kN/m);

$N$ : força axial atuante na mola (kN);

$\Delta_x$ : deslocamento relativo (m).

Admitindo uma área e uma força axial constante ao longo do comprimento da mola, ao substituir  $\Delta_x$  da equação (10) na equação (11) obtém-se que a constante elástica da mola equivale a:

$$K_x = \frac{EA}{L} \left( \frac{kN}{m} \right) \quad (12)$$

Sendo  $L$  a distância original entre os pontos;

### 2.1.3.8 Meio Contínuo

Neste modelo busca-se representar a continuidade do maciço de solo. As tensões aplicadas em diferentes pontos interagem no interior do maciço para além das áreas de aplicação de carga, possibilitando assim analisar a influência dos efeitos de múltiplas fundações trabalhando conjuntamente sobre a mesma região.

O solo é representado como meio contínuo conforme mostrado na Figura 11. Na Figura 11-a está representado o modelo elástico e na Figura 11-b o modelo elastoplástico.

Onde:

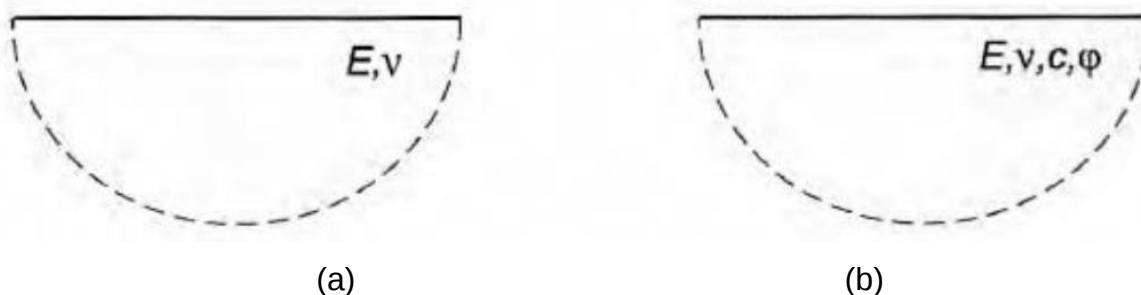
$E$ : módulo de elasticidade do solo;

$\nu$ : coeficiente de poisson;

$c$ : coesão;

$\phi$ : ângulo de atrito interno do solo.

*Figura 11 - Modelo do Meio Contínuo: elástico (a) e elastoplástico (b)*

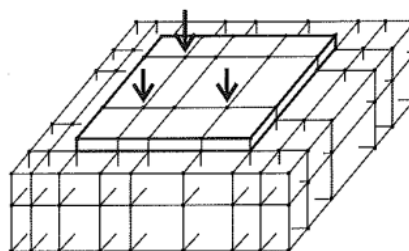


Fonte: VELLOSO e LOPES (2011)

Segundo COLARES (2006), a diferença entre o modelo elástico e o elastoplástico para representação do meio contínuo do maciço de solo é devido, no modelo elastoplástico, as tensões e forças impostas ao maciço estarem limitadas por um critério de ruptura e, no modelo elástico, a deformação ocorrer infinitamente sem rompimento do solo.

Uma das soluções para a consideração do solo como meio contínuo é a utilização de métodos numéricos, como por exemplo o MEF, que determina soluções aproximadas por meio da subdivisão do domínio de um problema em partes menores. A Figura 12 mostra a representação de elementos de placa sobre meio contínuo.

*Figura 12 - Elementos de placa sobre elementos sólidos*



Fonte: VELLOSO e LOPES (2011)

#### 2.1.4 Parâmetros do Solo

Para a modelagem do solo como meio elástico, seja utilizando molas ou elementos que simulem um meio contínuo elástico, faz-se necessário a definição dos parâmetros  $E$  e  $\nu$ , já citados e definidos anteriormente. As formulações e demais correlações para esses parâmetros são:

##### a) Módulo de elasticidade ( $E$ )

O parâmetro de rigidez do material sólido, dependente da composição química, microestrutura e imperfeições (poros, trincas e outros) do material e representa a razão entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo material conforme indicado na equação (13):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) \quad (13)$$

Estimar o módulo de elasticidade do solo é complexo, tendo em vista que o solo possui natureza heterogênea e anisotrópica, sendo que seu módulo de elasticidade sofre influência do grau de saturação, da região onde se encontra no maciço e do nível de carregamento aplicado PORTO (2010).

Tendo isso em vista, os valores tabelados são valores estimados que podem variar muito quando da situação real sendo, portanto, necessária uma análise local do maciço para validação dos valores da bibliografia quando da elaboração de projetos.

O módulo de elasticidade do solo ( $E$ ) pode ser relacionado ao resultado de sondagem à percussão ( $N_{SPT}$ ) a partir de correlações empíricas. CÂMARA e PEREIRA (2005) afirmaram que o uso de correlações empíricas para a determinação de  $E$

devem estar referenciadas ao local de estudo e ao tipo de solo em análise, para dessa forma, minimizar os erros envolvidos no processo.

Uma forma de estimar esse parâmetro é apresentada por TEIXEIRA e GODOY (1996) dada pela equação (14):

$$E = \alpha K N_{\text{SPT}} (\text{MPa}) \quad (14)$$

Onde o  $N_{\text{SPT}}$  é o resultado do ensaio da sondagem à percussão obtido nos boletins de sondagem, K e  $\alpha$  são coeficientes que variam em função do tipo de solo conforme apresentados nas tabelas 5 e 6:

Tabela 5 - Valores de K

| Solo                  | K (MPa) |
|-----------------------|---------|
| Areia com pedregulhos | 1,1     |
| Areia                 | 0,9     |
| Areia siltosa         | 0,7     |
| Areia argilosa        | 0,55    |
| Silte arenoso         | 0,45    |
| Silte                 | 0,35    |
| Argila arenosa        | 0,3     |
| Silte argiloso        | 0,25    |
| Argila siltosa        | 0,2     |

Fonte: Teixeira e Godoy (1996)

Tabela 6 - Valores de  $\alpha$

| Solo   | $\alpha$ |
|--------|----------|
| Areia  | 3        |
| Silte  | 5        |
| Argila | 7        |

Fonte: Teixeira e Godoy (1996)

#### b) Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )

O coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) é definido pela relação entre a deformação transversal relativa e a deformação longitudinal relativa. É uma grandeza sem dimensões. Para cada tipo de solo, esse parâmetro tem valores típicos, conforme apresentado na Tabela 7:

Tabela 7 - Valores típicos do coeficiente de Poisson

| Solo                | $\nu$       |
|---------------------|-------------|
| Argila Saturada     | 0,40 - 0,50 |
| Argila Não Saturada | 0,10 - 0,30 |
| Argila Arenosa      | 0,20 - 0,30 |
| Silte               | 0,30 - 0,35 |

Fonte: BOWLES (1988)

Vale ressaltar que, pelo mesmo motivo que ocorrem variações no módulo de elasticidade na bibliografia, outros autores fornecem valores diferentes do Coeficiente de Poisson para o mesmo tipo de solo.

c) O Módulo de Cisalhamento (G)

É definido como a razão entre a tensão de cisalhamento atuante em um material e sua deformação específica, sendo que, para materiais isotrópicos, ele pode ser relacionado com o Módulo de Elasticidade (E) e com o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) pela equação (15) abaixo:

$$G = \frac{E}{2(\nu + 1)} \left( \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) \quad (15)$$

#### 2.1.5 Distribuição de Tensões ao Longo da Profundidade do Solo

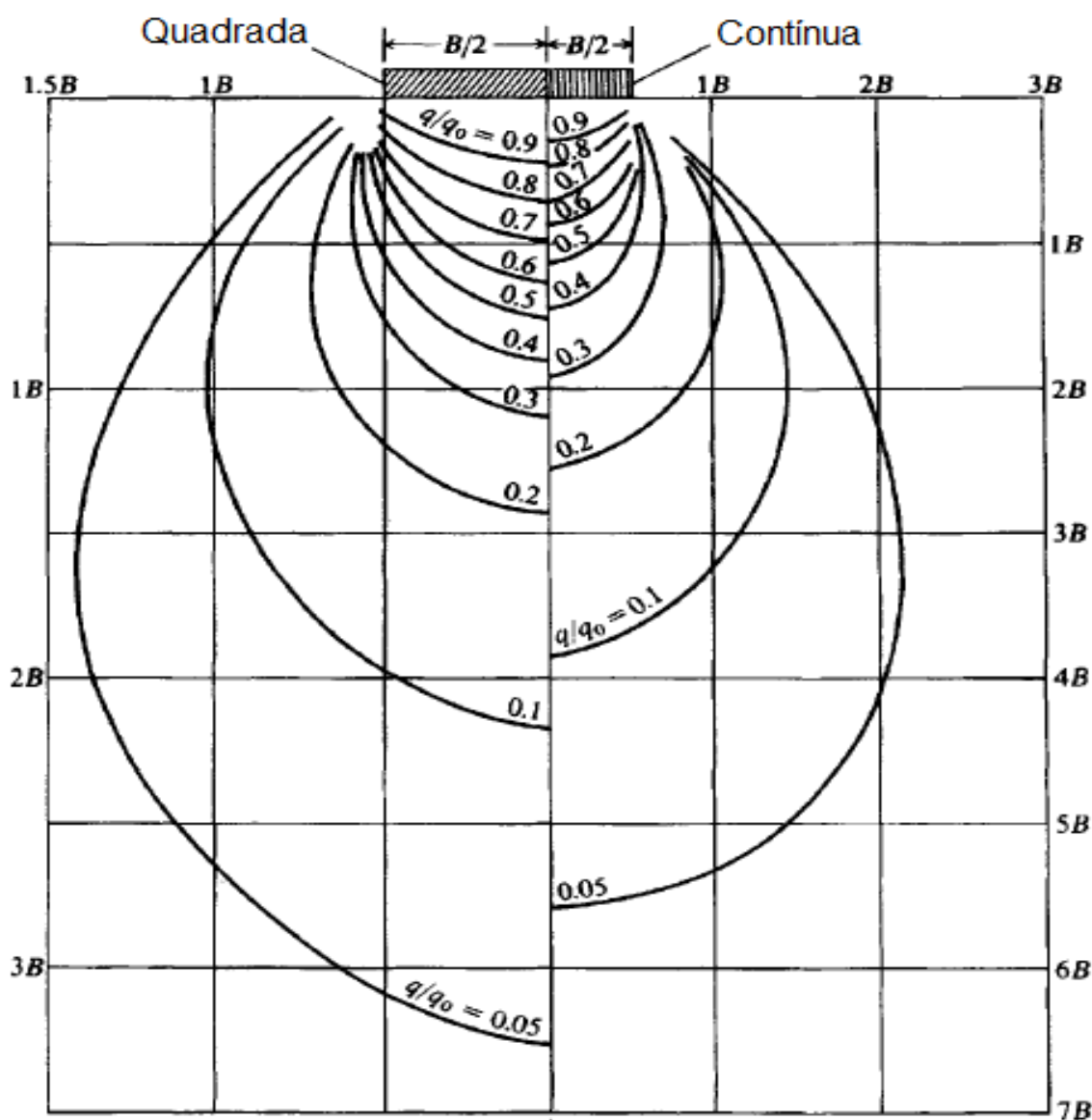
Para uma análise mais precisa da distribuição de tensões no solo devidas às cargas atuantes nos elementos de fundação são necessários vários ensaios de campo (PORTO, 2010), mas na ausência desses ensaios sugere-se a utilização da distribuição proposta por BOWLES (1988) que utiliza como base a equação de Boussinesq para placas quadradas e corridas. Essa distribuição está detalhada no bulbo de tensões apresentado na Figura 13.

Com base nesse bulbo, pode-se dizer que os elementos de fundação mobilizam o solo, ou seja, deforma o mesmo até a uma profundidade média de duas vezes a menor largura da fundação (B). Abaixo dessa profundidade a influência das cargas de fundação no solo tende a zero.

Para a análise da distribuição de tensões no maciço geotécnico, as aproximações baseadas no “modelo de Winkler” não são satisfatórias, por não considerarem a continuidade do maciço.

Para uma representação mais realista do solo é necessário modelar o maciço como uma malha de molas ou como um meio contínuo. A modelagem pode ser realizada por meio de métodos numéricos como, por exemplo, o método dos elementos finitos (MEF). Esses tipos de modelo de representação do conjunto geotécnico e estrutural apresentam vantagens em relação aos modelos que não consideram a continuidade do solo, com o modelo de Winkler.

Figura 13 - Bulbo de tensões baseado na equação de Boussinesq.



Fonte: BOWLES (1988)

FRUTOSO et al. (2016) analisaram o comportamento de fundações superficiais em sapata de um edifício por meio da modelagem tridimensional do sistema estrutural solo-fundação superficial via MEF. Os resultados obtidos por FRUTOSO et al. (2016) foram comparados com os valores de recalque calculados por meio da teoria da elasticidade, que considera o solo um material linear elástico (método analítico). A comparação entre os dois métodos mostrou que os recalques encontrados pelo método numérico foram maiores que os valores encontrados pelo método analítico. Esse resultado era esperado, uma vez que o cálculo de recalque pelo método analítico é feito para cada fundação isoladamente, sem considerar a influência das tensões provocadas pelas sapatas vizinhas. Por outro lado, no MEF, os recalques são estimados levando em consideração o conjunto carregamento-fundação-solo, simultaneamente para todas as sapatas.

FUCHS e ASSIS (2017) realizaram a análise de um pórtico plano sob três óticas de apoio distintas. Na análise foram considerados: apoios teóricos indeslocáveis, apoios tipo “mola de Winkler”, que não considera a influência que uma fundação causa na outra e, por fim, a estrutura assentada sob um modelo de “molas contínuas”, ou seja, uma malha de molas que leva em consideração essa influência. Em relação aos esforços na estrutura, foram observadas grandes diferenças entre o modelo teórico e os dois modelos de molas, não havendo grandes diferenças entre esses dois últimos. Já em relação aos deslocamentos foram observadas as maiores divergências entre os três modelos, aonde os modelos de mola apresentaram deslocamentos maiores que o modelo teórico, e entre os modelos de mola, aquele com molas contínuas apresentou maiores recalques verticais absolutos.

A partir do referencial teórico anteriormente citado, observou-se que os modelos teóricos de representação numérica do solo para análise da ISE mais difundidos são os modelos discretos, que são aqueles que representam o solo por um conjunto de elementos isolados ligados pelos nós.

## 2.2 ANÁLISE EM TEORIA DE SEGUNDA ORDEM DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO

Nas últimas décadas, as estruturas desenvolvidas pela engenharia civil vêm sendo modeladas para vencer grandes vãos, atingir alturas elevadas e, dessa forma, tem ocorrido aumento da esbeltez. O aperfeiçoamento das técnicas de produção levou a melhoria da resistência do aço, elevando seu patamar de escoamento, entretanto, sem alterar seu módulo de elasticidade, o que vem resultando em estruturas cada vez mais suscetíveis a instabilidade. Para se adequar a esse processo de desenvolvimento, são necessárias técnicas mais refinadas e precisas de análise, (CHAN e ZHOU, 1998).

As estruturas quando submetidas a um determinado conjunto de esforços apresentam um comportamento não linear desde o início do carregamento. Esse comportamento não linear resulta da consideração do equilíbrio da estrutura na posição deslocada (não linearidade geométrica) e/ou da consideração dos materiais apresentarem leis constitutivas não lineares (não linearidade do material).

### 2.2.1 Linearidade e Não Linearidade Física

O fato de se considerar ou não a plastificação das barras na análise da estrutura permite fazer a distinção entre os conceitos de linearidade e não linearidade física. A *linearidade física* refere-se à proporcionalidade entre as tensões e as deformações, dos materiais que obedecem a lei de Hooke. Quando não existe essa proporcionalidade entre as tensões e deformações, ocorre a *não linearidade física* SILVA (2004). A não linearidade do material é representada pela perda da rigidez das barras, à medida que parte ou todo o material de uma seção entra em escoamento.

### 2.2.2 Linearidade e Não Linearidade Geométrica

O fato de se considerar a geometria indeslocada ou deslocada das estruturas permite classificar, teoricamente, as análises em teoria de 1ª ordem ou teoria de 2ª ordem. Numa *análise em teoria de 1ª ordem*, o equilíbrio da estrutura é formulado considerando-a na sua posição indeslocada ou original. Nesta análise, os

deslocamentos são pequenos e não afetam o equilíbrio da estrutura, sendo válida a hipótese de pequenos deslocamentos (SILVA, 2004).

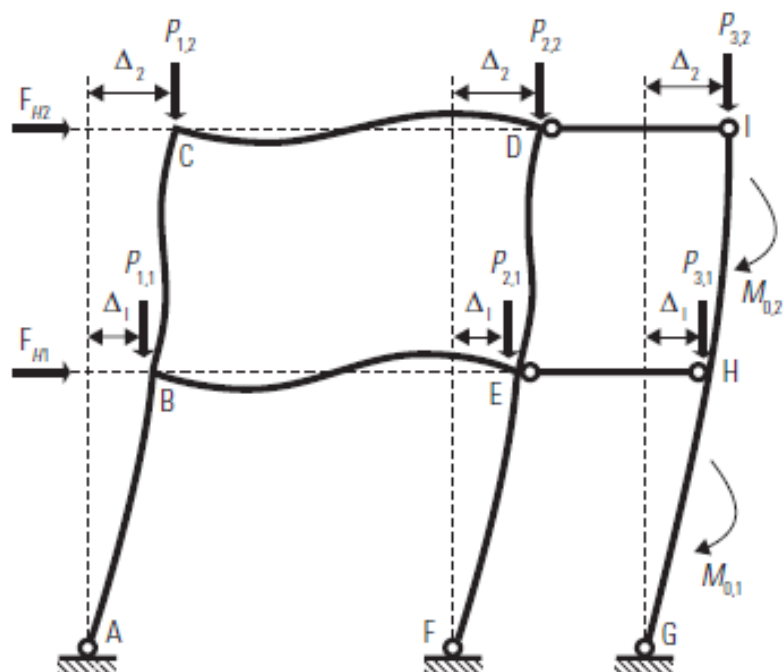
Na *análise em teoria de 2ª ordem* o equilíbrio é formulado considerando a estrutura na sua posição deslocada. Nesta análise, os deslocamentos afetam o equilíbrio da estrutura, e pode ser feita tanto em regime de pequenos deslocamentos, quanto no regime de grandes deslocamentos. Vale lembrar que, o estudo da estabilidade de qualquer estrutura só pode ser realizado em teoria de 2ª ordem (SILVA, 2004).

A *linearidade geométrica* refere-se à proporcionalidade entre os esforços aplicados e os deslocamentos, angulares ou lineares, provocados na estrutura. Portanto, uma análise é considerada geometricamente linear quando realizada em teoria de 1ª ordem e geometricamente não linear quando realizada em teoria de 2ª ordem.

Conforme afirma RODRIGUES (2005), a análise não linear geométrica de uma estrutura é necessária quando a configuração do sistema deformado apresenta diferenças significativas em relação a sua configuração inicial, de modo que o acréscimo das forças internas, em relação a geometria não deformada, não possam ser menosprezados.

Devido à força normal a que são submetidas as barras de pórticos, momentos e deslocamentos de 2ª ordem surgem na estrutura e são adicionados aos momentos e deslocamentos de 1ª ordem. Em geral, pelo menos dois tipos de efeitos de 2ª ordem são definidos: o efeito  $N-\delta$  e o efeito  $P-\Delta$ . Esses efeitos causam deformação e aumento de tensão na barra, reduzindo consequentemente a sua resistência e desestabilizando a estrutura. O efeito global, conhecido como P-delta, estabelece o equilíbrio da estrutura em sua configuração deformada levando em conta os deslocamentos horizontais relativos das extremidades das barras, conforme mostrado na Figura 14 (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016).

Figura 14 - Efeito P-Delta na estrutura



Fonte: FAKURY, SILVA e CALDAS (2016)

O efeito local de 2ª ordem, conhecido como N-deltinha, fornece as respostas decorrentes da configuração deformada de cada barra da estrutura devido à ação de sua própria força axial conforme pode ser visto na Figura 15 (FAKURY, SILVA e CALDAS, 2016).

Figura 15 – Efeito N-deltinha na barra



Fonte: FAKURY, SILVA e CALDAS (2016)

Os efeitos “P-Delta” e “N-deltinha” podem ser avaliados por meio de uma análise rigorosa de segunda ordem ou por expressões aproximadas que levam em conta a amplificação dos esforços solicitantes. Conforme LEAL (2014), os métodos aproximados se baseiam na amplificação dos esforços solicitantes obtidos a partir da majoração dos resultados da análise linear geométrica, ou pela avaliação dos elementos estruturais em sua configuração deformada aproximada. Podem-se citar os métodos aproximados da amplificação dos esforços solicitantes (MAES), presente na ABNT NBR 8800:2008 e da Força Lateral Equivalente ou Fictícia (Método P-Delta). Já os métodos geometricamente exatos avaliam o sistema estrutural deformado por meio de teorias geometricamente exatas, onde as formulações matemáticas não possuem nenhuma restrição cinemática, sendo consistentes e adequadas para estruturas sujeitas a grandes deslocamentos e grandes rotações.

A análise não linear geométrica deve ser usada sempre que os deslocamentos afetarem de forma considerável os esforços internos. Essa análise pode ser baseada considerando-se os métodos geometricamente exatos ou por métodos aproximados.

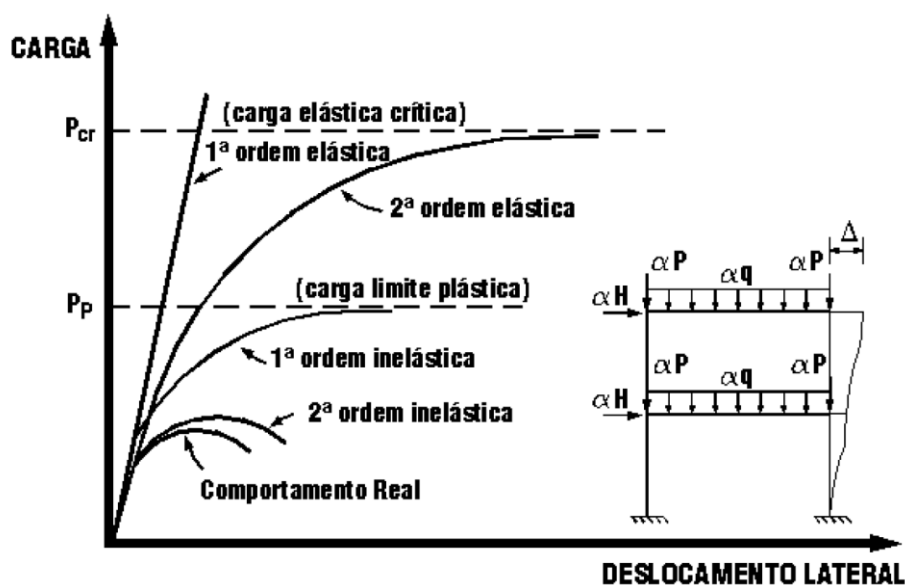
A consideração da não linearidade geométrica torna-se importante, uma vez que fenômenos que não ocorrem em sistemas lineares são considerados, como por exemplo, a existência de múltiplas configurações de equilíbrio (estáveis e instáveis) e de pontos críticos (limite e bifurcação) ao longo do caminho não linear de equilíbrio, (PEREIRA, 2002).

RIBEIRO; ALMEIDA; PAIVA, (2011) fizeram a comparação dos esforços solicitantes de uma edificação de múltiplos andares para modelos com interação solo-estrutura considerando as análises linear e não linear geométrica (NLG) e confirmaram a importância do emprego de uma teoria que incluía a NLG na análise.

### 2.2.3 Tipos de Análises

A Figura 16 mostra as curvas carga x deslocamento lateral de um pórtico plano rígido submetido a carregamentos estáticos, para cada tipo de análise.

Figura 16 - Tipos de Análise



Fonte: SILVA (2004)

**Análise Elástica de Primeira Ordem:** Esta análise considera a linearidade física e geométrica. O material é modelado como elástico linear e o equilíbrio da estrutura é formulado considerando sua posição indeformada. A análise considera a hipótese dos pequenos deslocamentos e o princípio da superposição dos efeitos é pode ser utilizado. A análise não fornece informações sobre a influência da plasticidade e da estabilidade no comportamento dos pórticos.

**Análise Elástica de Segunda Ordem:** Esta análise considera a não linearidade geométrica. O material é modelado como elástico linear e o equilíbrio da estrutura é formulado considerando sua posição deslocada. Conforme mostra a Figura 16, a carga crítica elástica ( $P_{cr}$ ) da estrutura é obtida. A análise não fornece informações da resistência inelástica real do pórtico.

**Análise Inelástica de Primeira Ordem:** Esta análise considera a não linearidade física e a linearidade geométrica. O material é modelado como inelástico e o equilíbrio da estrutura é formulado considerando sua posição indeslocada. A análise considera os efeitos da plastificação das barras, os quais podem ser representados desde os modelos mais simples de rótulas plásticas até modelos mais complexos que consideram a propagação do escoamento ao longo do comprimento das barras e na altura da seção transversal. Para um material elastoplástico perfeito, a curva carga x deslocamento aproxima-se assintoticamente da carga limite plástica ( $P_p$ ).

**Análise Inelástica de Segunda Ordem:** Esta análise considera a não linearidade física e a não linearidade geométrica. O material é modelado como inelástico e o equilíbrio da estrutura é formulado considerando a estrutura na sua posição deslocada. A carga limite obtida por meio dessa análise é a que mais se aproxima da resistência real.

No presente trabalho, as análises estruturais elásticas de 1ª e de 2ª ordem elástica serão realizadas com o auxílio do programa computacional SAP 2000 visando o estudo das estruturas de aço e a consideração da rigidez do solo junto às fundações. O software considera a análise elástica de 2ª ordem por meio do método P-delta, válido para pequenos deslocamentos. Esse método é apresentado a seguir.

#### 2.2.4 Método P-Delta

O método P-Delta é um procedimento simplificado para análise elástica de segunda ordem de pórticos planos. Com a incidência das forças laterais atuantes, os nós da estrutura sofrem deslocamentos denominados de 1ª ordem. As forças verticais aplicadas nesses nós, agora deslocados, provocam o aparecimento de novos esforços, que causam novos deslocamentos, e assim sucessivamente. Esses esforços e deslocamentos adicionais são obtidos pelo chamado método P-Delta. O processo é iterativo, no qual se buscam novas condições de equilíbrio para a estrutura.

O sistema da Figura 17 apresenta forças laterais e verticais aplicadas nos nós. Com os deslocamentos laterais resultantes, calculados de uma análise em teoria de 1ª ordem, determinam-se os deslocamentos relativos entre pavimentos. Considerando-se a estrutura deformada, a cortante fictícia,  $V'_i$ , no andar  $i$ , resultante do efeito P- $\Delta$ , é dada pela equação (16):

$$V'_i = \frac{\sum P_i}{h_i} (\Delta_{i+1} - \Delta_i) \text{ (kN)} \quad (16)$$

onde,

$\sum P_i$ : o somatório das forças normais nos pilares do andar  $i$ , inclusive nos pilares que não pertençam ao sistema resistente a cargas horizontais (kN);

$h_i$ : altura do andar  $i$  (m);

$\Delta_{i+1}$ ,  $\Delta_i$ : os deslocamentos horizontais dos níveis  $i+1$  e  $i$ , respectivamente (m).

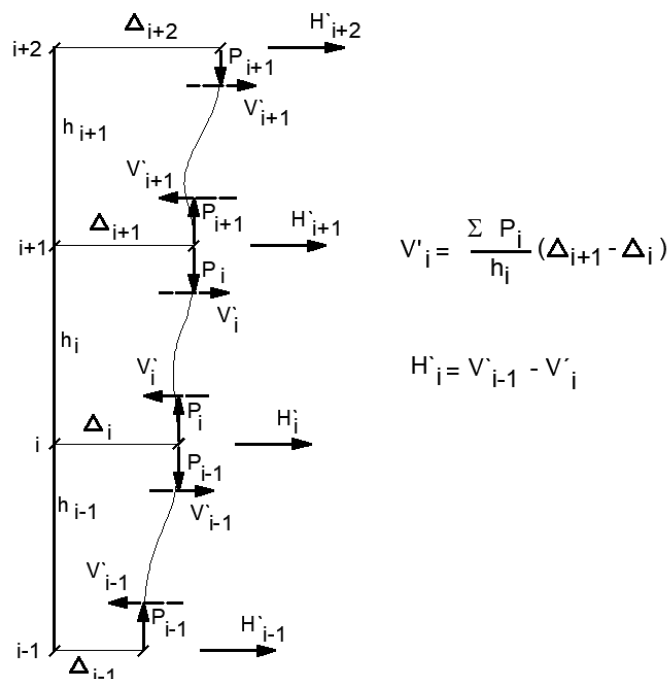
A força lateral fictícia,  $H'_i$ , no nível  $i$ , é calculada pela equação (17):

$$H'_i = V'_{i-1} - V'_i \text{ (kN)} \quad (17)$$

Essa força lateral fictícia deve ser somada a uma outra carga lateral inicial que poderá existir no mesmo nível, resultando nas forças horizontais modificadas, com as quais é feita a análise seguinte. Novos deslocamentos são obtidos e novas forças horizontais fictícias são determinadas, dando-se continuidade ao processo. Portanto, esse processo é iterativo uma vez que após cada análise, a força lateral fictícia difere da força do ciclo anterior devido às variações nos deslocamentos. O método converge quando o deslocamento  $\Delta_i$  apresentar um valor praticamente igual àquele do ciclo anterior o método converge. As forças e os momentos resultantes incluindo o efeito P- $\Delta$  são obtidos.

Em estruturas elásticas que apresentam uma rigidez adequada, o método converge geralmente após um ou dois ciclos de iteração. Se após cinco ciclos de iteração os resultados não convergirem a estrutura é considerada excessivamente flexível. O processo pode ser interrompido quando os deslocamentos de uma dada iteração não excederem em mais de 5% os da iteração anterior (SILVA, 2004).

Figura 17 - Efeitos P-Delta



Fonte: Adaptado de SILVA (2004)

### 3.0 METODOLOGIA

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

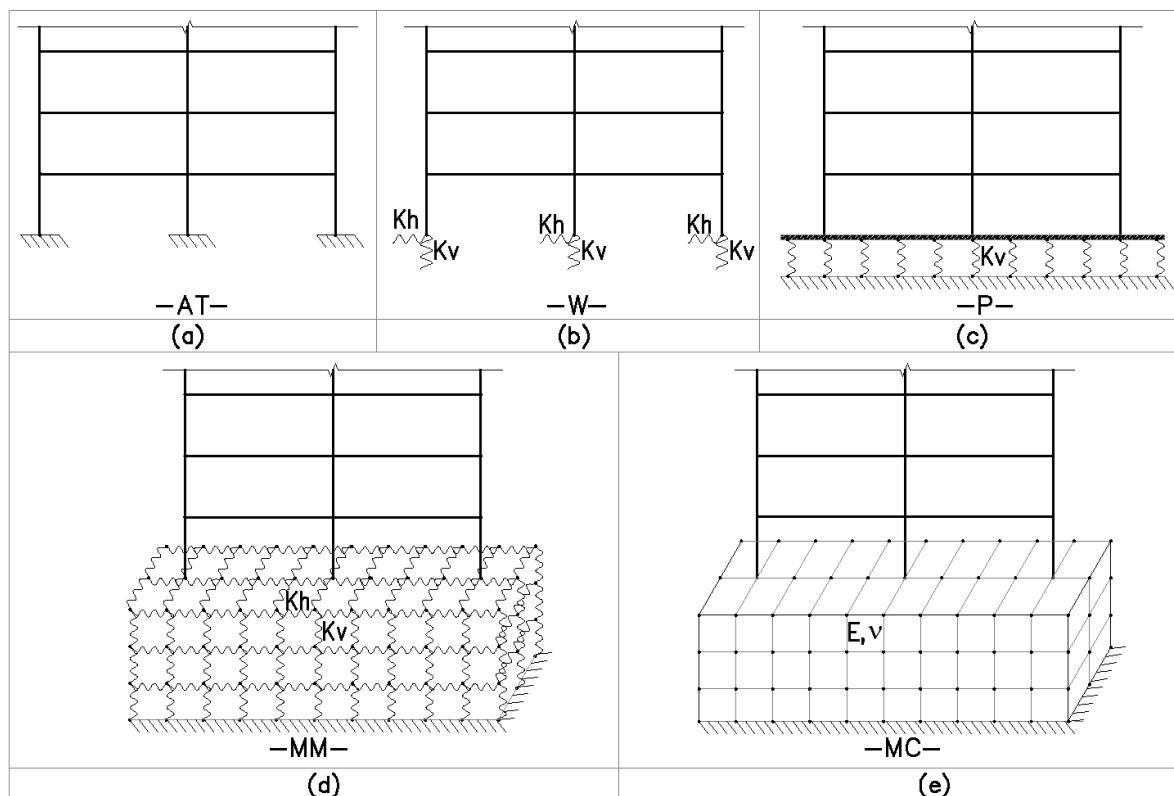
Conforme critério de classificação de GERHARDT; SILVEIRA (2009), a pesquisa realizada no presente trabalho é de natureza básica, ou seja, não tem finalidade imediata, mas produz conhecimentos que podem ser utilizados em outras pesquisas. A pesquisa apresenta caráter exploratório, uma vez que será realizada por meio de análises de modelos utilizados nos estudos de caso apresentados, de forma a obter mais informações sobre o tema proposto com abordagem quantitativa em termos de comparação dentre os modelos analisados.

#### 3.2 PROPOSTA DA PESQUISA

A proposta dessa pesquisa consiste em analisar cinco tipos de modelos estruturais para pórticos planos de aço com três alturas diferentes, sendo o primeiro considerando apoios teóricos **(AT)** com vínculos do tipo engaste perfeito – (Figura 18-a) e, os demais com a consideração da ISE por meio de quatro procedimentos:

- a) Baseado na teoria de Winkler **(W)** – (Figura 18-b);
- b) Baseado na teoria de Pasternak **(P)** – (Figura 18-c);
- c) Considerando-se uma malha de molas contínuas **(MM)** – (Figura 18-d);
- d) Considerando-se a modelagem do solo como um meio contínuo **(MC)** – (Figura 18-e).

*Figura 18 - Tipos de Apoios para os pórticos*

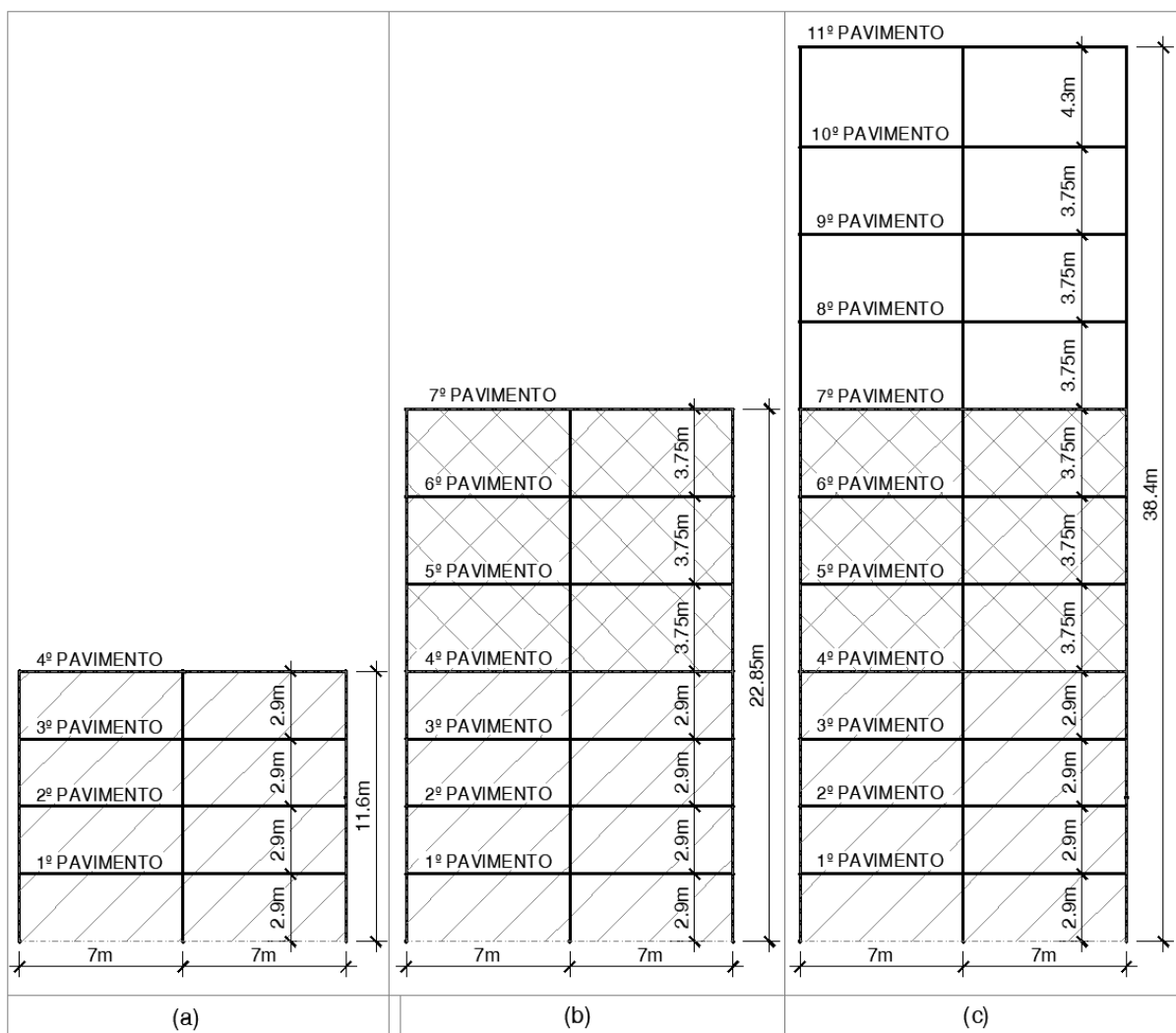


Fonte: do Autor

### 3.3 SEQUÊNCIA EXECUTIVA

As estruturas serão definidas variando-se o número de pavimentos de um pórtico plano já estudado em outros trabalhos. Três pórticos serão analisados, sendo o primeiro com 4 pavimentos e 2 vãos, o segundo com 7 pavimentos e 2 vãos e, por fim, o pórtico completo com 11 pavimentos e 2 vãos, conforme mostrado na Figura 19, onde são também indicados os comprimentos dos vãos das vigas e as alturas dos andares.

*Figura 19 - Pórticos Planos de Aço com três alturas diferentes (a) 4 andares (b) 7 andares e (c) 11 andares*



Fonte: do Autor

Os pórticos serão investigados levando-se em conta a análise elástica em teoria de 2ª ordem por meio do método P-delta, disponível no software comercial SAP2000, considerando-se as seguintes etapas:

1º) Os parâmetros do solo serão definidos, tais como o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a tensão admissível, utilizando-se de correlações e tabelas de valores típicos encontradas na bibliografia para um boletim de sondagem escolhido;

2º) A primeira modelagem e a análise serão feitas para o pórtico de 11 pavimentos, considerando elementos de barra e apoios teóricos (engaste perfeito) de forma a obter as reações de apoio para cálculo das sapatas de fundação;

3º) As sapatas serão dimensionadas considerando todas as recomendações prescritas pela NBR 6122:2010;

4º) Com as dimensões das sapatas definidas, será possível encontrar o valor de  $K_v$  (coeficiente de recalque vertical ou mola) utilizando as correlações listadas na revisão bibliográfica para uma média ponderada dos valores das camadas do solo sob as sapatas. Para tais definições serão levados em consideração os fatores de forma da fundação e a área de influência do bulbo de tensões sob esta fundação;

5º) No pórtico modelado anteriormente será feita substituição dos apoios teóricos por sapatas modeladas com elementos de placa apoiadas sobre molas de Winkler cuja rigidez é uma média das rigidezes das camadas de solo que estão dentro do bulbo de tensões;

6º) Para o mesmo pórtico, será feita a substituição das molas de Winkler por uma camada de molas de Winkler com os mesmos valores adotados no passo anterior, mas ligadas na extremidade superior por uma placa constituída de elementos incompressíveis verticalmente com liberação apenas de deformações transversais de cisalhamento e na extremidade inferior serão engastadas simulando uma camada rígida conforme proposto por Pasternak (1954);

7º) Para o mesmo pórtico, será feita a substituição das molas de Winkler por uma malha de molas contínuas com a rigidez das molas correspondente a rigidez de cada camada de solo distantes em todas as direções em 1 metro formando cubos de  $1m^3$ ;

8º) Para o mesmo pórtico, será feita a substituição das molas sob as sapatas por um meio contínuo utilizando elementos sólidos, também com dimensões de 1m em todas as direções formando cubos de  $1m^3$ , com as propriedades  $E$  e  $\nu$  já definidas para cada camada do solo apresentado no boletim de sondagem.

9º) A partir dos modelos descritos anteriormente para o pórtico de 11 pavimentos, serão analisados outros dois pórticos, com 7 e com 4 pavimentos, apenas excluindo os pavimentos superiores e adotando os mesmos elementos de fundação e propriedades geotécnicas;

10º) Conforme descrito nas etapas acima, serão realizadas análises em teoria de segunda ordem utilizando o efeito P-Delta em 15 modelos, com o objetivo de obter os

esforços solicitantes para cada situação e os recalques apresentados nos modelos que consideram a ISE.

11º) Resultados comparativos de esforços solicitantes e de deslocamentos serão apresentados em forma de tabelas e gráficos para cada pórtico com as cinco situações de apoios.

12º) Será analisada a influência do aumento do número de pavimentos, ou seja, do aumento da rigidez da superestrutura nos recalques verticais, considerando os pórticos com 3 alturas diferentes.

13º) Será feita uma discussão dos resultados, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

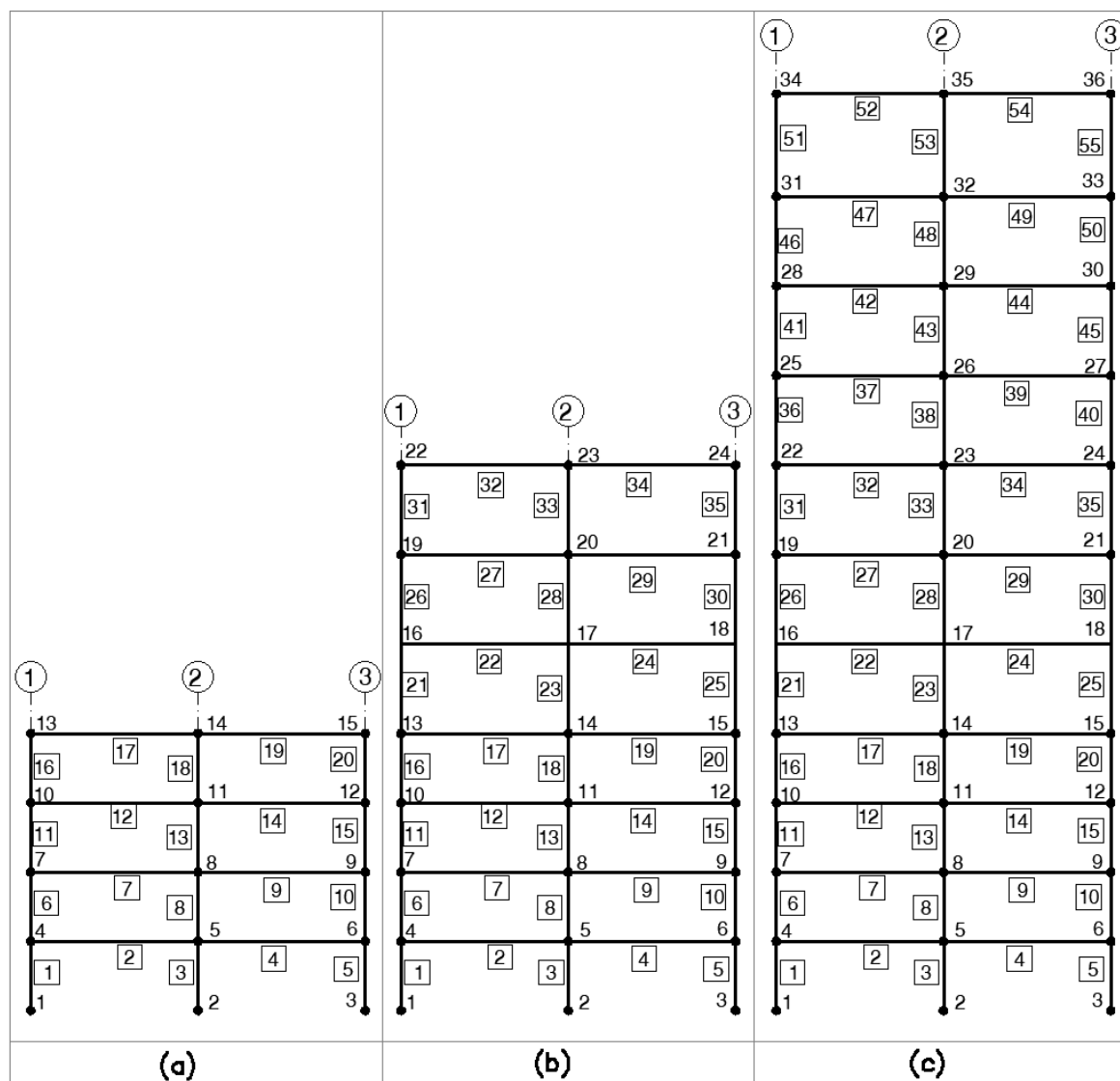
### 3.4 DEFINIÇÃO DO PÓRTICO DE AÇO

O pórtico tomado como referência, de 11 andares e 2 vãos, foi previamente estudado por SILVA (2004) quanto a diversos métodos de análise não linear, aproximadas e rigorosa, utilizando o software PPLANLEP desenvolvido por LAVALL (1996).

No presente trabalho, esse pórtico será remodelado no software SAP2000 para análise de segunda ordem utilizando o método P-Delta e, nesse mesmo software, serão feitas as análises de ISE, além da variação do número de andares, conforme descrito anteriormente, visando avaliar a influência dos recalques do solo nos esforços solicitantes das estruturas e nos deslocamentos laterais.

A Figura 20 mostra os três pórticos não contraventados de 4, 7 e 11 andares com a numeração dos nós e das barras.

Figura 20 - Numeração das barras e nós para os pórticos de 2 vãos não contraventados (a) 4 andares (b) 7 andares (c) 11 andares



Fonte: Adaptado de SILVA (2004)

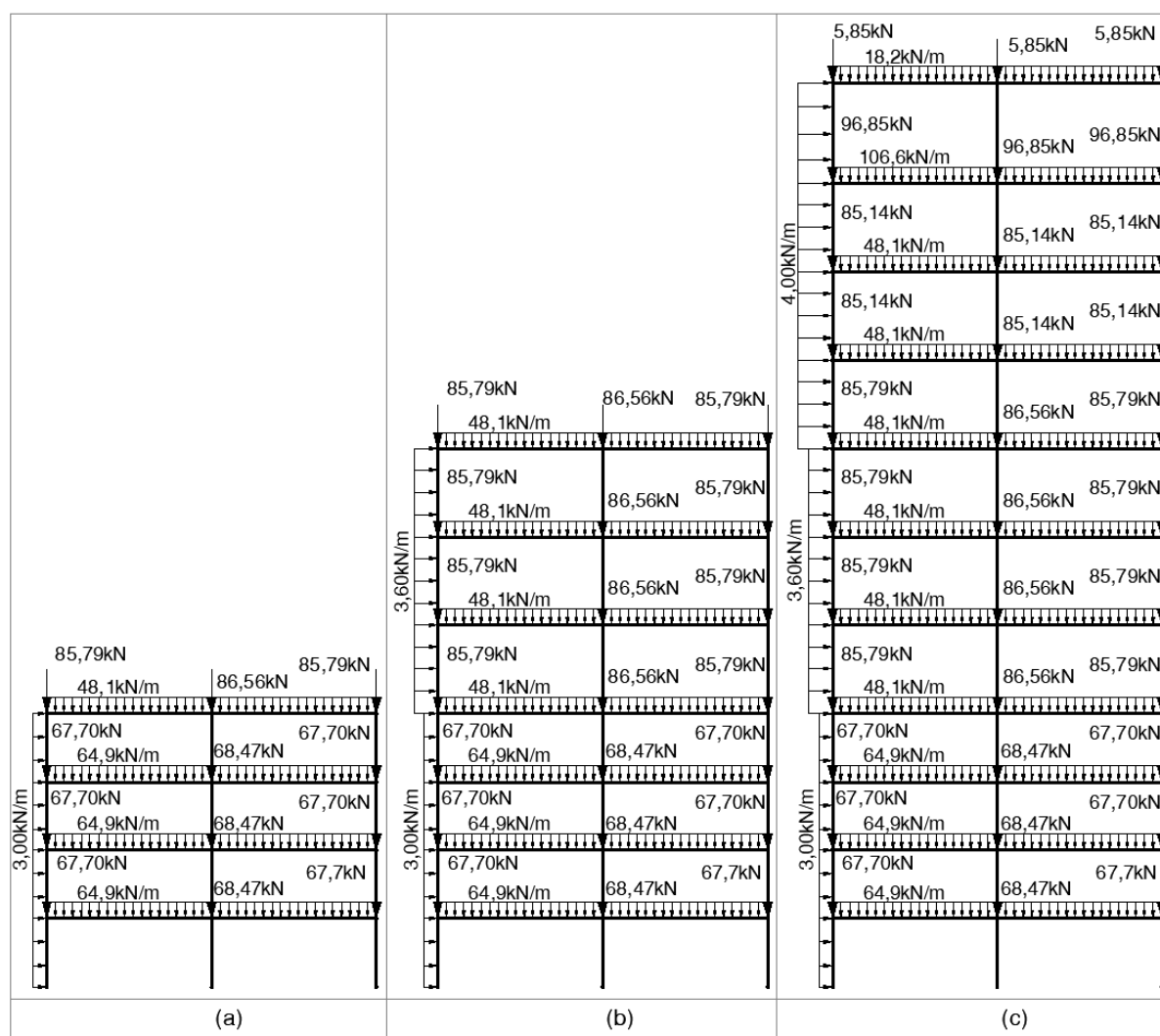
Os perfis adotados são de padrão americano e estão indicados na Tabela 8. A Figura 21 mostra o carregamento vertical de cálculo concentrado nos pilares e distribuído nas vigas e o carregamento horizontal de cálculo devido à ação do vento, para os pórticos de 4, 7 e 11 andares e 2 vãos.

Tabela 8 - Perfis adotados para os pilares e vigas do Pórtico Tipo 1

| Barras do Pórtico (Frames)                                                                                | Tipo de Elemento                                 | Perfis Utilizados        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------|
| 1 / 6 / 11 / 16 / 5 / 10 / 15 / e 20                                                                      | Pilares Externos<br>(1º ao 4º andar)             | PS 500 x 300 x 16 x 8    |
| 3 / 8 / 13 / 18                                                                                           | Pilares Internos<br>(1º ao 4º andar)             | PS 500 x 300 x 19 x 9,5  |
| 21 / 26 / 31 / 23 / 28 / 33 / 25 / 30 / 35                                                                | Pilares Externos e Internos<br>(5º ao 7º andar)  | PS 500 x 300 x 12,5 x 8  |
| 36 / 41 / 46 / 51 / 38 / 43 / 48 / 53 / 40 / 45 / 50 / 55                                                 | Pilares Externos e Internos<br>(8º ao 11º andar) | PS 500 x 300 x 9,5 x 6,5 |
| 2 / 4 / 7 / 9 / 12 / 14 / 17 / 19 / 22 / 24 / 27 / 29 / 32 / 34 / 37 / 39 / 42 / 44 / 47 / 49 / 52 / 54 / | Vigas                                            | W 530 x 66               |

Fonte: Adaptado de SILVA (2004)

Figura 21 - Carregamento de cálculo para os pórticos de (a) 4 andares, (b) 7 andares e (c) 11 andares - dois vãos



Fonte: Adaptado de SILVA (2004)

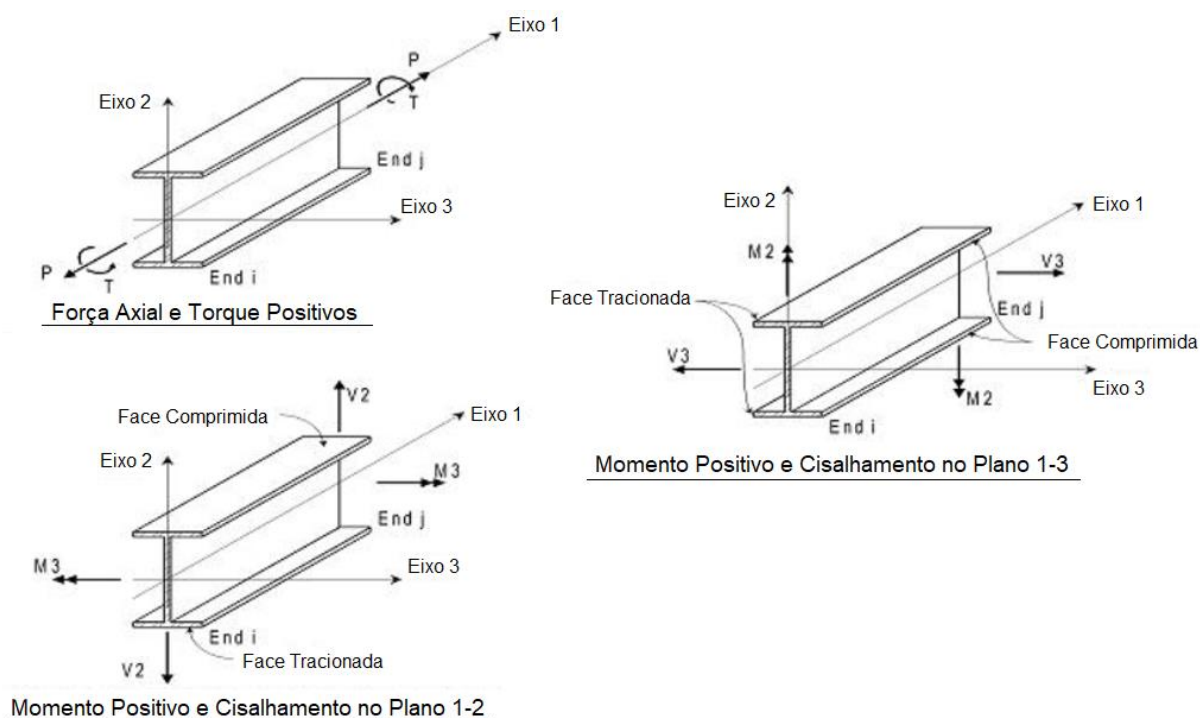
### 3.5 ANÁLISE E MODELAGEM PELO MEF

Para a análise estrutural, obtenção dos esforços solicitantes dos elementos estruturais dos pórticos de aço, elementos de fundação em concreto e o solo, será utilizado o software SAP2000, versão 15 que utiliza o MEF para análise estrutural de primeira e segunda ordens. Para analisar os esforços solicitantes no software utilizado, as seguintes convenções de sinais serão adotadas para cada tipo de elemento: barra (frame), shell (placa) e sólido (solid).

#### 3.5.1 Elementos de barra (frame)

Para a modelagem das vigas e dos pilares dos pórticos planos de aço em todos os modelos serão utilizados elementos de barra, cuja representação esquemática das direções positivas dos esforços internos está representado na Figura 22:

*Figura 22 - Sistema de coordenadas locais dos elementos de barra do SAP2000*



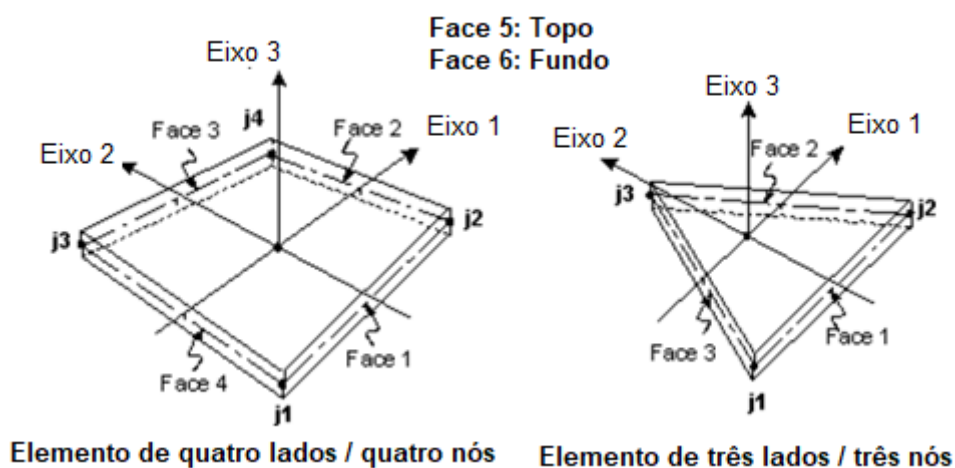
Fonte: Adaptado de SAP2000 (2018)

### 3.5.2 Elementos de placa (shell)

Para a modelagem das sapatas em todos os modelos de ISE e placa de cisalhamento no modelo de Pasternak serão utilizados elementos de placa, cuja representação esquemática das direções positivas dos esforços internos está representado na Figura 23.

Nesse tipo de elemento, o eixo 3 é sempre normal ao plano e é definido por 4 nós quando se trata de um elemento de placa retangular e 3 nós para elementos triangulares.

*Figura 23 - Sistema de coordenadas locais dos elementos de placa do SAP2000*

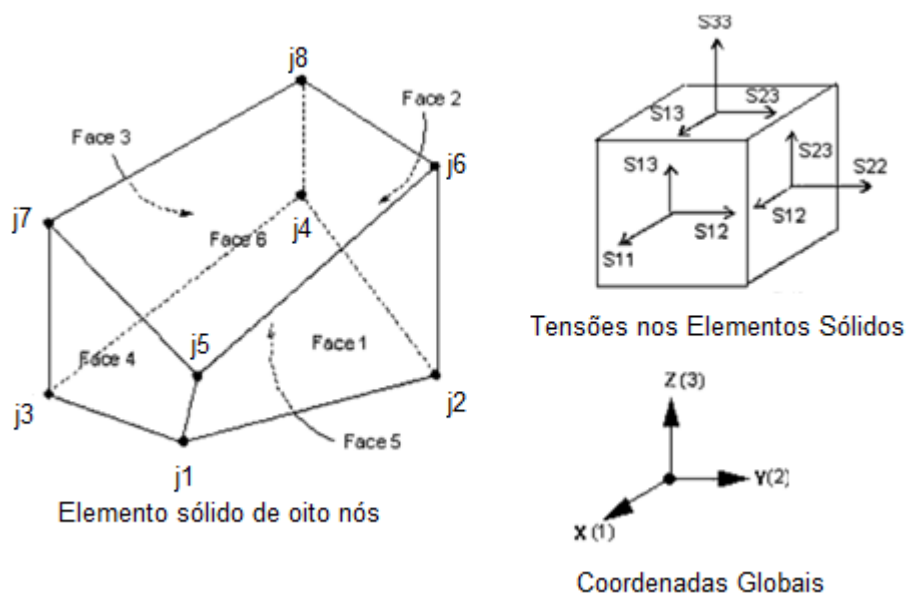


Fonte: Adaptado de SAP2000 (2018)

### 3.5.3 Elementos sólidos (solid)

Para a modelagem do solo no modelo de meio contínuo serão utilizados elementos sólidos, cuja representação esquemática das direções positivas dos esforços internos está mostrada na Figura 24. Esse tipo de elemento tem a forma prismática de um hexágono definida por 8 (oito) nós e seis faces.

Figura 24 - Sistema de coordenadas locais dos elementos sólidos do SAP2000



Fonte: Adaptado de SAP2000 (2018)

### 3.6 PARÂMETRO DE NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA: P-Delta

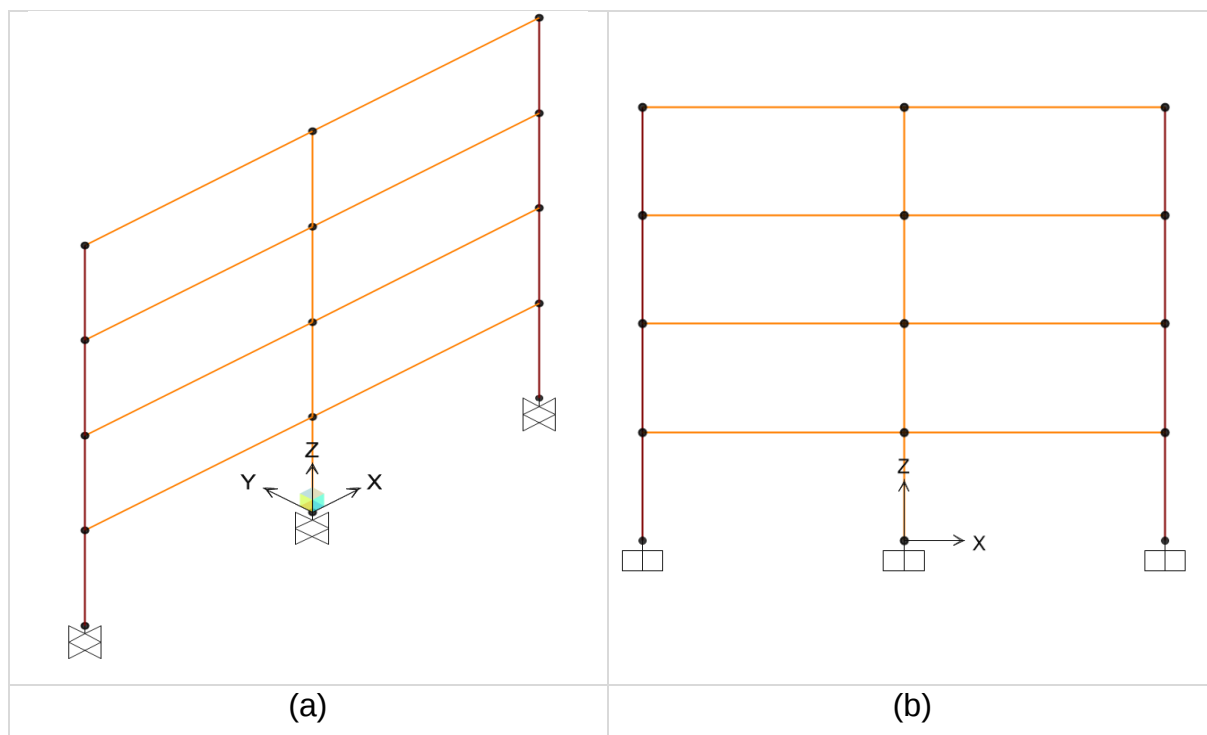
Na análise P-Delta do SAP2000, as equações de equilíbrio levam em conta a configuração deformada da estrutura. Para determinar as forças axiais decorrentes do efeito P-Delta nas estruturas reticuladas o software realiza uma análise iterativa. Primeiro as forças axiais são estimadas com base em uma análise preliminar da estrutura, estas forças são consideradas e resolvem-se novamente as equações de equilíbrio. Como este processo pode criar variações nas forças axiais, deve-se prosseguir com as iterações até que ocorra a convergência das forças axiais e as deflexões laterais. O procedimento de análise é baseado no uso da matriz de rigidez geométrica, (IGLESIA, 2016).

### 3.7 PARÂMETROS PARA O MODELO COM APOIOS TEÓRICOS

Os pórticos com apoios teóricos foram modelados utilizando elementos de barra e vínculos do tipo engaste, ou seja, com restrições em todas as direções.

Na Figura 25 está mostrado o pórtico modelado no software SAP2000 cujos apoios são com engaste perfeito, sendo em (a) uma vista em três dimensões e em (b) uma vista no plano xz.

Figura 25 – Pórtico com apoio teórico – Modelo extraído do software SAP2000



Fonte: do Autor

### 3.8 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO

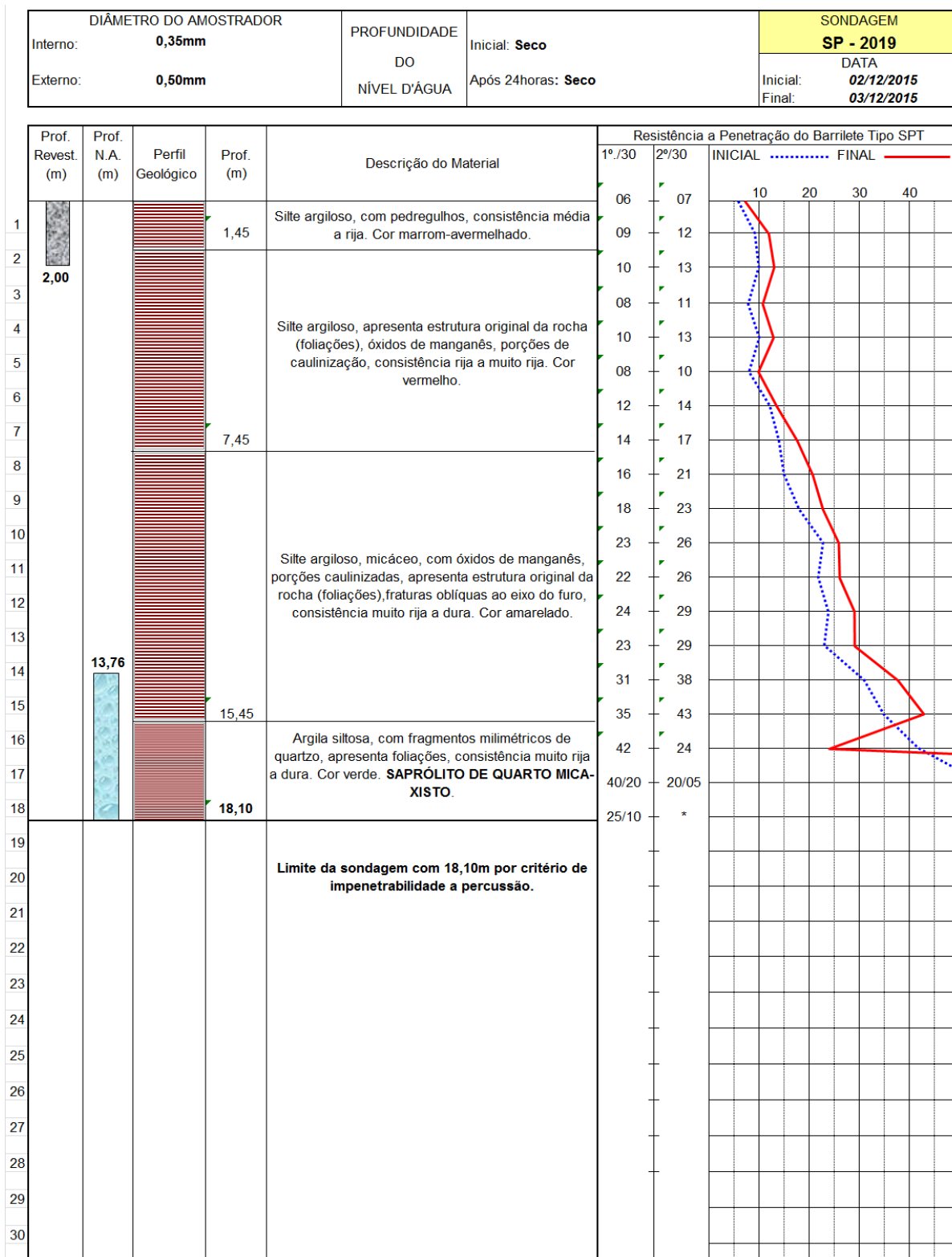
#### 3.8.1 Boletim de Sondagem

O relatório de sondagem selecionado para avaliação da ISE é apresentado na Figura 26. Trata-se de um solo residual, típico da localidade do estado do Pará.

Nessa sondagem observa-se que predomina o solo do tipo silte argiloso com resistência crescente ao longo da profundidade.

O nível d'água está a uma profundidade de quase 14 metros, o que não é um problema para a adoção de fundação direta do tipo sapata.

Figura 26 – Boletim de Sondagem



Fonte: do Autor

### 3.8.2 Parâmetros adotados para o Solo

Para a sondagem da Figura 26, utilizada como referência no desenvolvimento da ISE, foram determinados os parâmetros considerando para a definição do módulo de elasticidade a equação (14), que relaciona o  $N_{SPT}$  e os coeficientes  $\alpha$  e  $K$  obtidos na Tabela 6 e na Tabela 5 de TEIXEIRA e GODOY (1996). Para o coeficiente de Poisson, foram adotados os valores típicos conforme apresentado na Tabela 7 de BOWLES (1988) e para tensão admissível no solo, foi utilizada a equação (7) de MORAES. Na Tabela 9 estão apresentados os valores adotados:

*Tabela 9 - Parâmetros do solo adotados a partir da sondagem de referência*

| Prof.<br>(m) | Tipo de Solo   | $N_{SPT}$ | $\alpha$ | K<br>(MPa) | E ( $\alpha$ K $N_{SPT}$ )<br>(MPa) | $\nu$ | $\sigma_{adm}$ ( $N_{SPT}/5$ )<br>Mpa |
|--------------|----------------|-----------|----------|------------|-------------------------------------|-------|---------------------------------------|
| 1            | Silte Argiloso | 12        | 5        | 0,25       | 15,0                                | 0,3   | 0,24                                  |
| 2            | Silte Argiloso | 13        | 5        | 0,25       | 16,3                                | 0,3   | 0,26                                  |
| 3            | Silte Argiloso | 11        | 5        | 0,25       | 13,8                                | 0,3   | 0,22                                  |
| 4            | Silte Argiloso | 13        | 5        | 0,25       | 16,3                                | 0,3   | 0,26                                  |
| 5            | Silte Argiloso | 10        | 5        | 0,25       | 12,5                                | 0,3   | 0,20                                  |
| 6            | Silte Argiloso | 14        | 5        | 0,25       | 17,5                                | 0,3   | 0,28                                  |
| 7            | Silte Argiloso | 17        | 5        | 0,25       | 21,3                                | 0,3   | 0,34                                  |
| 8            | Silte Argiloso | 21        | 5        | 0,25       | 26,3                                | 0,3   | 0,42                                  |
| 9            | Silte Argiloso | 23        | 5        | 0,25       | 28,8                                | 0,3   | 0,46                                  |
| 10           | Silte Argiloso | 26        | 5        | 0,25       | 32,5                                | 0,3   | 0,52                                  |
| 11           | Silte Argiloso | 26        | 5        | 0,25       | 32,5                                | 0,3   | 0,52                                  |
| 12           | Silte Argiloso | 29        | 5        | 0,25       | 36,3                                | 0,3   | 0,58                                  |
| 13           | Silte Argiloso | 38        | 5        | 0,25       | 47,5                                | 0,3   | 0,76                                  |
| 14           | Silte Argiloso | 43        | 5        | 0,25       | 53,8                                | 0,3   | 0,86                                  |

Fonte: do Autor

### 3.9 DEFINIÇÃO DA FUNDAÇÃO

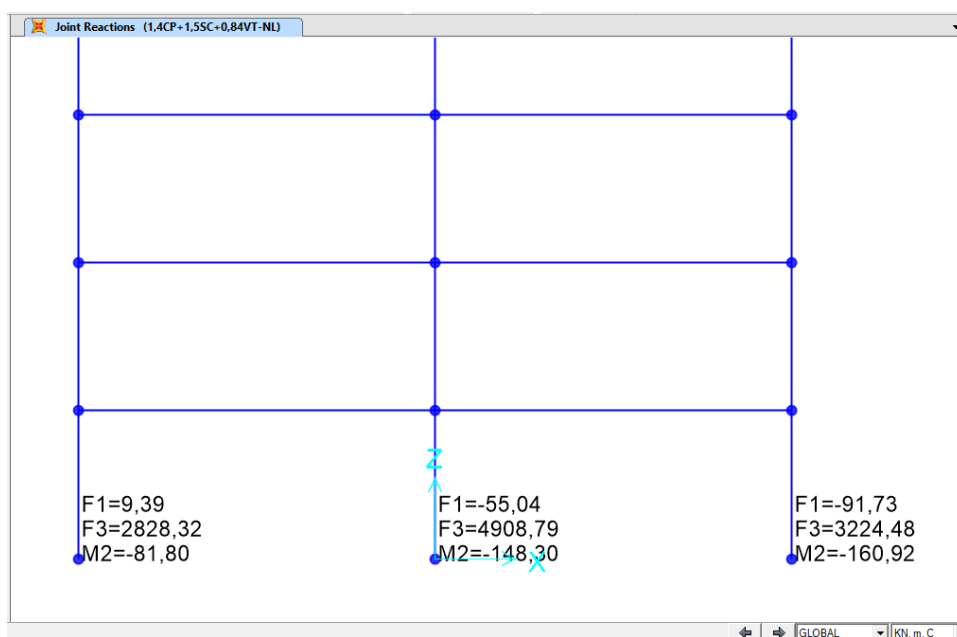
Para as estruturas propostas, será adotada fundação direta do tipo sapata isolada, considerando sua cota de assentamento na superfície do terreno.

Para definição das dimensões das sapatas, foi feita a modelagem do pórtico com apoio teórico e, com as reações de apoio será feita a verificação da estabilidade das sapatas, ou seja, se a porcentagem de área comprimida é maior ou igual a 2/3, reviramento e deslizamento maior ou igual a 1,5 e tensão atuante menor ou igual tensão admissível conforme NBR 6122:2010.

### 3.10 DIMENSIONAMENTO DAS SAPATAS DE FUNDAÇÃO

Para o dimensionamento das sapatas é necessário processar o modelo e extrair as reações de apoio, mostradas na Figura 27, que foram feitas para o pórtico de maior altura. Sendo, F1 a reação de apoio na direção x, F3 a reação de apoio na direção z e M2 o momento fletor em torno do eixo y (perpendicular a x).

Figura 27 - Reações de Apoio para o pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: do Autor

Para as reações de apoio determinadas, as sapatas foram dimensionadas e dois tamanhos definidos, considerando concreto com  $F_{ck} = 30\text{MPa}$ .

- Para os nós 1 e 3 (externos), sapatas quadradas de 4,0m e espessura de 1,25m, conforme resultados apresentados abaixo:

| Tensão máx.<br>(t/m <sup>2</sup> ) | Tensão mín.<br>(t/m <sup>2</sup> ) | Área Comprimida<br>(%) | Reviramento | Deslizamento |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|-------------|--------------|
| 25,86                              | 3,13                               | 100,00                 | 27,03       | 14,78        |

- Para o nó 2 (interno), sapata quadrada de 6,0m e espessura de 1,90m, conforme resultados apresentados abaixo:

| Tensão máx.<br>(t/m <sup>2</sup> ) | Tensão mín.<br>(t/m <sup>2</sup> ) | Área Comprimida<br>(%) | Reviramento | Deslizamento |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|-------------|--------------|
| 19,09                              | 17,68                              | 100,00                 | 78,51       | 43,76        |

### 3.11 PARÂMETROS PARA OS MODELOS ISE

#### 3.11.1 Parâmetros para o Modelo de Winkler (W)

Para a definição do coeficiente de reação vertical, ou coeficiente de mola de Winkler, serão utilizadas as correlações propostas por PERLOFF (1975) apud SOUZA e REIS (2008), que leva em consideração a menor largura da sapata, o fator  $l_w$  conforme Tabela 3 que depende da forma, da rigidez das sapatas e dos valores de  $E$  e  $\nu$ , que serão adotados os mesmos indicados na Tabela 9.

Como premissa, serão dimensionadas sapatas quadradas e rígidas, logo, os valores de  $l_w$  serão sempre iguais a 0,82. Para a definição do coeficiente de reação horizontal do solo,  $K_h$ , será utilizada a correlação proposta por BARKAN (1962) na equação (5). Para a determinação da rigidez das molas foi tomada uma média ponderada dos valores de  $K_v$  e  $K_h$  do solo, sendo considerado para tal ponderação a área de influência do bulbo de tensões, conforme Figura 13, transmitido ao solo pelas sapatas. Os coeficientes  $K_v$  e  $K_h$  dependem da geometria das sapatas, portanto, são apresentadas a seguir, duas tabelas: a Tabela 10 e a Tabela 11, para as sapata central e para as sapatas da extremidades, respectivamente.

*Tabela 10 - Valores de  $K_v$  e  $K_h$  – Sapata Central*

| Prof.<br>(m)                                                   | B<br>(m) | E<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $\nu$ | $l_w$ | $K_\tau$ | $C = \frac{E}{1 - \nu^2}$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $K_v = \frac{1}{B} \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{1}{l_w}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $K_h = \frac{K_\tau \times C}{\sqrt{A}}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------------------------------------------|----------|---------------------------|-------|-------|----------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1                                                              | 6        | 15000                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 16484                                             | 3350                                                                          | 2385                                                             |
| 2                                                              | 6        | 16250                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 17857                                             | 3630                                                                          | 2583                                                             |
| 3                                                              | 6        | 13750                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 15110                                             | 3071                                                                          | 2186                                                             |
| 4                                                              | 6        | 16250                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 17857                                             | 3630                                                                          | 2583                                                             |
| 5                                                              | 6        | 12500                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 13736                                             | 2792                                                                          | 1987                                                             |
| 6                                                              | 6        | 17500                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 19231                                             | 3909                                                                          | 2782                                                             |
| 7                                                              | 6        | 21250                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 23352                                             | 4746                                                                          | 3378                                                             |
| 8                                                              | 6        | 26250                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 28846                                             | 5863                                                                          | 4173                                                             |
| 9                                                              | 6        | 28750                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 31593                                             | 6421                                                                          | 4571                                                             |
| 10                                                             | 6        | 32500                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 35714                                             | 7259                                                                          | 5167                                                             |
| 11                                                             | 6        | 32500                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 35714                                             | 7259                                                                          | 5167                                                             |
| 12                                                             | 6        | 36250                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 39835                                             | 8097                                                                          | 5763                                                             |
| 13                                                             | 6        | 47500                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 52198                                             | 10609                                                                         | 7551                                                             |
| 14                                                             | 6        | 53750                     | 0,3   | 0,82  | 0,868    | 59066                                             | 12005                                                                         | 8545                                                             |
| Média ponderada respeitando a distribuição do bulbo de tensões |          |                           |       |       |          |                                                   | 3989                                                                          | 2839                                                             |

Fonte: do Autor

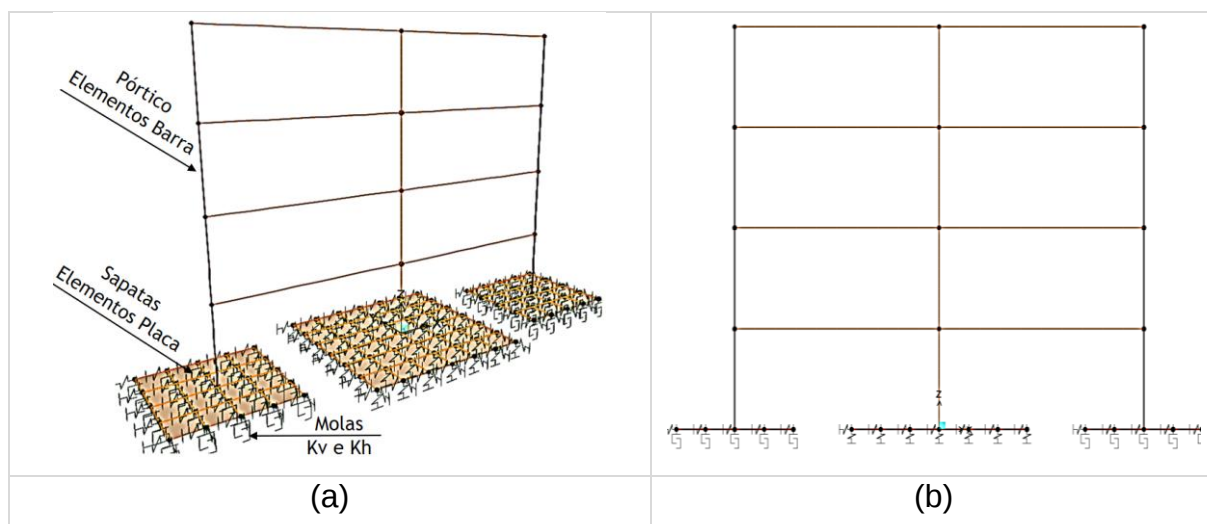
Tabela 11 - Valores de  $K_v$  e  $K_h$  – Sapatas externas

| Prof.<br>(m)                                                   | B<br>(m) | E<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $\nu$ | $I_w$ | $K\tau$ | $C = \frac{E}{1 - \nu^2}$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $K_v = \frac{1}{B} \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{1}{I_w}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $K_h = \frac{K\tau \times C}{\sqrt{A}}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------------------------------------------|----------|---------------------------|-------|-------|---------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1                                                              | 4        | 15000                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 16484                                             | 5025                                                                          | 3577                                                            |
| 2                                                              | 4        | 16250                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 17857                                             | 5444                                                                          | 3875                                                            |
| 3                                                              | 4        | 13750                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 15110                                             | 4607                                                                          | 3279                                                            |
| 4                                                              | 4        | 16250                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 17857                                             | 5444                                                                          | 3875                                                            |
| 5                                                              | 4        | 12500                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 13736                                             | 4188                                                                          | 2981                                                            |
| 6                                                              | 4        | 17500                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 19231                                             | 5863                                                                          | 4173                                                            |
| 7                                                              | 4        | 21250                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 23352                                             | 7119                                                                          | 5067                                                            |
| 8                                                              | 4        | 26250                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 28846                                             | 8795                                                                          | 6260                                                            |
| 9                                                              | 4        | 28750                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 31593                                             | 9632                                                                          | 6856                                                            |
| 10                                                             | 4        | 32500                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 35714                                             | 10889                                                                         | 7750                                                            |
| 11                                                             | 4        | 32500                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 35714                                             | 10889                                                                         | 7750                                                            |
| 12                                                             | 4        | 36250                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 39835                                             | 12145                                                                         | 8644                                                            |
| 13                                                             | 4        | 47500                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 52198                                             | 15914                                                                         | 11327                                                           |
| 14                                                             | 4        | 53750                     | 0,3   | 0,82  | 0,868   | 59066                                             | 18008                                                                         | 12817                                                           |
| Média ponderada respeitando a distribuição do bulbo de tensões |          |                           |       |       |         |                                                   | 5215                                                                          | 3712                                                            |

Fonte: do Autor

As sapatas foram modeladas com elementos de placa espessa tipo shell com as propriedades do concreto para  $F_{ck} = 30\text{MPa}$  e discretizados com dimensões de 1,0m e as molas com os valores médios das Tabelas 10 e 11. Na Figura 28 está mostrado o pórtico feito no software SAP2000 cujas sapatas modeladas com elementos de placa estão apoiadas em molas definidas com base no modelo de Winkler, sendo em (a) uma vista em três dimensões e em (b) uma vista no plano xz.

Figura 28 – Pórtico com apoio do tipo Molas de Winkler – Modelo extraído do software SAP2000



Fonte: do Autor

### 3.11.2 Parâmetros para o Modelo de Pasternak (P)

Os valores de  $K_v$  para esse modelo foram os mesmos adotados para o modelo com molas de Winkler, com o ajuste nos valores baseados na inclusão de uma placa de cisalhamento de forma a simular uma camada incompressível que se deforma apenas sob tensões de cisalhamento, com o objetivo de estabelecer uma interação entre as molas usadas no modelo de Winkler. As sapatas e a placa de cisalhamento foram modeladas com elementos de placa espessa tipo shell discretizados com dimensões de 1,0m. As propriedades dos elementos das sapatas são referentes ao concreto com  $F_{ck}$  igual a 30MPa e para a placa de cisalhamento foram utilizadas as propriedades do solo, considerando o módulo de cisalhamento  $G$  da placa. Apesar do solo ser um material heterogêneo e anisotrópico, por todas as simplificações que estão sendo adotadas, foi adotada a equação (15) para definir esse parâmetro. Os valores calculados e adotados nesse modelo estão apresentados na Tabela 12 abaixo:

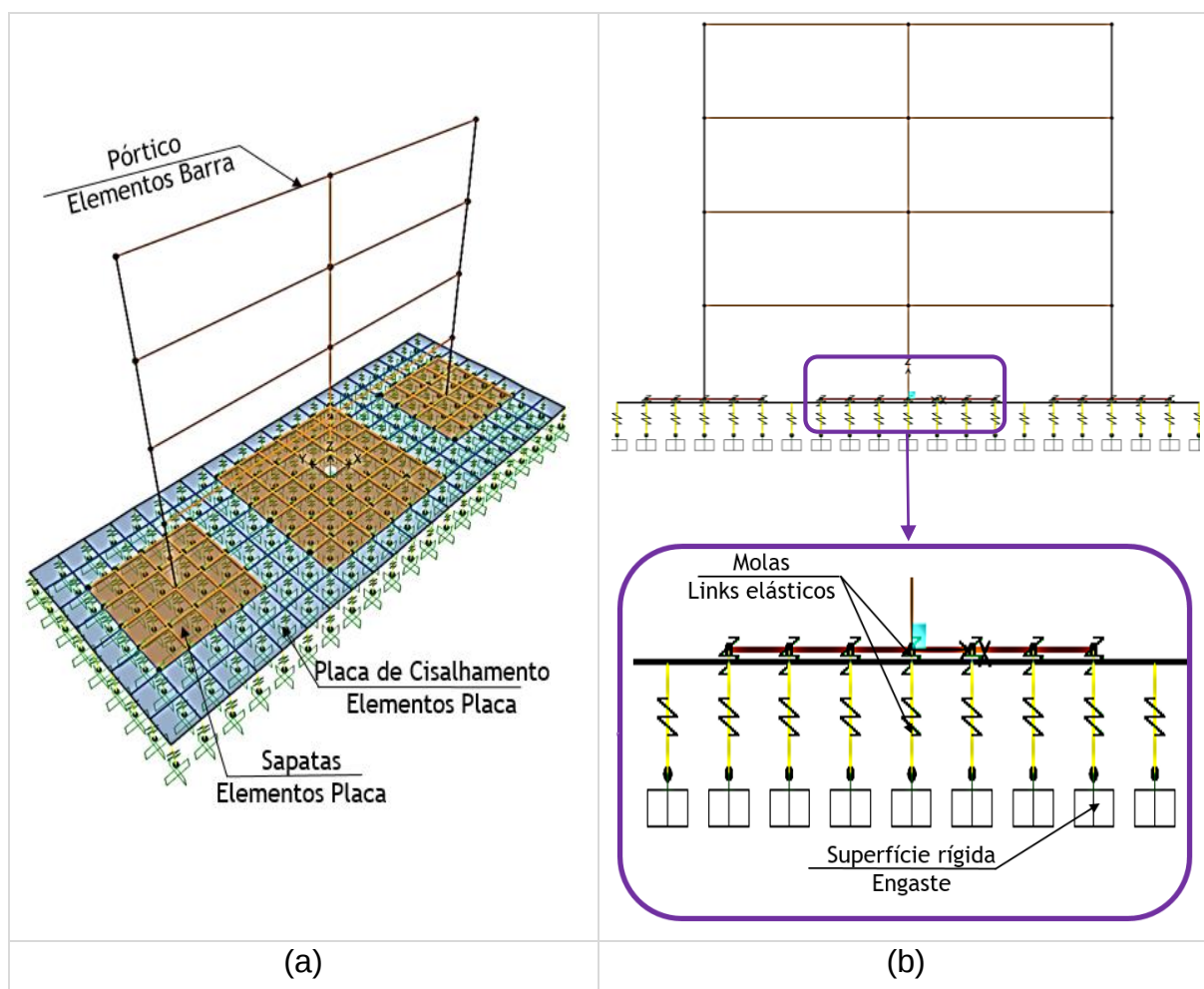
*Tabela 12 - Valores de  $K_v$  – Sob a placa de cisalhamento*

| Prof.<br>(m)                                                   | B<br>(m) | E<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $\nu$ | $G = \frac{E}{2(\nu + 1)}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $I_w$ | $K_\tau$ | $C = \frac{E}{1-\nu^2}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $K_v = \frac{1}{B} \frac{E}{1-\nu^2} \frac{1}{I_w}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------------------------------------------|----------|---------------------------|-------|----------------------------------------------------|-------|----------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                              | 8        | 15000                     | 0,3   | 5769                                               | 1,4   | 0,93     | 16484                                           | 1472                                                                        |
| 2                                                              | 8        | 16250                     | 0,3   | 6250                                               | 1,4   | 0,93     | 17857                                           | 1594                                                                        |
| 3                                                              | 8        | 13750                     | 0,3   | 5288                                               | 1,4   | 0,93     | 15110                                           | 1349                                                                        |
| 4                                                              | 8        | 16250                     | 0,3   | 6250                                               | 1,4   | 0,93     | 17857                                           | 1594                                                                        |
| 5                                                              | 8        | 12500                     | 0,3   | 4808                                               | 1,4   | 0,93     | 13736                                           | 1226                                                                        |
| 6                                                              | 8        | 17500                     | 0,3   | 6731                                               | 1,4   | 0,93     | 19231                                           | 1717                                                                        |
| 7                                                              | 8        | 21250                     | 0,3   | 8173                                               | 1,4   | 0,93     | 23352                                           | 2085                                                                        |
| 8                                                              | 8        | 26250                     | 0,3   | 10096                                              | 1,4   | 0,93     | 28846                                           | 2576                                                                        |
| 9                                                              | 8        | 28750                     | 0,3   | 11058                                              | 1,4   | 0,93     | 31593                                           | 2821                                                                        |
| 10                                                             | 8        | 32500                     | 0,3   | 12500                                              | 1,4   | 0,93     | 35714                                           | 3189                                                                        |
| 11                                                             | 8        | 32500                     | 0,3   | 12500                                              | 1,4   | 0,93     | 35714                                           | 3189                                                                        |
| 12                                                             | 8        | 36250                     | 0,3   | 13942                                              | 1,4   | 0,93     | 39835                                           | 3557                                                                        |
| 13                                                             | 8        | 47500                     | 0,3   | 18269                                              | 1,4   | 0,93     | 52198                                           | 4661                                                                        |
| 14                                                             | 8        | 53750                     | 0,3   | 20673                                              | 1,4   | 0,93     | 59066                                           | 5274                                                                        |
| Média ponderada respeitando a distribuição do bulbo de tensões |          |                           |       |                                                    |       |          |                                                 |                                                                             |
|                                                                |          | E                         |       | G                                                  |       |          | $K_v$                                           |                                                                             |
|                                                                |          | 22100                     |       | 8500                                               |       |          | 2000                                            |                                                                             |

Fonte: do Autor

Na Figura 29 está mostrado o pórtico feito no software SAP2000 cujas sapatas modeladas com elementos de placa estão apoiadas em molas definidas com base no modelo de Winkler ligados por uma placa de cisalhamento, conhecido como Modelo de Pasternak, sendo em (a) uma vista em três dimensões e em (b) uma vista no plano xz.

*Figura 29 – Pórtico com apoio do tipo Pasternak – Modelo extraído do software SAP2000*



Fonte: do Autor

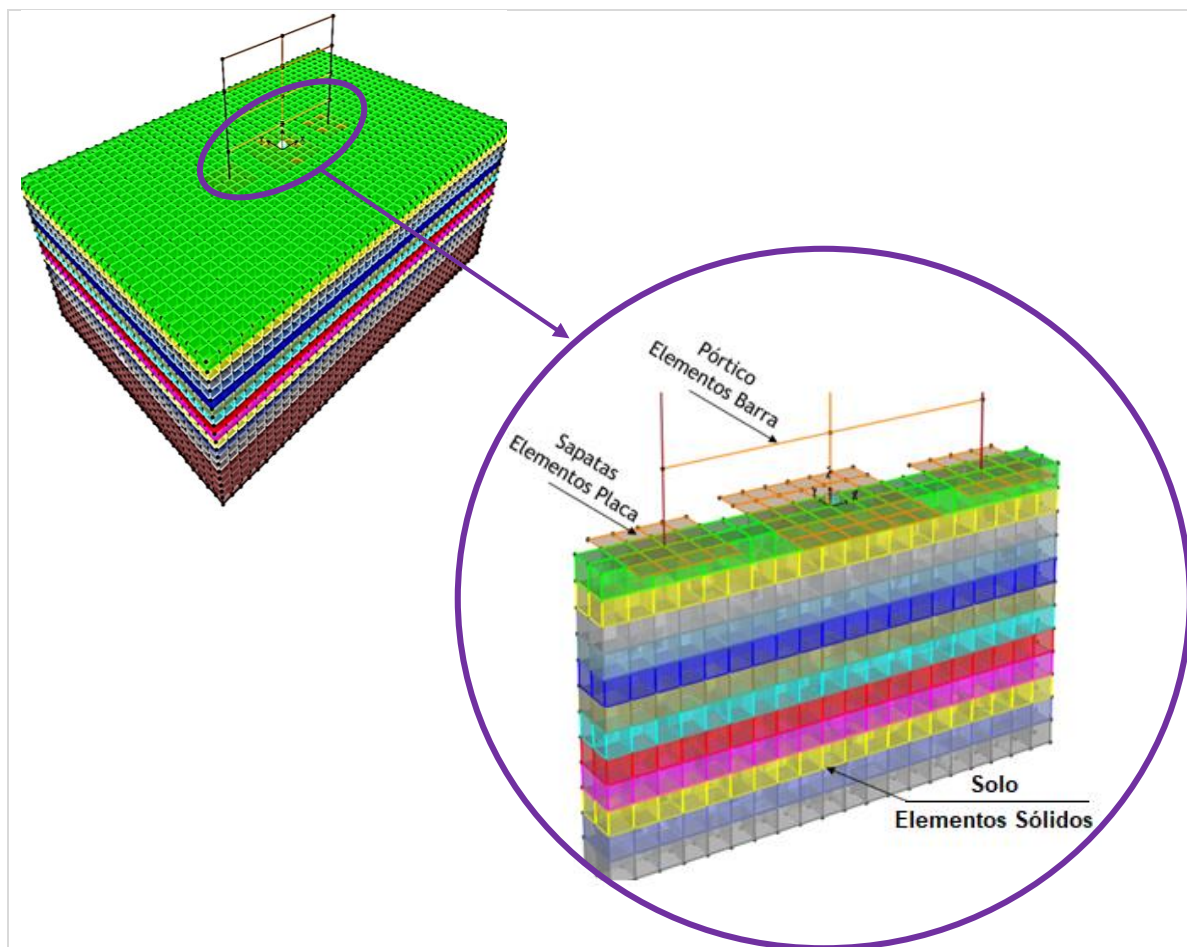
### 3.11.3 Parâmetros para a Modelagem do Meio Contínuo (MC)

Os sólidos foram discretizados com tamanhos de 1,0m em todas as direções e os valores atribuídos a cada camada de elementos ao longo da profundidade são os valores de  $E$  e  $\nu$  conforme Tabela 9. As sapatas foram modeladas com elementos de placa espessa tipo shell, considerando a resistência à compressão do concreto,  $F_{ck}$ , igual a 30MPa. Os elementos de placa foram discretizados com dimensões de 1,0m em todas as direções e ligados aos elementos sólidos por meio dos nós. Visando a análise da interação solo-estrutura, por meio da utilização do método dos elementos finitos, torna-se necessário definir as dimensões do sólido que será modelado para a representação do maciço geotécnico. As dimensões adotadas para o maciço devem ser tais que, todos os efeitos de deformação devido as tensões aplicadas estejam compreendidos dentro desse elemento. Ou seja, que as condições de contorno não interfiram na resposta fornecida pelo programa.

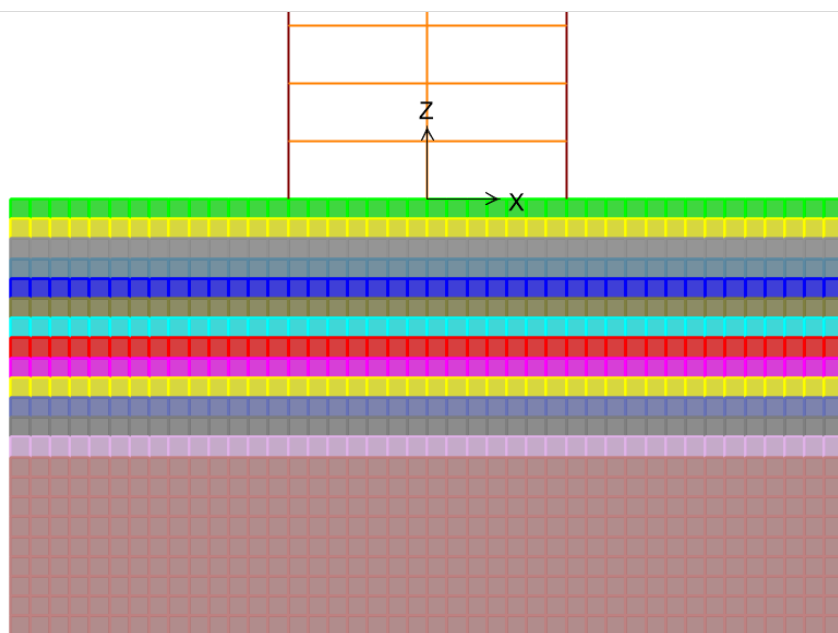
Portanto, a modelagem foi feita utilizando um processo iterativo, no qual o tamanho da malha de sólidos foi sendo aumentado até que o bulbo de tensões estivesse contido dentro dos limites da modelagem e, também, até que os resultados de deslocamentos e esforços solicitantes se mantivessem constantes.

Na Figura 30 está mostrado o pórtico modelado no software SAP2000 cujas sapatas, modeladas com elementos de placa, estão apoiadas em um meio contínuo composto por elementos sólidos, sendo em (a) uma vista em três dimensões e em (b) uma vista no plano xz.

Figura 30 – Pórtico com apoio do tipo Meio Contínuo – Modelo extraído do software SAP2000



(a)



(b)

Fonte: do Autor

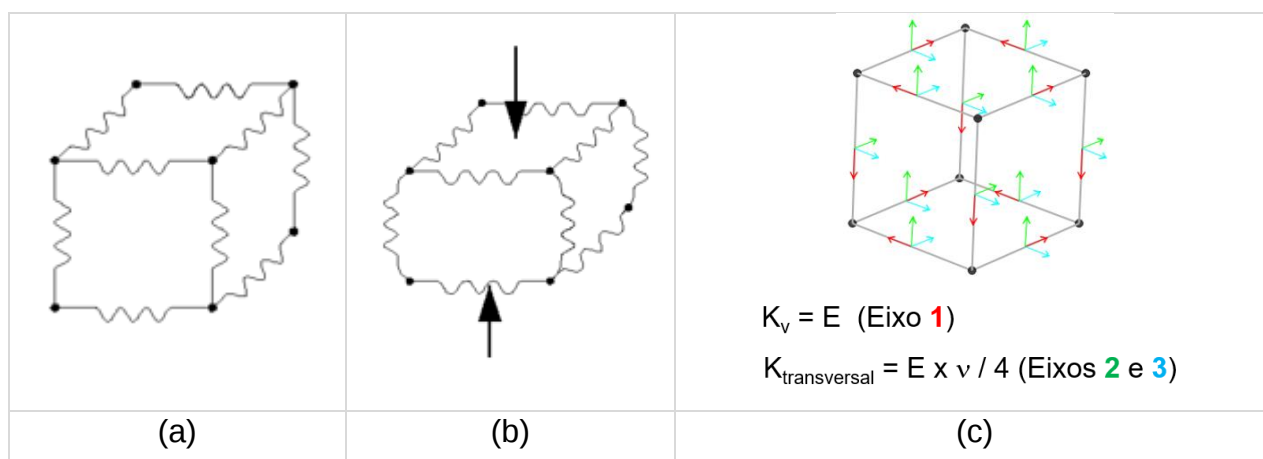
### 3.11.4 Parâmetros para a Modelagem da Malha de Molas Contínuas (MM)

Para a modelagem da malha de molas no SAP2000 foram utilizados elementos de mola com comprimentos de 1,0m em todas as direções, de forma que foi possível utilizar para os valores das constantes de mola da equação (12), onde A e L são unitários,  $K = E$  na direção axial das molas (Eixo 1 – Figura 31-c), com os valores de E para cada camada do solo definidos conforme a Tabela 9.

Para calibrar o modelo de malha de molas com base no modelo de Meio Contínuo, foi necessário também, fazer o ajuste da deformação transversal (Eixos 2 e 3 – Figura 31-c), que ocorre com os sólidos que representam o solo devido ao coeficiente de Poisson. Portanto, nessa direção, o valor adotado para a rigidez das molas foi  $K = E \times \nu / 4$ , sendo o divisor 4 equivalente às 4 molas que se deformam lateralmente devido ao carregamento de compressão axial no cubo de molas.

Na Figura 31 a seguir, está mostrada a representação em um cubo da deformação no modelo de malha de molas, sendo em (a) na situação indeformado, sem atuação do carregamento, em (b) deformado sob ação do carregamento atuante e em (c) o sistema de eixos no cubo de molas.

*Figura 31 – Representação do Cubo de Molas (a) indeformado, (b) deformado sob carregamento axial e (c) sistema de eixos no cubo de molas*



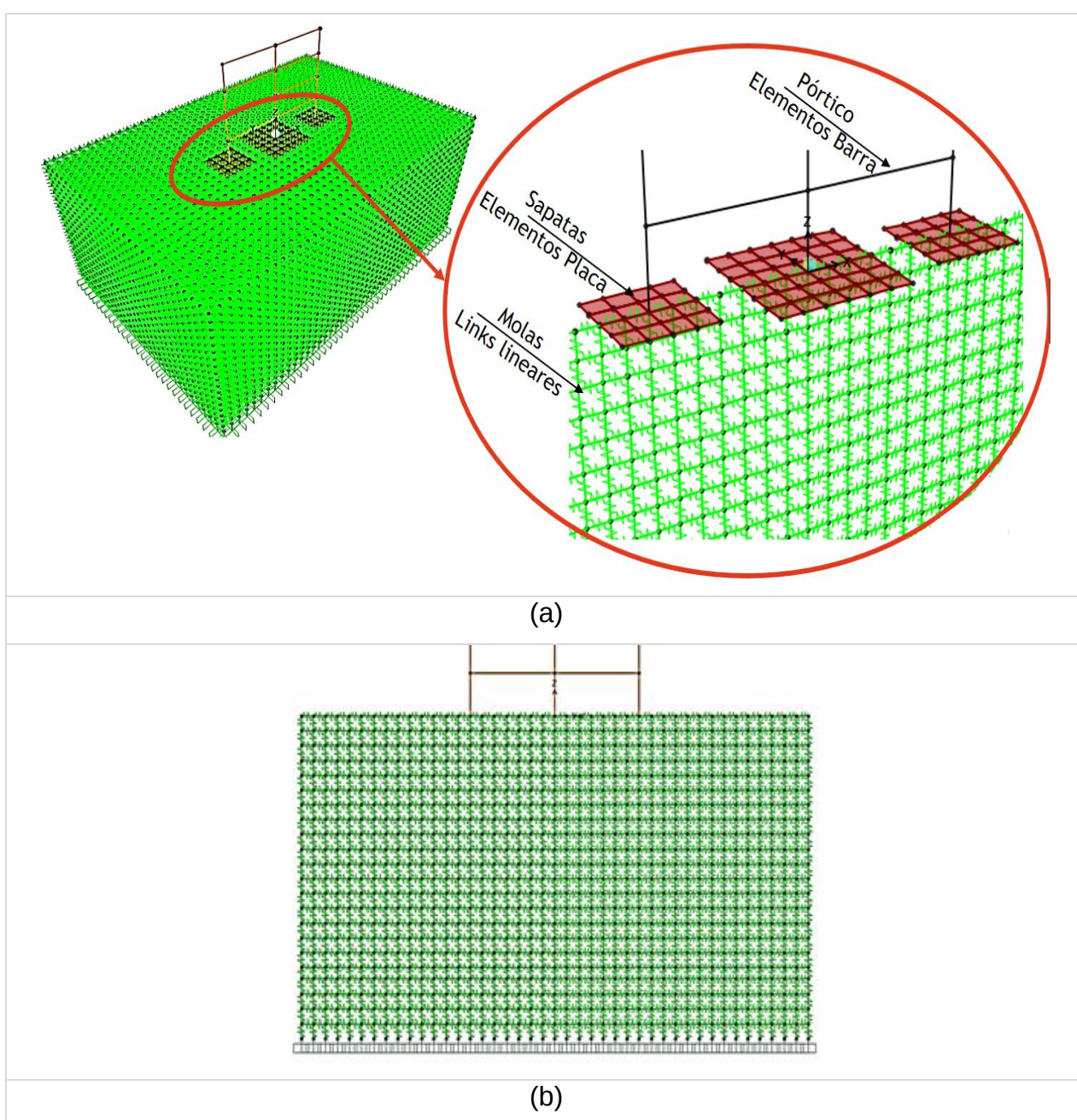
Fonte: do Autor

Para a definição da extensão da malha de molas foi utilizado o mesmo critério da modelagem do meio contínuo que considera o tamanho definido para as sapatas, a

influência do bulbo de tensões e estabilidade dos resultados de deformação e esforços solicitantes.

Na Figura 32 está mostrado o pórtico modelado no software SAP2000, cujas sapatas, modeladas com elementos de placa, estão apoiadas em uma malha de molas contínuas ligadas pelas extremidades, sendo em (a) uma vista em três dimensões e em (b) uma vista no plano xz.

*Figura 32 - Pórtico com apoio por Malha de Molas – Modelo extraído do software SAP2000*



Fonte: do Autor

## 4.0 RESULTADOS E ANÁLISES

No apêndice estão apresentados todos os diagramas e as tabelas dos deslocamentos e dos esforços solicitantes, com os resultados obtidos para cada modelo de cálculo dos três pórticos estudados com três alturas diferentes.

As tabelas e gráficos apresentados seguirão a nomenclatura conforme legenda abaixo:

AT = Apoio Teórico

W = Modelo de Winkler

P = Modelo de Pasternak

MM = Modelo de malha de molas contínuas

MC = Modelo de meio contínuo

N = Força normal

V = Força cortante

M = Momento fletor

$D_x$  = Deslocamentos Horizontais na direção x

$D_z$  = Deslocamentos Verticais na direção z

### 4.1 BULBO DE TENSÕES NO MODELO DE MEIO CONTÍNUO

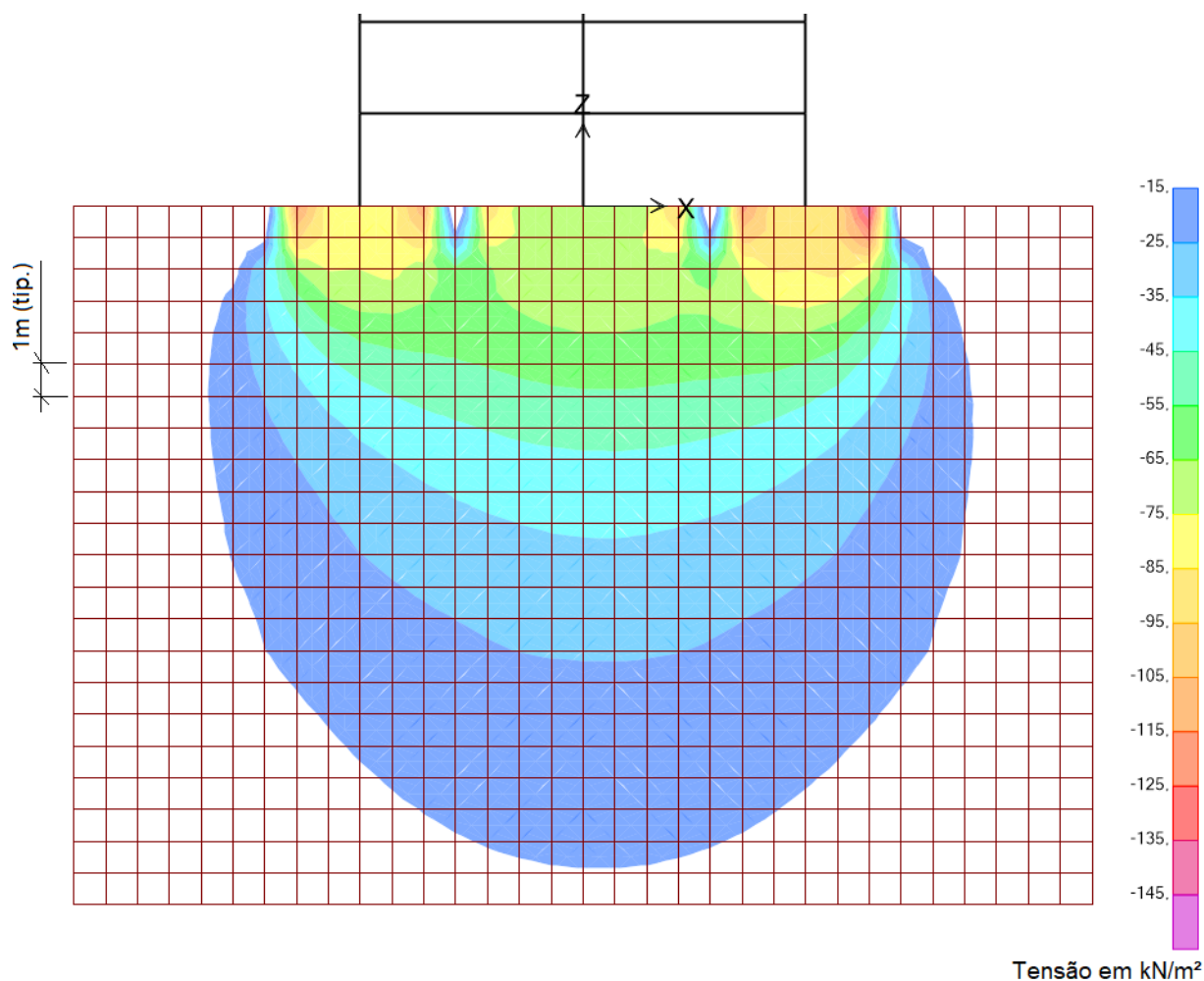
Na Figura 33, está apresentado o diagrama de tensões nos elementos sólidos, que representam o solo de apoio, para o pórtico de 11 pavimentos (escolhido na análise por apresentar o maior carregamento). Observa-se que o bulbo de tensões atinge o valor de  $q/q_0=0,1$  na profundidade próxima a  $3,5B$ , considerando  $B$  igual a 6 metros (largura da sapata central).

Observa-se também que, a tensão máxima no contato da fundação com o solo é  $q=145\text{kN/m}^2$  e, próximo a profundidade de 21m a tensão é  $q_0=15\text{kN/m}^2$ , apresentando um comportamento bem semelhante ao bulbo proposto por BOWLES (1988), conforme apresentado anteriormente na Figura 13 para o caso de sapatas corridas.

Apesar das três sapatas de apoio dos pilares apresentarem a seção quadrada, o bulbo das três sapatas se somam devido à proximidade entre elas e aos valores de carregamento, fazendo com que o solo não se manifeste no bulbo de tensões

compatíveis com sapatas quadradas, cuja a relação  $q/q_0=0,1$  ocorre próximo à profundidade de  $2B$ .

*Figura 33 - Bulbo de Tensões - Pórtico de 11 pavimentos*



Fonte: do Autor

Esse tipo de modelagem, que se utiliza de elementos sólidos, é o único dentre todos os modelos analisados nesse trabalho, onde é possível a visualização do bulbo de tensões. No modelo de malha de molas contínuas, que mais se aproxima em termos de refinamento da modelagem do Meio Contínuo, não se tem resultados de tensões, apenas de deformações nas molas. Nos demais modelos, o solo não é modelado, logo, também não é possível obter informações do bulbo de tensões.

## 4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA OS PÓRTICOS ESTUDADOS

Nos gráficos que estão apresentados a seguir, foram feitas comparações entre os cinco modelos estudados e, as diferenças percentuais são sempre com relação ao modelo com apoios teóricos.

Em alguns casos, o resultado dos pilares será apresentado separadamente para cada eixo, conforme descrito na Tabela 13:

*Tabela 13 – Identificação das barras referente aos pilares dos eixos 1, 2 e 3*

| Pilares          | Barras                                              |
|------------------|-----------------------------------------------------|
| Eixo 1 (Externo) | 1 / 6 / 11 / 16 / 21 / 26 / 31 / 36 / 41 / 46 / 51  |
| Eixo 2 (Interno) | 3 / 8 / 13 / 18 / 23 / 28 / 33 / 38 / 43 / 48 / 53  |
| Eixo 3 (Externo) | 5 / 10 / 15 / 20 / 25 / 30 / 35 / 40 / 45 / 50 / 55 |

Fonte: do Autor

## 4.3 ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS

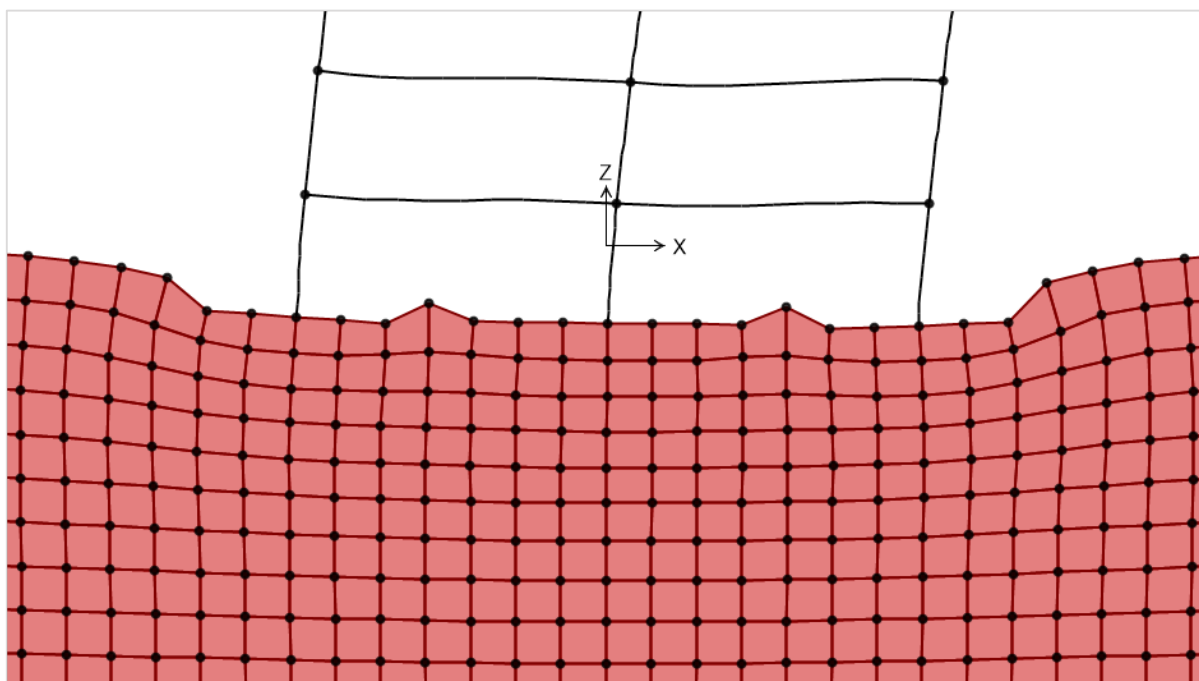
Os valores dos deslocamentos verticais ( $D_z$ ) dos nós para os pórticos de quatro, sete e onze pavimentos considerando-se os cinco modelos analisados estão apresentados nas tabelas 17, 18 e 19 do apêndice, bem como os valores dos deslocamentos horizontais ( $D_x$ ) dos nós, apresentados nas tabelas 20, 21 e 22.

Para os modelos onde os elementos que representam o solo foram modelados em três dimensões, nos resultados foi possível verificar que houve deslocamentos fora do plano do pórtico, mas com valores muito pequenos, na ordem de centésimos de milímetros, que puderam ser desprezados.

### 4.3.1 Avaliação qualitativa dos deslocamentos

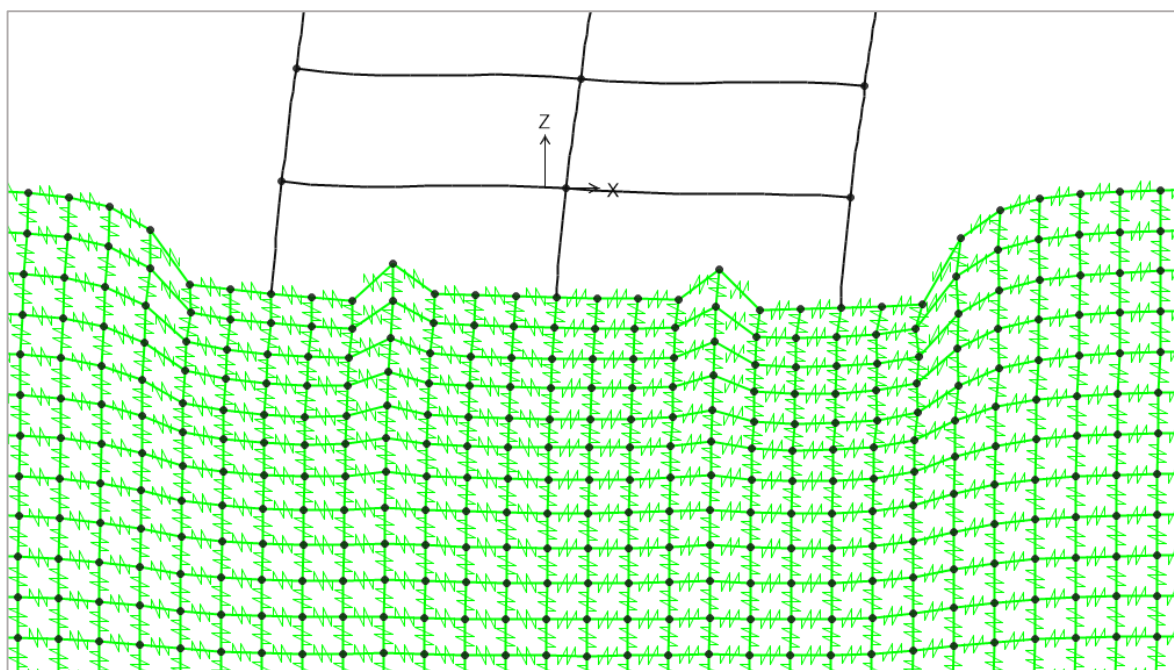
Nas Figuras 34 a 37, estão apresentados os deslocamentos com escala aumentada, de forma a facilitar a visualização do comportamento de todos os modelos com ISE com foco na região de apoio da fundação. O objetivo é avaliar qualitativamente a forma como a deformação ocorreu, principalmente no contato das sapatas com o solo.

*Figura 34 - Deformação - Modelo MC*



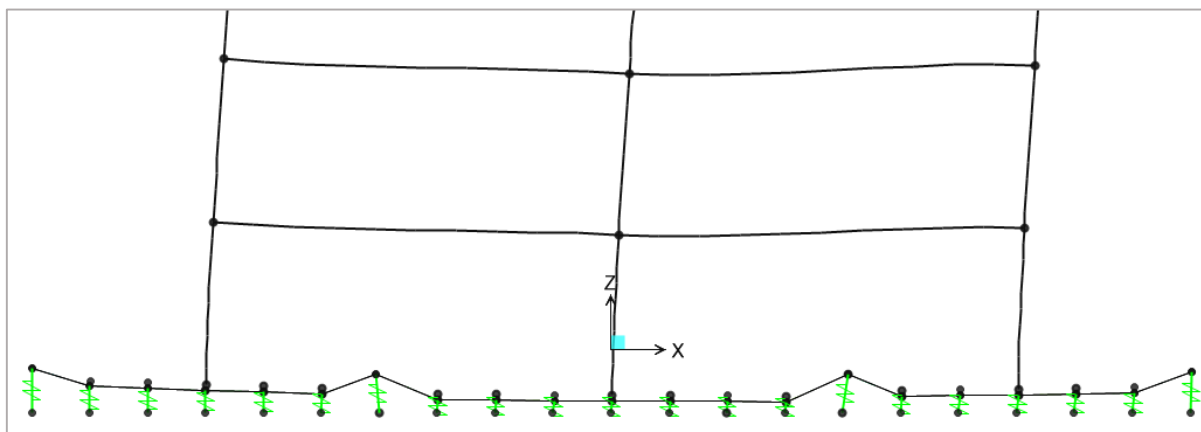
Fonte: do Autor

*Figura 35- Deformação - Modelo MM*



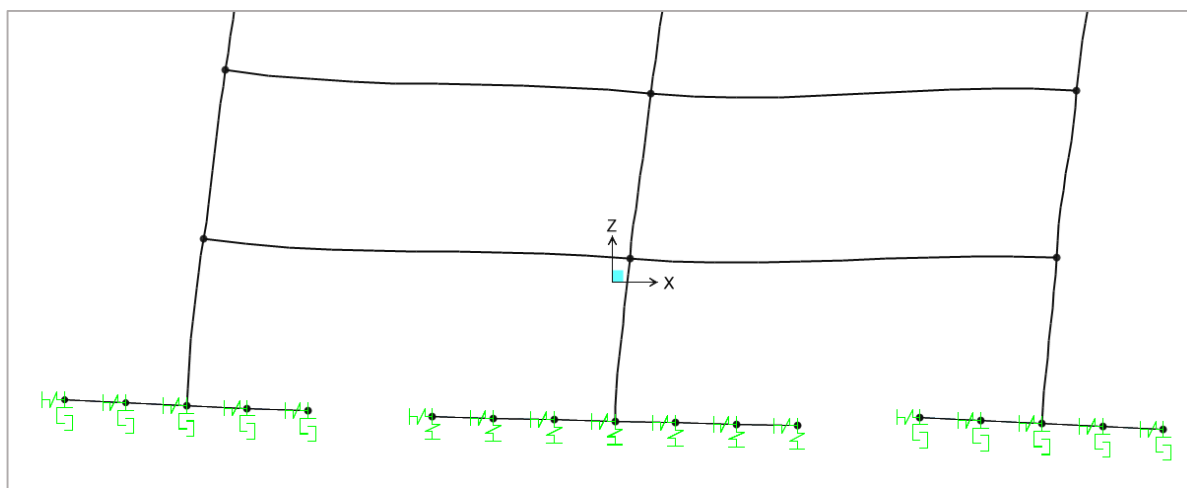
Fonte: do Autor

*Figura 36 - Deformação - Modelo P*



Fonte: do Autor

*Figura 37 - Deformação - Modelo W*



Fonte: do Autor

Na avaliação visual, é nítida a semelhança no comportamento dos modelos MC, MM e P, bem como é nítida a diferença desses três modelos citados com relação ao modelo de Winkler (W). Nos modelos considerando o meio contínuo, malha de molas contínuas e Pasternak, as sapatas de apoio estão conectadas pelos elementos que constituem o solo e, com isso, a deformação de um elemento de fundação influencia nos elementos vizinhos de tal forma que, os elementos que representam o solo entre as sapatas de fundação apresentam uma deformação diferente com relação aos demais nós, fruto de um “estufamento” causado pela pressão de cada sapata aplicada no solo. Já no modelo W, as sapatas se deformam de forma independente.

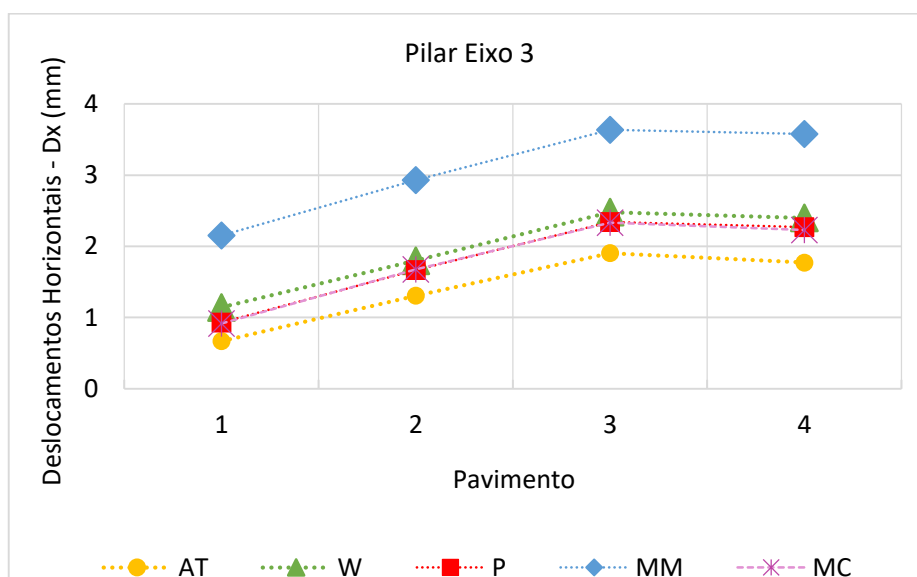
### 4.3.2 Avaliação quantitativa dos deslocamentos

Para a avaliação dos deslocamentos e comparação dos modelos, foi escolhido como referência o pilar do eixo 3. Os Gráficos 1, 2 e 3 apresentam os deslocamentos horizontais no topo dos andares para todos os modelos analisados, para os pórticos de 4, 7 e 11 andares, respectivamente. Observa-se nos gráficos, onde o eixo das abcissas se refere ao número do pavimento e o eixo das ordenadas ao valor dos deslocamentos horizontais em milímetros, que o comportamento dos deslocamentos horizontais nos três pórticos estudados é o mesmo.

Como esperado, o modelo que apresenta os menores valores de deslocamentos é o modelo com apoios teóricos. Dentre os modelos com ISE, aquele que apresentou os menores valores de deslocamentos foi o Modelo de Meio Contínuo e aquele que apresentou os maiores valores foi o modelo de malha de molas.

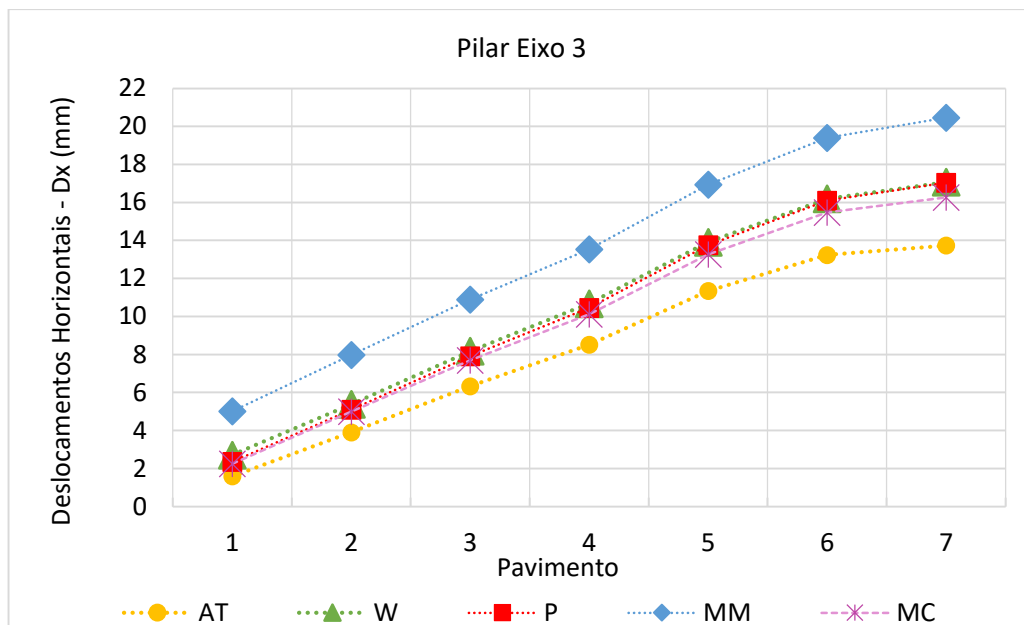
Para o pórtico com quatro pavimentos, os pontos que representam os valores de deslocamentos do modelo de Winkler, Pasternak e meio contínuo são praticamente coincidentes. Já no pórtico com onze pavimentos, é nítido o distanciamento dos pontos no topo da edificação, ou seja, evidenciando que a altura da edificação influencia no resultado para os diferentes tipos de modelo adotados no que tange aos deslocamentos horizontais.

*Gráfico 1 - Comparação dos deslocamentos horizontais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 4 Pavimentos*



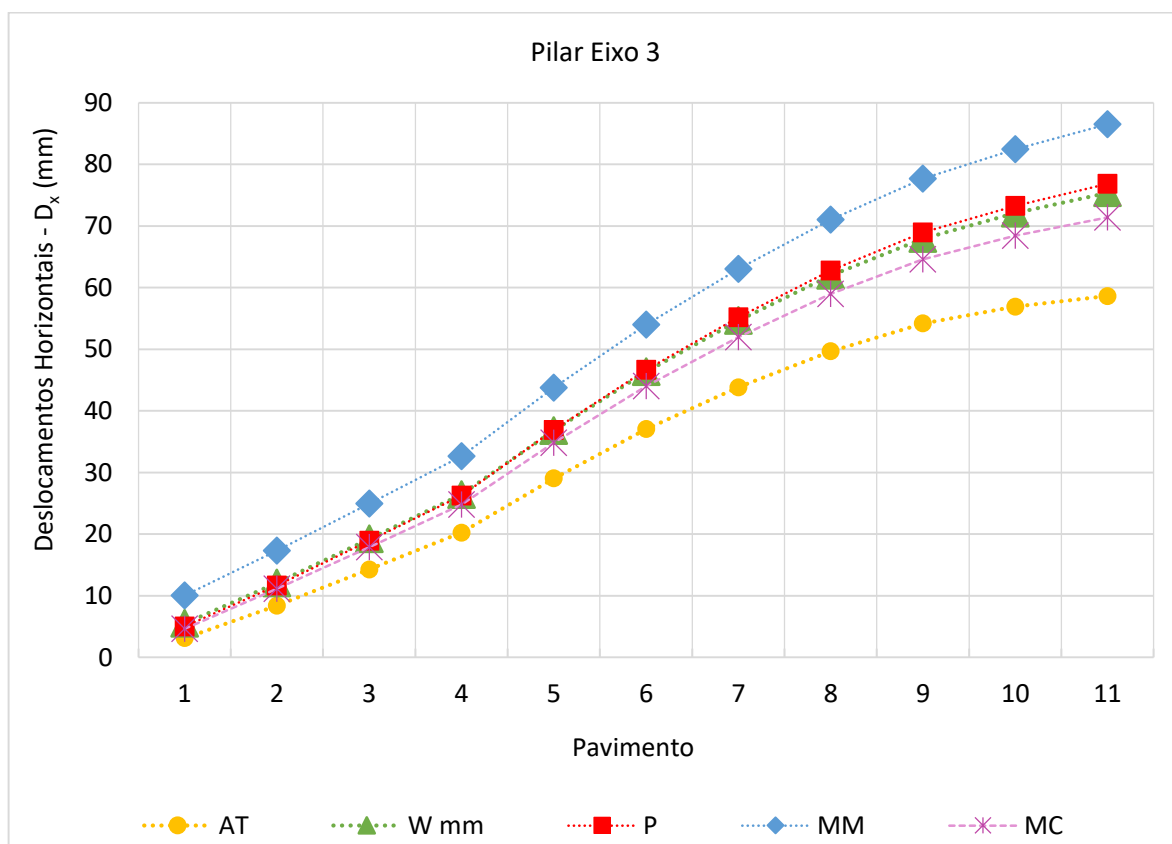
Fonte: do Autor

Gráfico 2 - Comparação dos deslocamentos horizontais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 7 Pavimentos



Fonte: do Autor

Gráfico 3 - Comparação dos deslocamentos horizontais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 11 Pavimentos

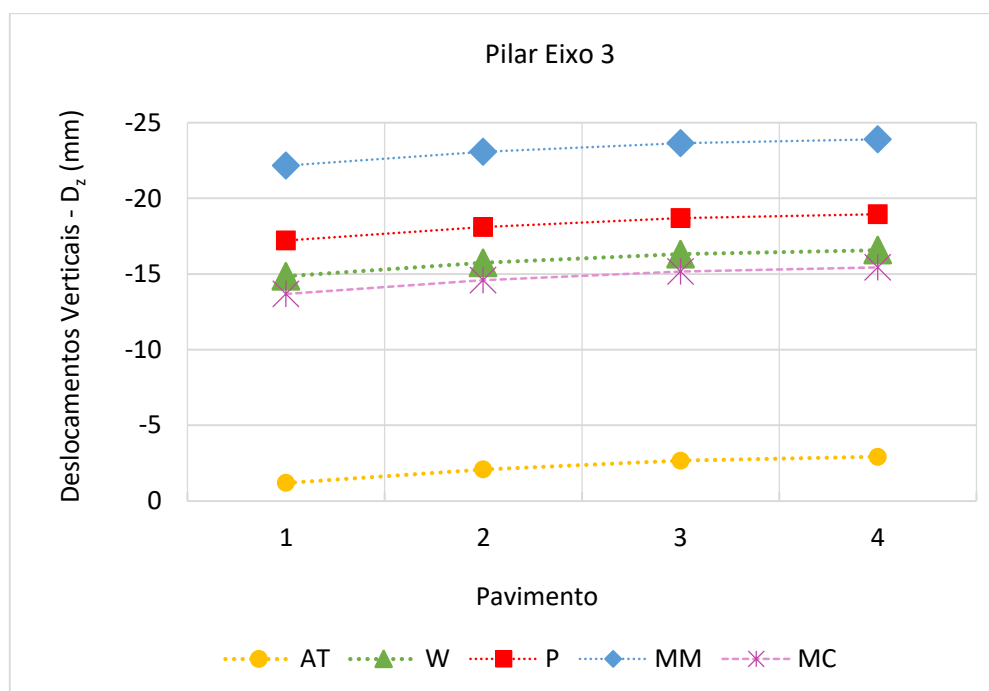


Fonte: do Autor

Os Gráficos 4, 5 e 6 apresentam os deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados, para os pórticos de 4, 7 e 11 andares, respectivamente. Observa-se nos gráficos, onde o eixo das abcissas se refere ao número do pavimento e o eixo das ordenadas ao valor dos deslocamentos verticais em milímetros, que o comportamento nos três pórticos estudados é similar. Como esperado, o modelo que apresenta os menores valores de deslocamentos é o modelo com apoios teóricos.

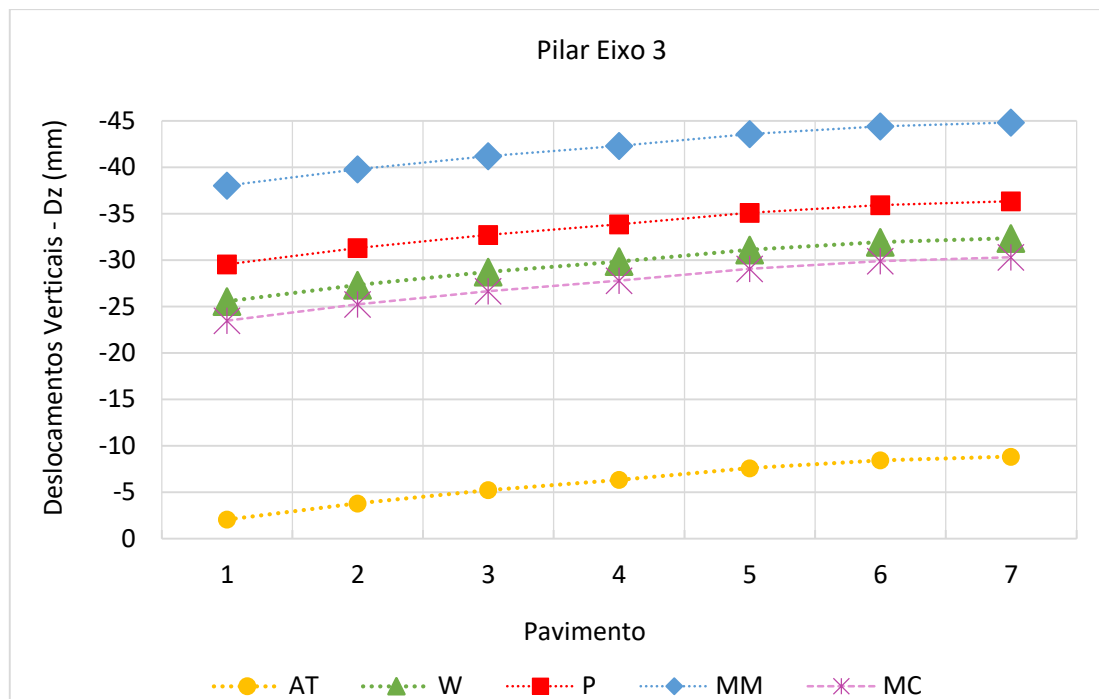
Dentre os modelos com ISE, o que apresentou os menores valores de deslocamentos horizontais foi o modelo de meio contínuo e os maiores valores de deslocamentos foi o de malha de molas contínuas. Entretanto, diferente do ocorrido com os deslocamentos horizontais, à medida que aumenta o número de pavimentos, as diferenças de valores entres os modelos se mantiveram praticamente constantes.

*Gráfico 4 - Comparação dos deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 4 Pavimentos*



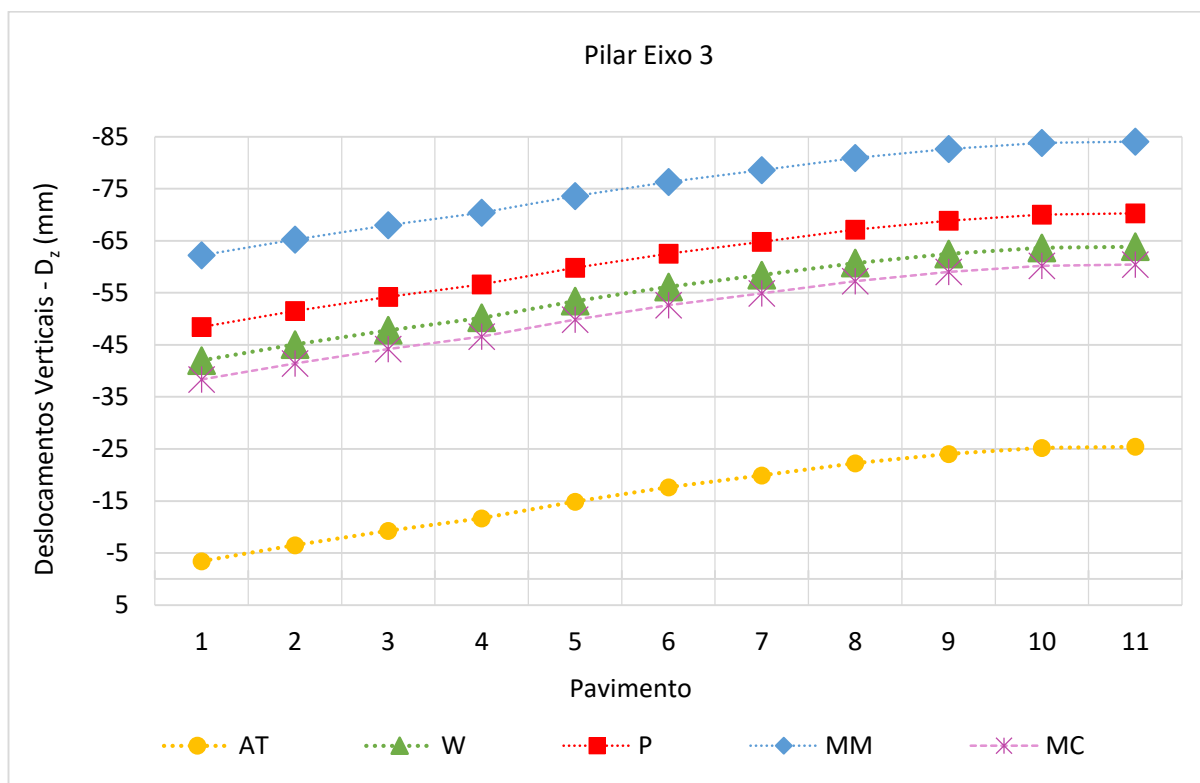
Fonte: do Autor

Gráfico 5 - Comparação dos deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 7 Pavimentos



Fonte: do Autor

Gráfico 6 - Comparação dos deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 4 Pavimentos



Fonte: do Autor

A análise dos recalques diferenciais foi realizada para os modelos com ISE e, para tal, foram escolhidos os nós 1, 2 e 3 no contato da fundação com o solo. A Tabela 14, a seguir, apresenta os resultados dos deslocamentos verticais nos nós e os recalques diferenciais para todos os modelos considerando a ISE, para os pórticos com 4, 7 e 11 pavimentos.

*Tabela 14 - Recalques diferenciais na fundação para os modelos de ISE*

|              | Deslocamentos Verticais (mm) |             |             |             |                         |             |             |             |                          |             |             |             |
|--------------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|
|              | Pórtico de 4 Pavimentos      |             |             |             | Pórtico de 7 Pavimentos |             |             |             | Pórtico de 11 Pavimentos |             |             |             |
|              | W                            | P           | MM          | MC          | W                       | P           | MM          | MC          | W                        | P           | MM          | MC          |
| N1           | -13,4                        | -15,7       | -20,6       | -12,3       | -22,1                   | -25,9       | -34,0       | -20,3       | -33,6                    | -39,3       | -51,5       | -31,0       |
| N2           | -14,1                        | -16,2       | -21,5       | -13,5       | -22,8                   | -26,4       | -35,0       | -22,0       | -34,7                    | -40,4       | -53,5       | -33,6       |
| N3           | -13,6                        | -16,0       | -21,0       | -12,5       | -23,5                   | -27,5       | -36,0       | -21,4       | -38,6                    | -45,0       | -58,8       | -34,9       |
| <b>N2-N1</b> | <b>-0,6</b>                  | <b>-0,5</b> | <b>-0,9</b> | <b>-1,2</b> | <b>-0,7</b>             | <b>-0,5</b> | <b>-1,0</b> | <b>-1,7</b> | <b>-1,1</b>              | <b>-1,1</b> | <b>-2,0</b> | <b>-2,6</b> |
| <b>N3-N2</b> | <b>0,4</b>                   | <b>0,2</b>  | <b>0,5</b>  | <b>1,0</b>  | <b>-0,7</b>             | <b>-1,1</b> | <b>-1,0</b> | <b>0,6</b>  | <b>-3,9</b>              | <b>-4,7</b> | <b>-5,3</b> | <b>-1,3</b> |

Fonte: do Autor

Conforme os valores apresentados na Tabela 14, observa-se que para os pórticos de 4 e 7 pavimentos, o modelo que apresentou os maiores valores de recalques diferenciais foi o de meio contínuo e para o pórtico de 11 pavimentos foi o modelo de malha de molas contínuas.

#### 4.4 ANÁLISE DOS ESFORÇOS SOLICITANTES

A seguir, são apresentados os resultados dos esforços solicitantes: força normal, força cortante e momento fletor, dos três pórticos (4, 7 e 11 pavimentos), para todos os modelos estudados.

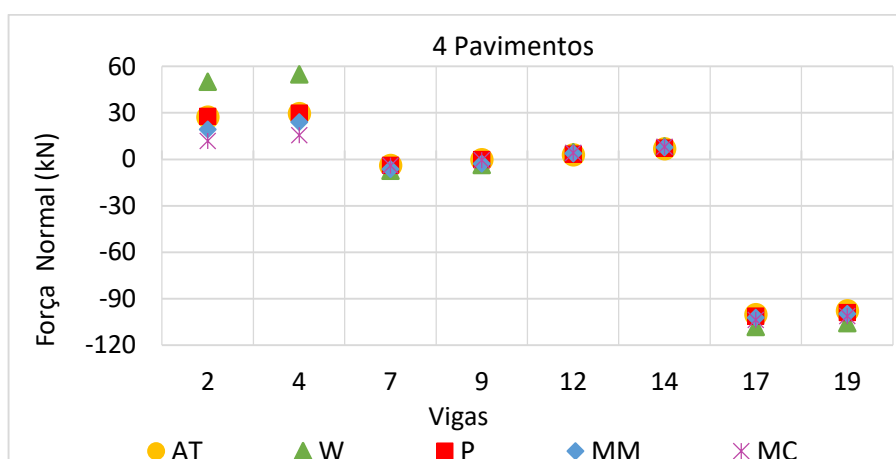
##### 4.4.1 Força normal

Os valores da força normal nas vigas dos pórticos com 4, 7 e 11 pavimentos, para todos os modelos analisados, estão apresentados nas Tabelas 23 a 25 e nos diagramas das Figuras 38 a 40, no apêndice. Para avaliar as diferenças dos

resultados, foram gerados os Gráficos 7, 8 e 9, que apresentam o resultado da força normal (eixo das ordenadas) nas vigas (eixo das abscissas) do pórtico de 4, 7 e 11 pavimentos, respectivamente, considerando todos os modelos estudados. Observa-se que, o tipo de modelo influencia no resultado da força normal nas vigas de forma bem significativa no primeiro pavimento e que, o modelo de Winkler foi aquele que mais se distanciou com relação ao modelo com apoios teóricos para o pórtico de menor altura. Os modelos de meio contínuo e malha de molas contínuas, foram aqueles que mais se distanciaram do modelo convencional para os pórticos de 7 e 11 pavimentos. Já o modelo de Pasternak, foi o que mais se aproximou em todos os casos.

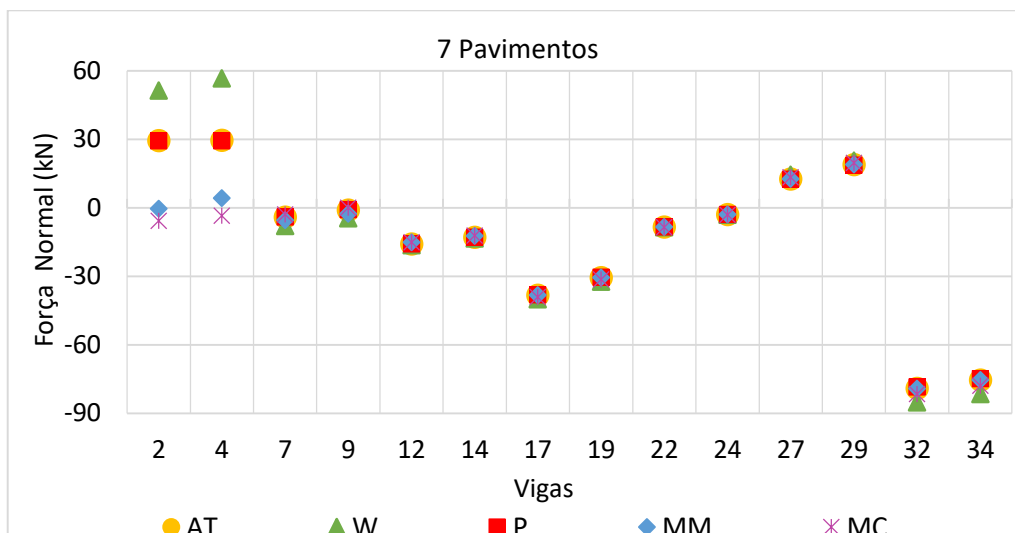
Os valores da média de diferença percentual dos modelos de ISE com relação ao modelo com apoio teórico para as vigas 2 e 4 dos três pórticos, são na ordem de 40% para o pórtico de 4 pavimentos, 70% no pórtico de 7 pavimentos e 120% de 11 pavimentos. Pode-se observar, por meio das médias de porcentagens apresentadas acima, e também pela mudança de comportamento dos modelos com relação ao modelo com apoios teóricos para as diferentes alturas, que o número de pavimentos também influencia nos resultados. Além disso, nota-se também, uma inversão desse esforço, passando de tração para compressão, sendo mais evidente no pórtico mais alto.

*Gráfico 7 - Força Normal nas Vigas do Pórtico de 4 Pavimentos*



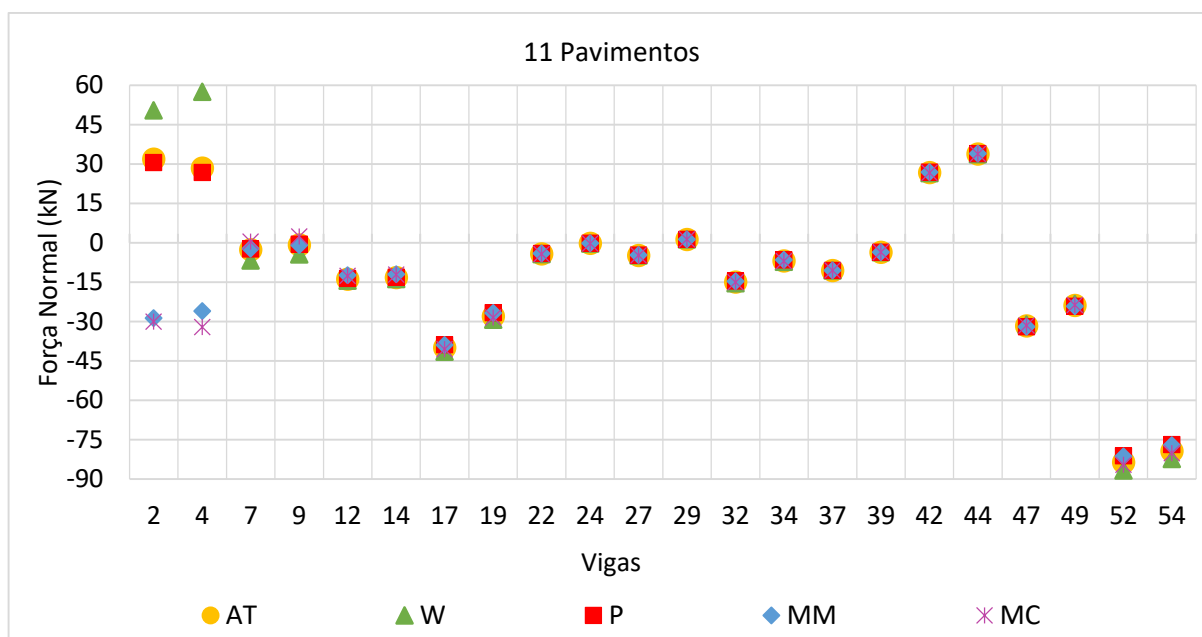
Fonte: do Autor

Gráfico 8 - Força Normal nas Vigas do Pórtico de 7 Pavimentos



Fonte: do Autor

Gráfico 9 - Força Normal nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos

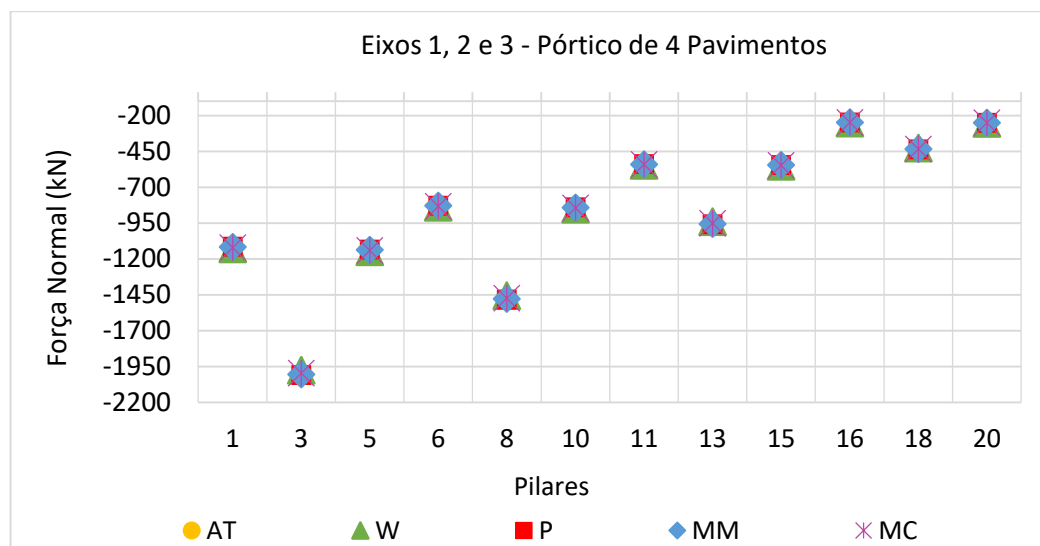


Fonte: do Autor

Os valores da força normal nos pilares dos três pórticos para os cinco modelos analisados estão apresentados no apêndice, nas Tabelas 26 a 28 e nas Figuras 41 a 43. Para avaliar as diferenças dos resultados, foram gerados os Gráficos 10, 11 e 12, que apresentam o resultado da força normal (eixo das ordenadas) nos pilares (eixo das abscissas) do pórtico de 4, 7 e 11 pavimentos, respectivamente, considerando todos os modelos estudados. Observa-se que o tipo de modelo não altera de forma

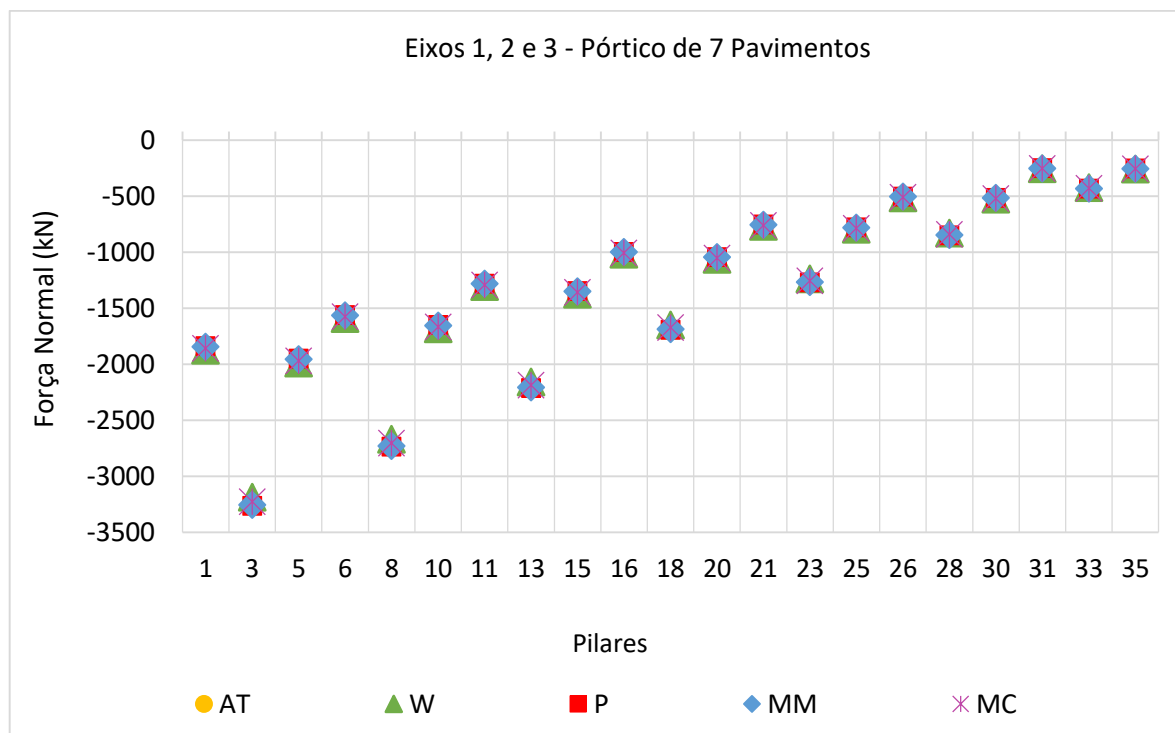
significativa os valores desse esforço nas barras. A média de diferença percentual dos valores da força normal, dentre todos os modelos, para os três pórticos, é menor ou igual a 2%.

*Gráfico 10 - Força Normal nos Pilares do Pórtico de 4 Pavimentos*



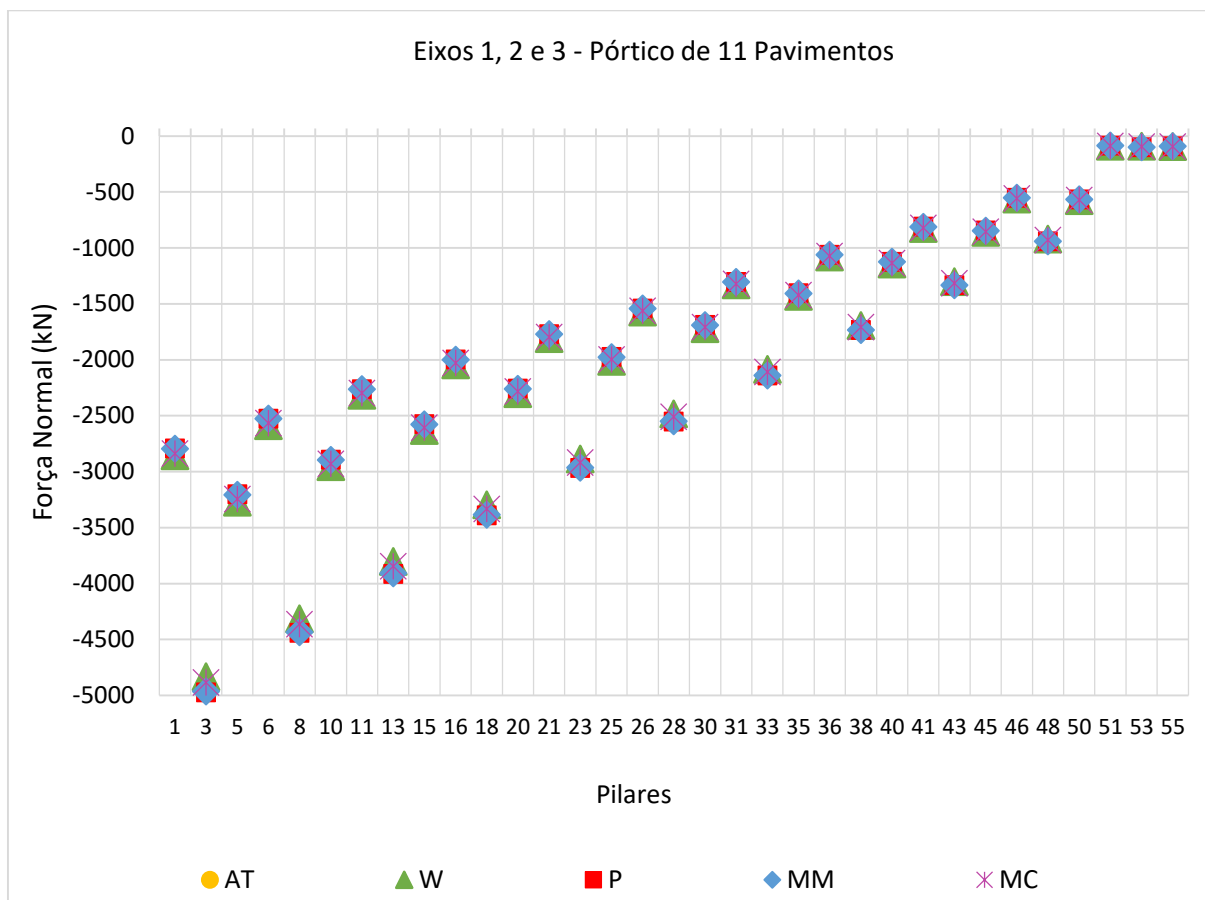
Fonte: do Autor

*Gráfico 11 - Força Normal nos Pilares do Pórtico de 7 Pavimentos*



Fonte: do Autor

Gráfico 12 - Força Normal nos Pilares do Pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: do Autor

#### 4.4.2 Força cortante

Os valores da força cortante em todas as vigas dos três pórticos e dos cinco modelos analisados estão apresentados no apêndice, nas Tabelas 29 a 31 e nas Figuras 44 a 46.

Para avaliar as diferenças dos resultados, foram gerados os Gráficos 13, 14 e 15 que apresentam o resultado da força cortante (eixo das ordenadas) nas vigas (eixo das abscissas) do pórtico de 4, 7 e 11 pavimentos, respectivamente, considerando todos os modelos estudados. Observa-se que, nem o tipo de modelo e nem o número de pavimentos, alteram de forma significativa os valores da força cortante nas vigas. A diferença percentual média encontrada é inferior a 3%.

Gráfico 13 - Força Cortante nas Vigas do Pórtico de 4 Pavimentos

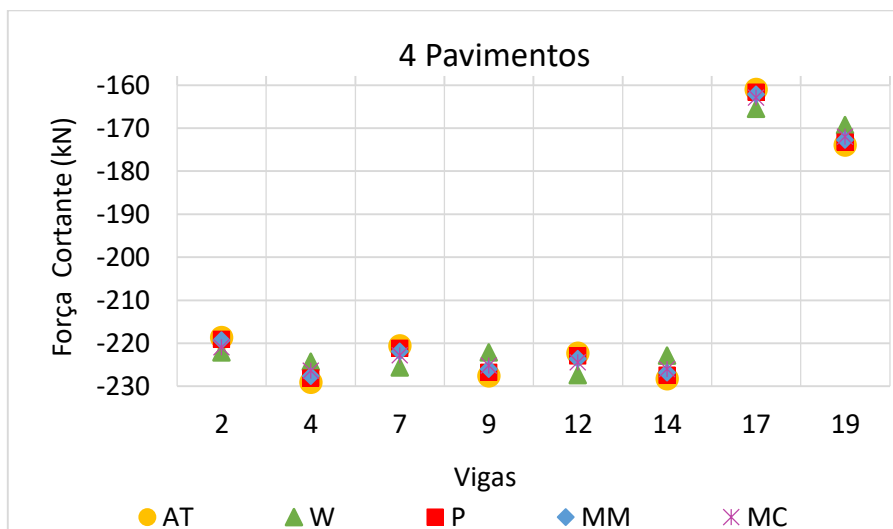


Gráfico 14 - Força Cortante nas Vigas do Pórtico de 7 Pavimentos

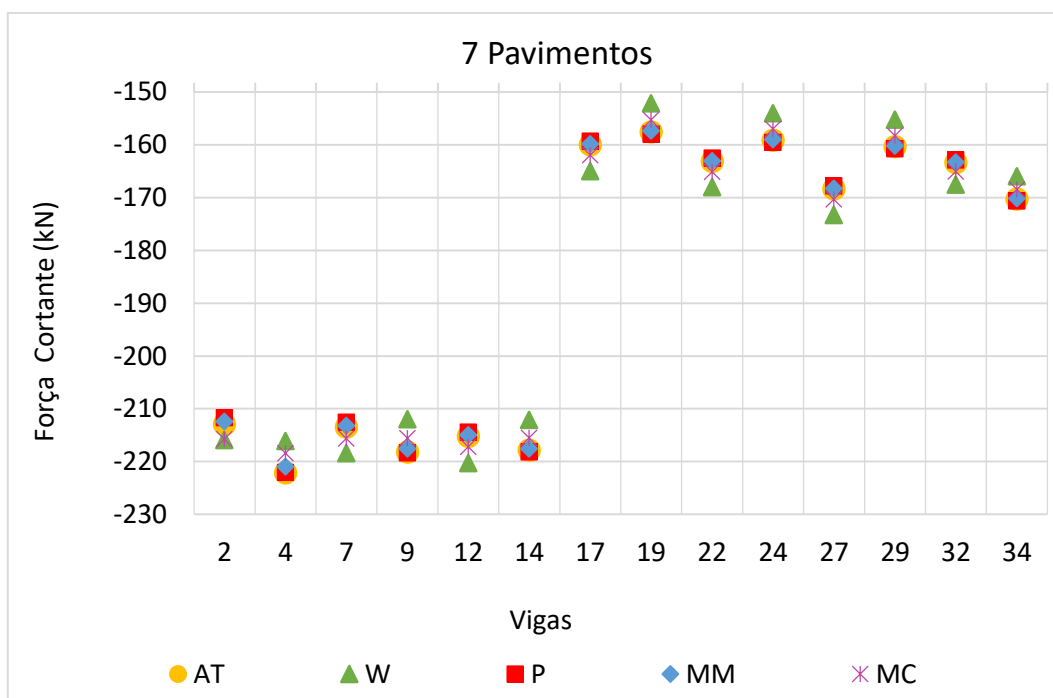
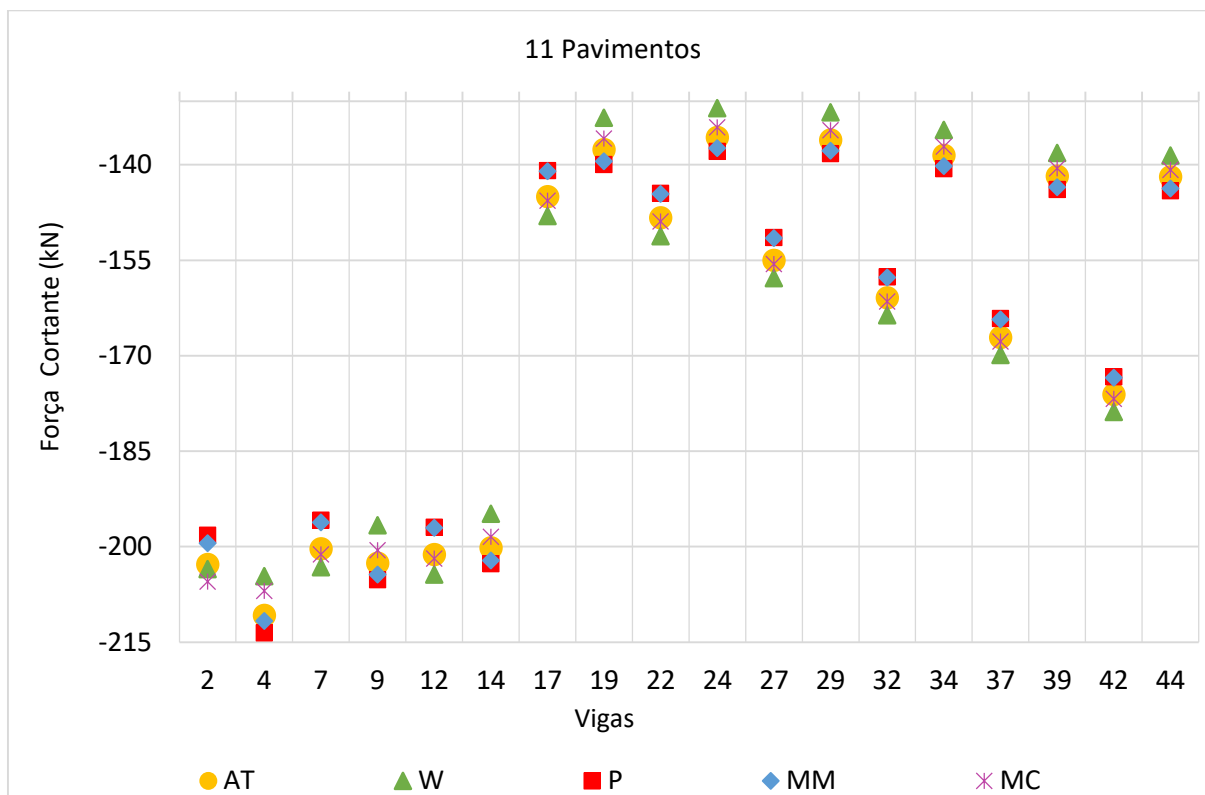


Gráfico 15 - Força Cortante nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos

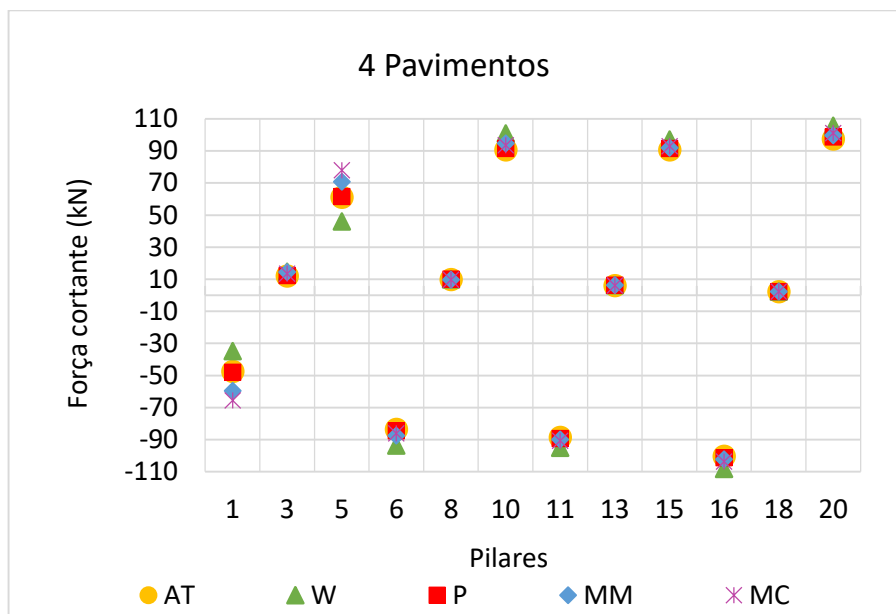


Fonte: do Autor

Os valores da força cortante, nos pilares dos três pórticos para os cinco modelos analisados, estão apresentados no apêndice, nas Tabelas 32 a 34 e nas Figuras 47 a 49.

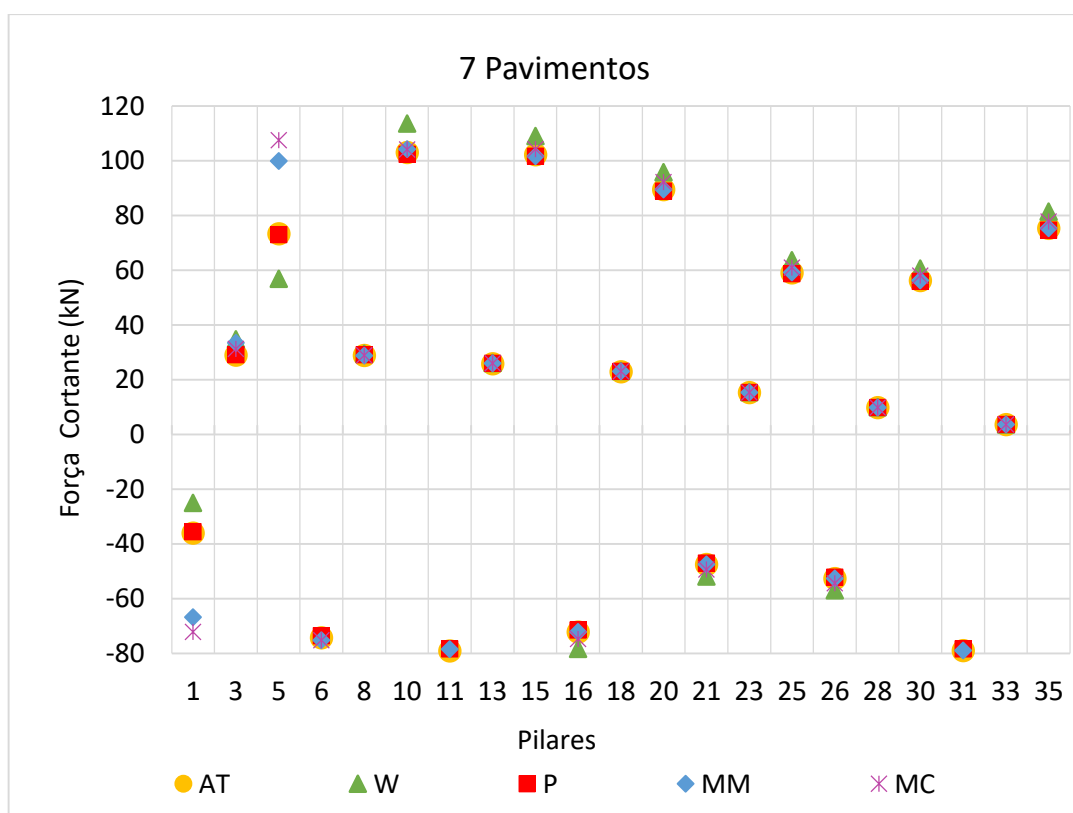
Para avaliar as diferenças dos resultados, foram desenvolvidos os Gráficos 16, 17 e 18, que apresentam o resultado da força cortante (eixo das ordenadas) nos pilares (eixo das abscissas) do pórtico de 4, 7 e 11 pavimentos, respectivamente, considerando todos os modelos. Observa-se que, o tipo de modelo influenciou no resultado dos pilares de forma bem significativa no primeiro pavimento. A média de diferença percentual dos modelos de ISE com relação ao modelo com apoio teórico, para os pilares 1, 3 e 5 dos três pórticos, são da ordem de 20% no pórtico de 4 pavimentos, 35% no pórtico de 7 pavimentos e 100% no pórtico de 11 pavimentos. Pode-se observar que, o número de pavimentos influencia nos resultados.

Gráfico 16 - Força Cortante nos Pilares do Pórtico de 4 Pavimentos



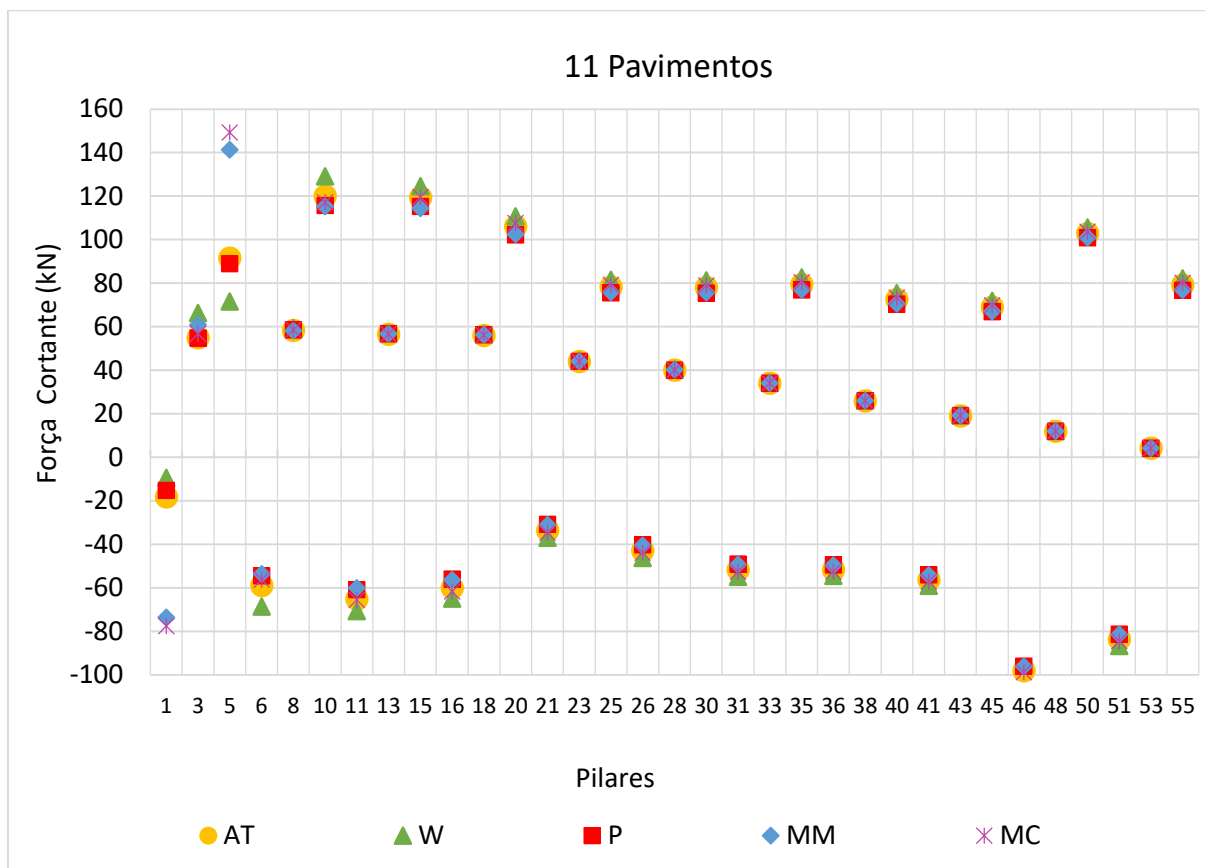
Fonte: do Autor

Gráfico 17 - Força Cortante nos Pilares do Pórtico de 7 Pavimentos



Fonte: do Autor

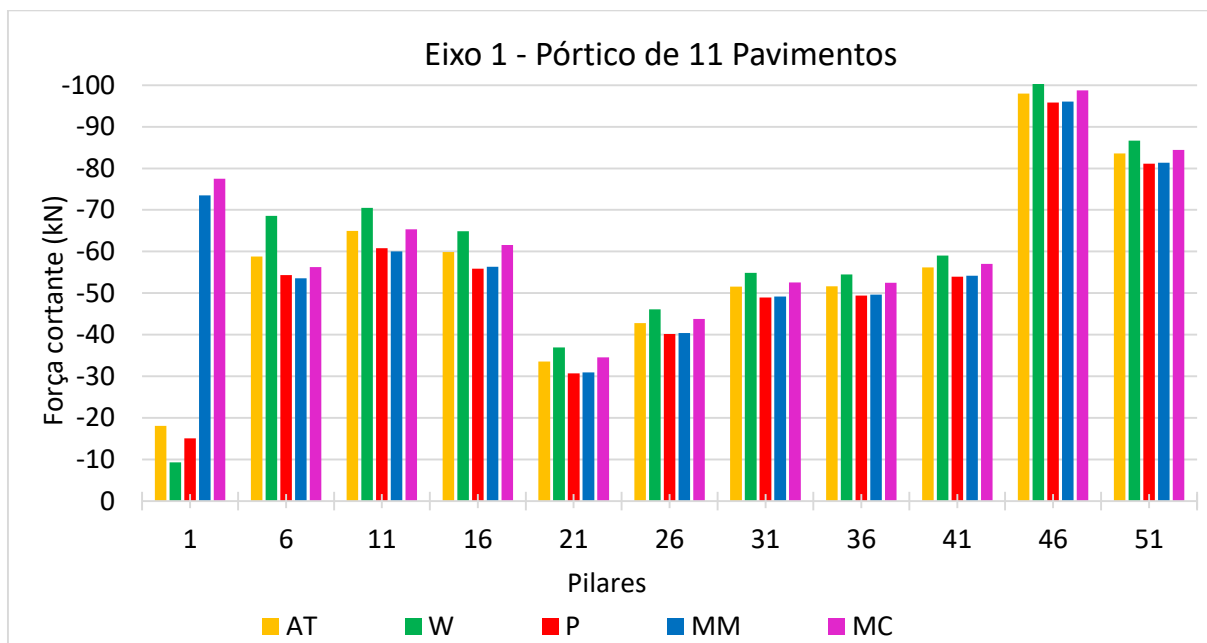
Gráfico 18 - Força Cortante nos Pilares do Pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: do Autor

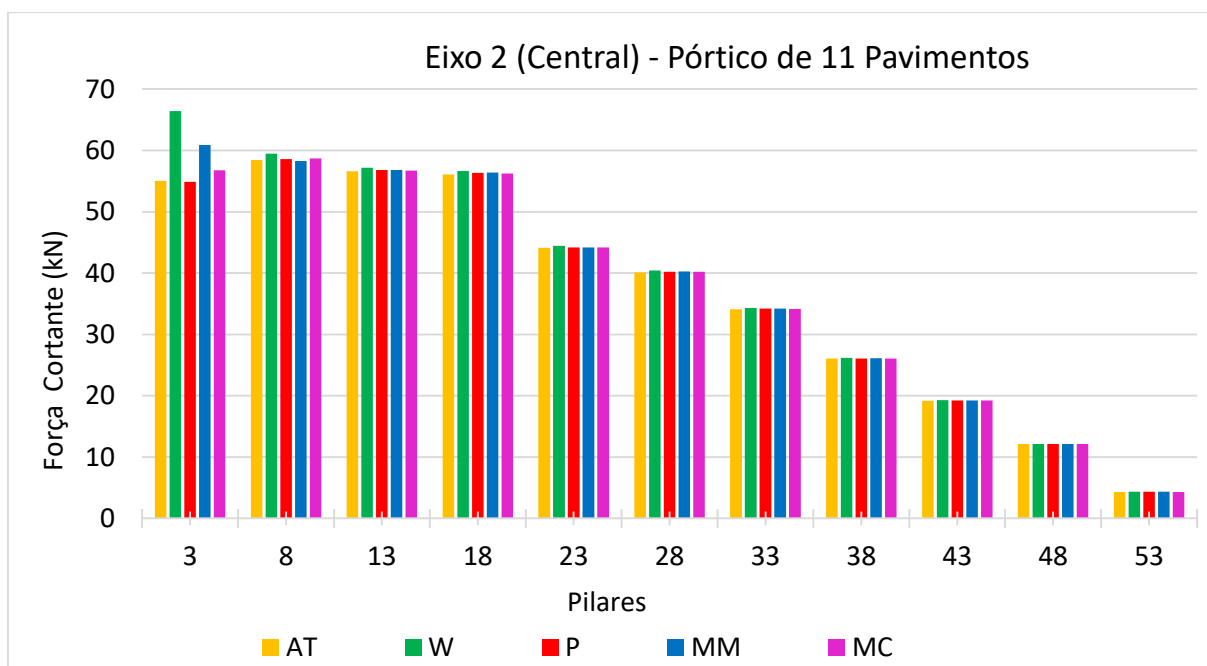
Os Gráficos 19, 20 e 21 apresentam os valores da força cortante nos pilares do eixo 1, eixo 2 e eixo 3, respectivamente, para o pórtico de 11 pavimentos. Pode-se notar uma grande diferença nos valores da força cortante para os pilares do primeiro pavimento, sendo que essa diferença é acentuada nos eixos da extremidade. Observa-se também que, os valores da força cortante considerando-se os modelos com apoio teórico e de Pasternak foram próximos entre si. Nesses mesmos pilares, os valores da força cortante considerando o modelo com malha de molas contínuas e o modelo de meio contínuo apresentaram valores bem próximos entre si e diferentes dos demais modelos, já o modelo de Winkler não apresentou um padrão de proximidade se avaliados os pórticos com alturas diferentes. Para o pilar central, onde a diferença dos valores da força cortante foi menor entre os modelos, observa-se que o modelo de Winkler foi aquele que mais se distanciou aos demais modelos.

Gráfico 19 - Força Cortante nos Pilares do Eixo 1 - Pórtico de 11 Pavimentos



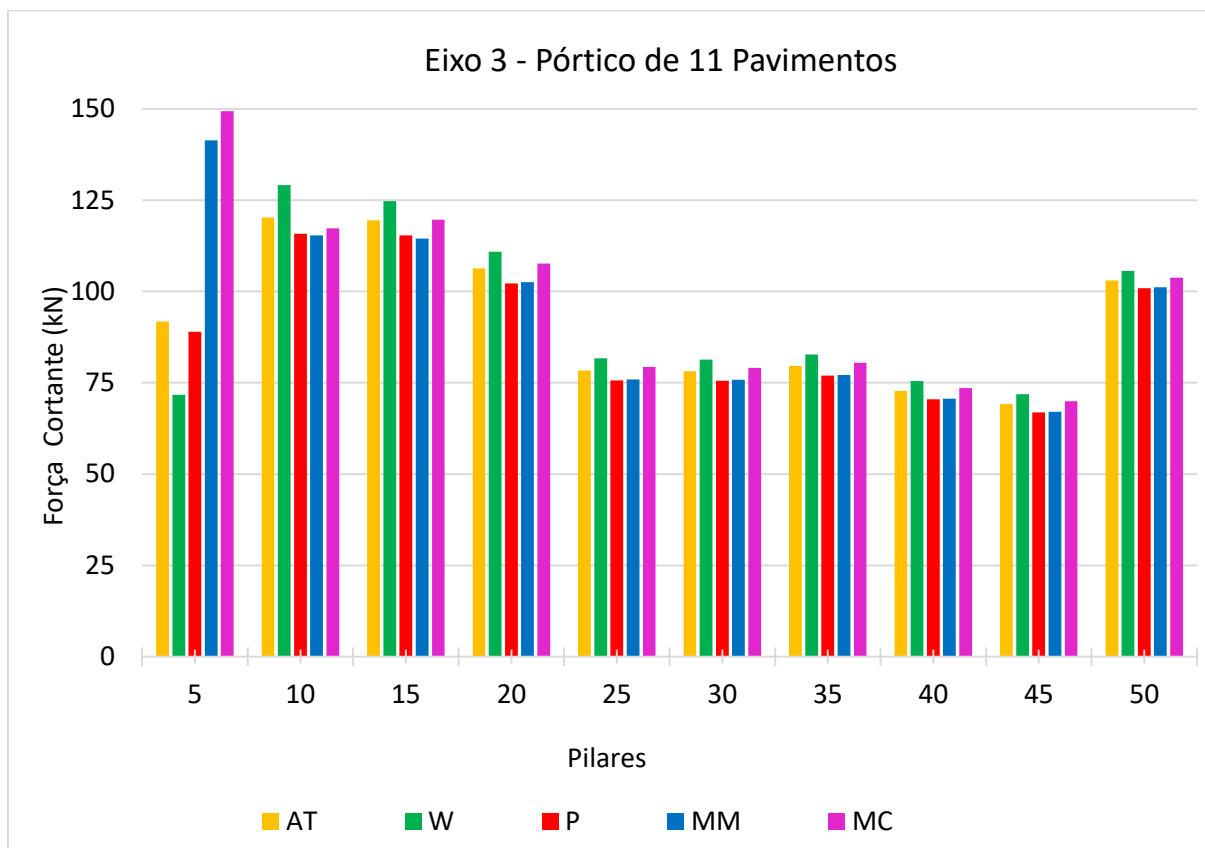
Fonte: do Autor

Gráfico 20 - Força Cortante nos Pilares do Eixo 2 - Pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: do Autor

Gráfico 21 - Força Cortante nos Pilares do Eixo 3 - Pórtico de 11 Pavimentos



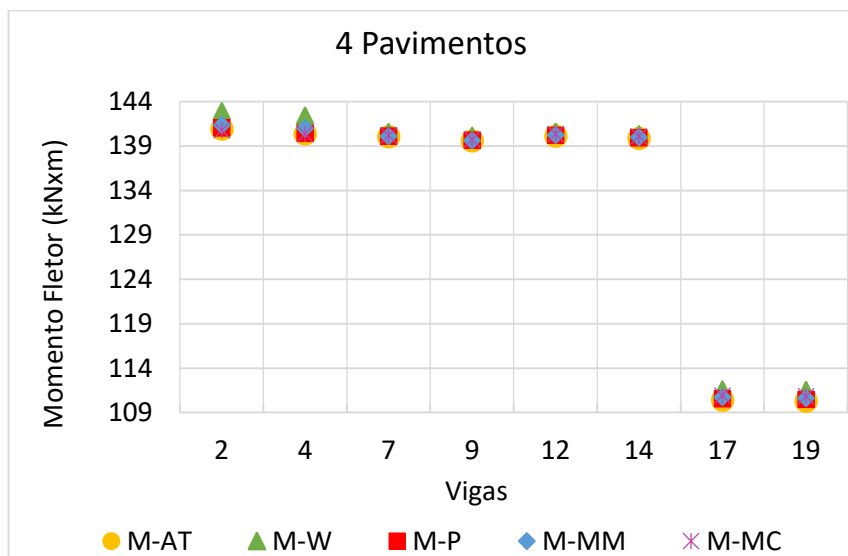
Fonte: do Autor

#### 4.4.3 Momento fletor

Os valores do momento fletor nas vigas dos três pórticos para os cinco modelos analisados, estão apresentados nas Tabelas 35 a 37 e nas Figuras 50 a 52, do apêndice.

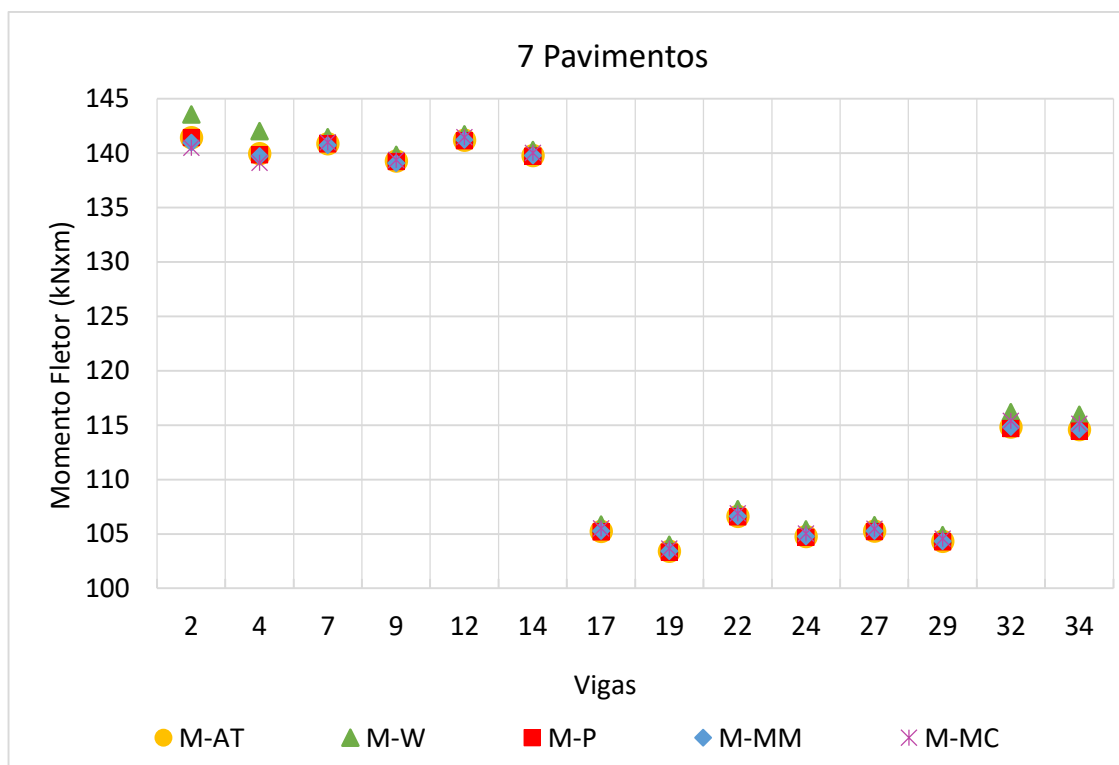
Para avaliar as diferenças dos resultados, foram desenvolvidos os Gráficos 22, 23 e 24, que apresentam o resultado do momento fletor (eixo das ordenadas) nas vigas (eixo das abscissas) do pórtico de 4, 7 e 11 pavimentos, respectivamente, considerando todos os modelos. Observa-se que o tipo de modelo não altera de forma significativa os valores do momento fletor nas vigas. A diferença percentual média desse esforço nas vigas dos modelos com ISE com relação ao modelo teórico é na ordem de 10% para o pórtico de 11 pavimentos e de 5% para os pórticos de 4 e 7 pavimentos.

Gráfico 22 - Momento fletor nas Vigas do Pórtico de 4 Pavimentos



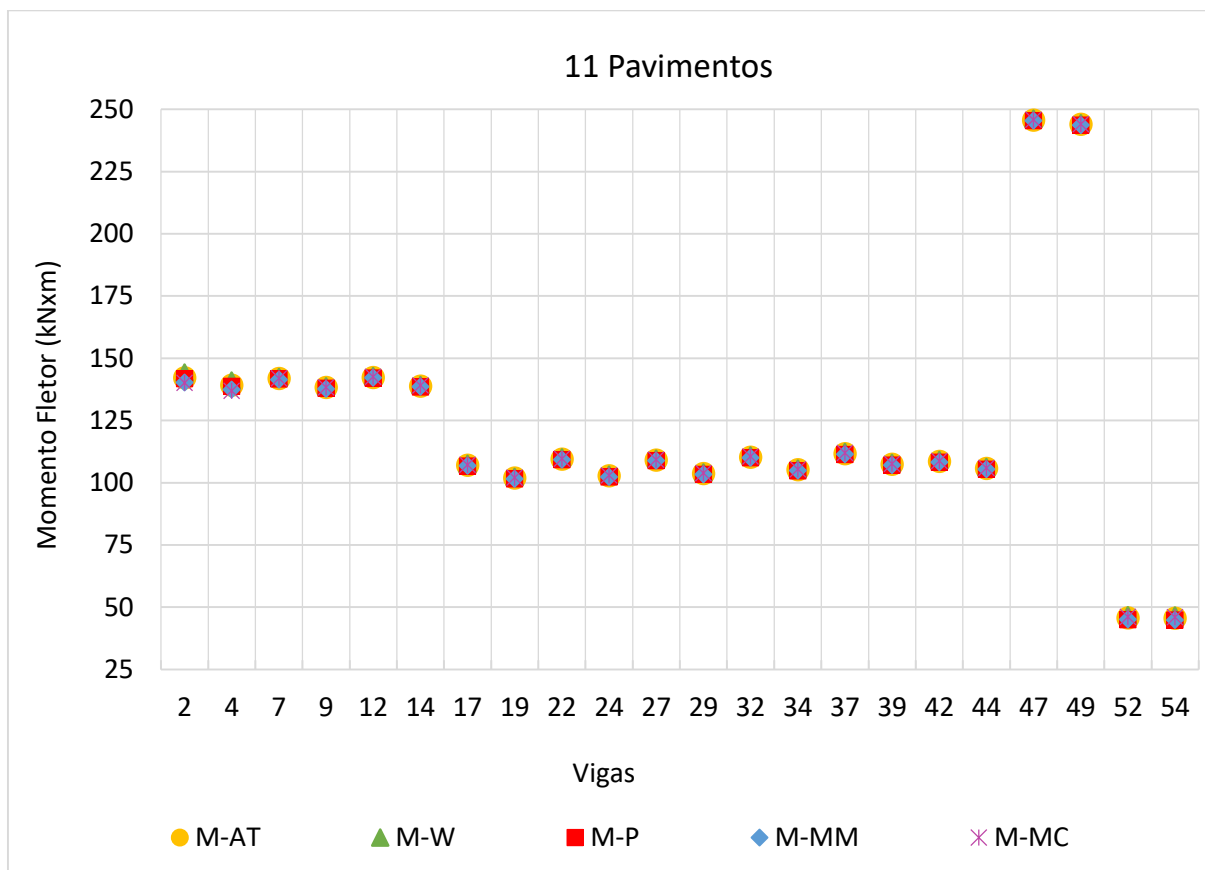
Fonte: do Autor

Gráfico 23 - Momento Fletor nas Vigas do Pórtico de 7 Pavimentos



Fonte: do Autor

Gráfico 24 - Momento Fletor nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos

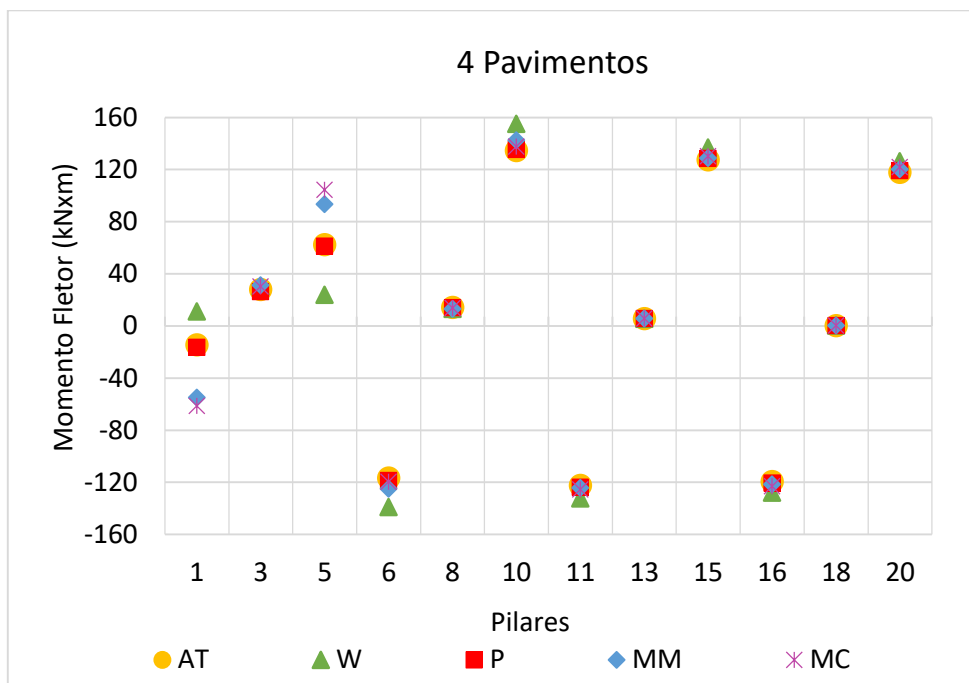


Fonte: do Autor

Os valores do momento fletor nos pilares dos três pórticos para os modelos analisados estão apresentados nas Tabelas 38 a 40 e nas Figuras 53 a 55, do apêndice.

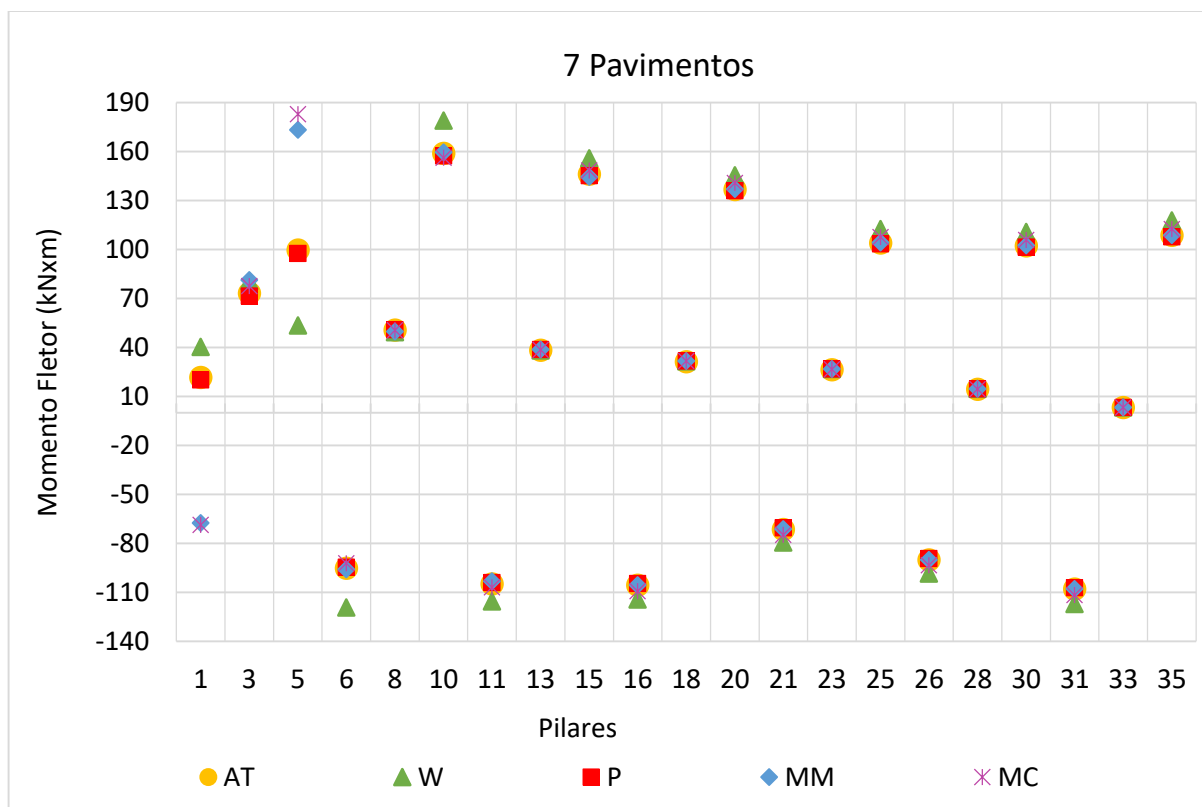
Para avaliar as diferenças dos resultados foram gerados os Gráficos 25, 26 e 27 apresentam o resultado do momento fletor (eixo das ordenadas) nos pilares (eixo das abscissas) do pórtico de 4, 7 e 11 pavimentos, respectivamente, considerando todos os modelos. Observa-se que o tipo de modelo influencia no resultado dos pilares de forma bem significativa no primeiro pavimento. A maior diferença percentual dos modelos de ISE com relação ao modelo com apoio teórico para os pilares 1, 3 e 5 dos três pórticos atinge 400% para os modelos de malha de molas contínuas e meio contínuo, os quais apresentaram, também, os maiores valores de recalques diferenciais verticais.

Gráfico 25 - Momento Fletor nos Pilares do Pórtico de 4 Pavimentos



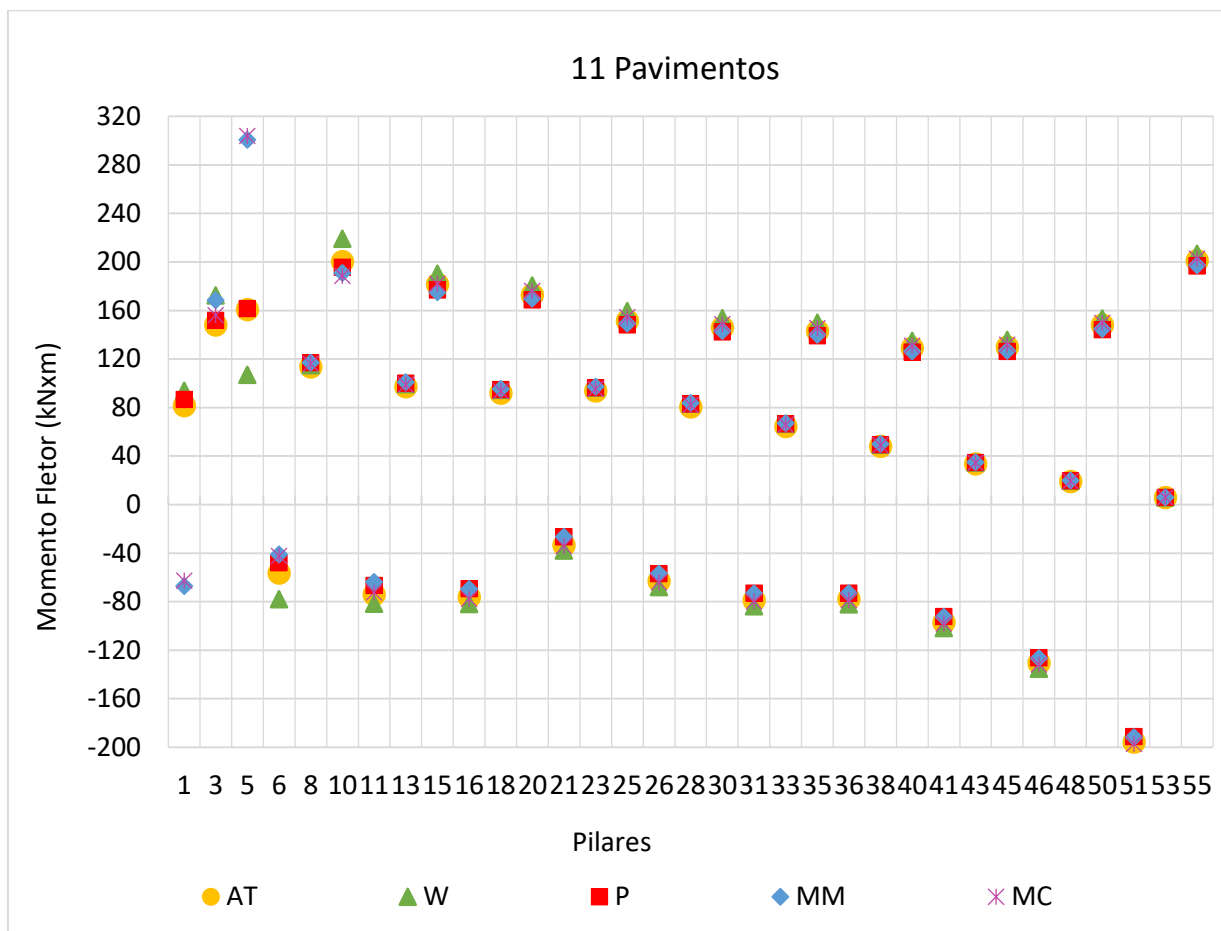
Fonte: do Autor

Gráfico 26 - Momento Fletor nos Pilares do Pórtico de 7 Pavimentos



Fonte: do Autor

Gráfico 27 - Momento Fletor nos Pilares do Pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: do Autor

Os Gráficos 28, 29 e 30 apresentam os valores de momento fletor nos pilares do primeiro andar, para os pórticos de 4,7 e 11 pavimentos, respectivamente. Pode-se observar diferenças desse esforço solicitante entre os modelos, inclusive com inversão de sinais para o pilar 1.

Gráfico 28 - Momento Fletor nos Pilares do Primeiro Pavimento - Pórtico de 4 Pavimentos

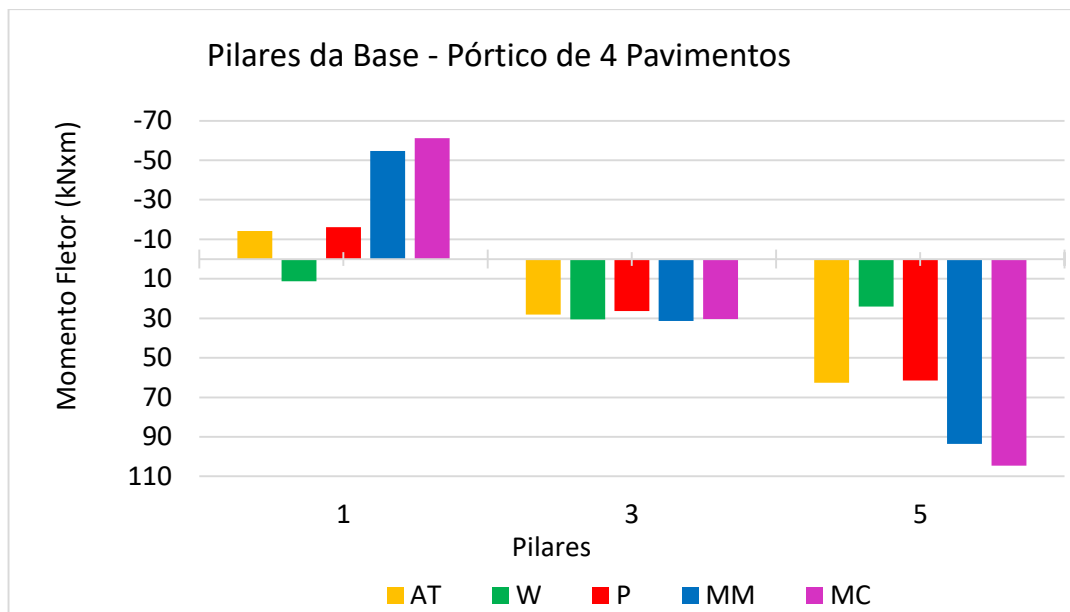
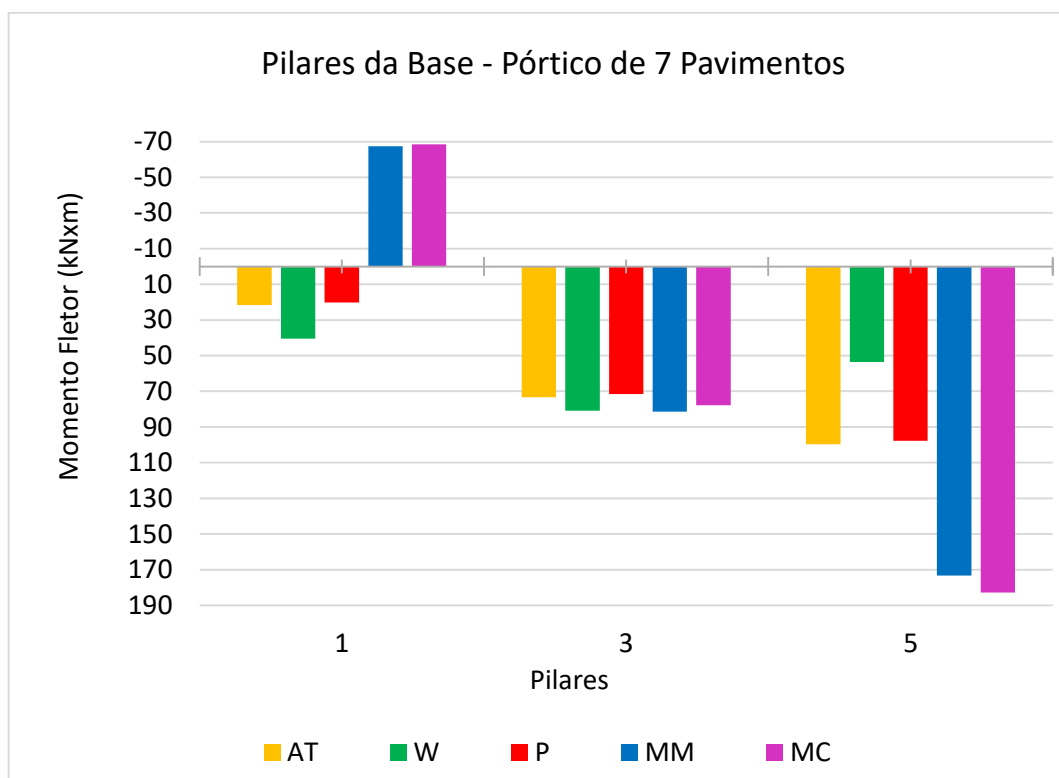
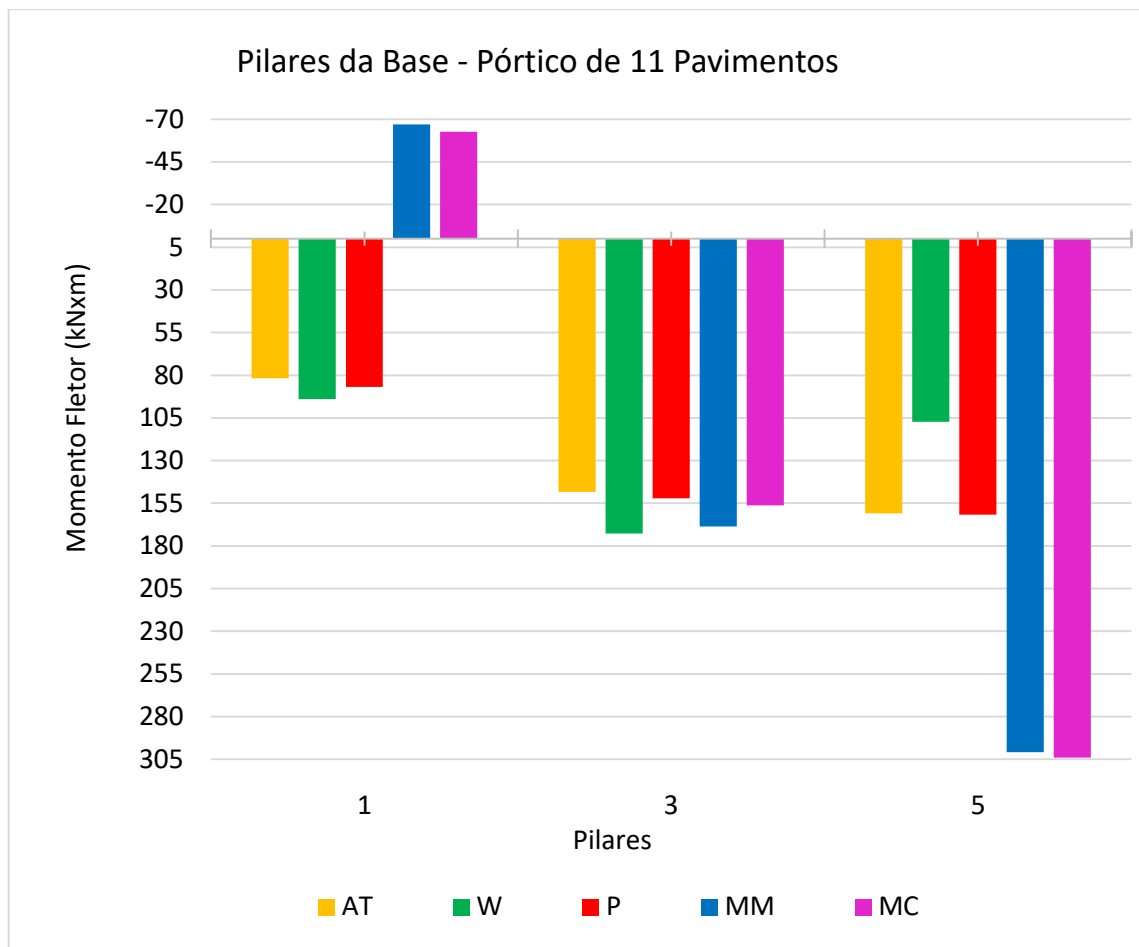


Gráfico 29 - Momento Fletor nos Pilares do Primeiro Pavimento - Pórtico de 7 Pavimentos



*Gráfico 30 - Momento Fletor nos Pilares do Primeiro Pavimento - Pórtico de 11 Pavimentos*



Fonte: do Autor

## 5.0 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os recalques absolutos dos modelos considerando a ISE são superiores aos valores dos modelos com apoios teóricos, cujo comportamento já era esperado, pois o apoio teórico não permite nenhum deslocamento vertical na base e, isso se reflete em todos os pavimentos.

Dentre os modelos que consideram a ISE, aqueles com a utilização de molas (Winkler, Pasternak e malha de molas contínuas), apresentaram valores de deslocamentos verticais e horizontais absolutos superiores aos valores encontrados no modelo com meio contínuo. O modelo que considera a ISE por meio de malha de molas contínuas apresentou maior flexibilidade, com os maiores valores de deslocamentos verticais e horizontais absolutos, ao contrário do modelo que considera o meio contínuo, que apresentou maior rigidez sob a fundação dentre todos os modelos com ISE.

A Tabela 15 apresenta os resultados dos deslocamentos horizontais ( $D_x$ ) nos nós da base dos pórticos com 4, 7 e 11 pavimentos, para todos os modelos estudados. Observa-se que, no caso do modelo teórico esse valor é igual a zero, conforme esperado. No modelo de Pasternak, todos os nós da base se deslocam com o mesmo valor, consequência das características atribuídas ao modelo. Este modelo considera uma placa que apresenta apenas deformações transversais de cisalhamento, ou seja, a placa é impedida de apresentar deformações no plano da base, funcionando como um diafragma rígido. Essa rigidez faz com que todos os nós se movam juntos nessa direção, apresentando um comportamento bem diferente se comparados aos deslocamentos horizontais nos nós da base nos demais modelos de ISE.

Tabela 15 - Deslocamentos Horizontais nos nós ( $D_x$ ) em mm

| <b>Pórtico de 4 Pavimentos</b>  |       |       |      |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|
| Nó                              | Dx-AT | Dx-W  | Dx-P | Dx-MM | Dx-MC |
| Nº                              | (mm)  | (mm)  | (mm) | (mm)  | (mm)  |
| N1                              | 0,00  | -0,39 | 0,09 | 0,78  | 0,10  |
| N2                              | 0,00  | 0,15  | 0,09 | 1,28  | 0,19  |
| N3                              | 0,00  | 0,69  | 0,09 | 1,83  | 0,31  |
| <b>Pórtico de 7 Pavimentos</b>  |       |       |      |       |       |
| Nó                              | Dx-AT | Dx-W  | Dx-P | Dx-MM | Dx-MC |
| Nº                              | (mm)  | (mm)  | (mm) | (mm)  | (mm)  |
| N1                              | 0,00  | -0,23 | 0,23 | 2,47  | 0,56  |
| N2                              | 0,00  | 0,35  | 0,23 | 2,87  | 0,46  |
| N3                              | 0,00  | 0,85  | 0,23 | 3,26  | 0,34  |
| <b>Pórtico de 11 Pavimentos</b> |       |       |      |       |       |
| Nó                              | Dx-AT | Dx-W  | Dx-P | Dx-MM | Dx-MC |
| Nº                              | (mm)  | (mm)  | (mm) | (mm)  | (mm)  |
| N1                              | 0,00  | 0,04  | 0,50 | 5,19  | 1,26  |
| N2                              | 0,00  | 0,67  | 0,50 | 5,43  | 0,91  |
| N3                              | 0,00  | 1,07  | 0,50 | 5,57  | 0,42  |

Fonte: do Autor

O fato de os modelos com apoios teóricos e de Pasternak não apresentarem um diferencial no deslocamento horizontal dos nós da base para todos os pórticos analisados, provavelmente explica a proximidade dos resultados dos esforços solicitantes obtidos nesses modelos.

Se no modelo estrutural as lajes da edificação trabalham como diafragmas rígidos, uniformizando os deslocamentos horizontais nos pavimentos, talvez o modelo de Pasternak seja o mais adequado para avaliar os pórticos isolados de edificações que apresentam esse comportamento na superestrutura. Entretanto, para fazer essa afirmação, faz-se necessário realizar o estudo de um pórtico considerando o efeito de diafragma rígido proporcionado pelas lajes, que fica como sugestão para trabalhos futuros.

O modelo de malha de molas apresentou um comportamento padrão para os três pórticos, sendo sempre os valores de  $N3 > N2 > N1$ , mostrando que as molas que representam o solo nesse modelo apresentam um deslocamento horizontal acumulativo de um nó para outro e uma grande flexibilidade das molas na direção horizontal. No modelo de meio contínuo, o comportamento foi semelhante ao de malha de molas para o pórtico de 4 pavimentos, mas a partir do pórtico com 7 pavimentos, cujas cargas horizontais são maiores, os valores de  $N1 > N2 > N3$  evidenciam que os

elementos sólidos, que representam o solo nesse modelo, criam uma resistência ao deslocamento horizontal.

O modelo de Winkler, que não considera nenhum tipo de ligação entre as sapatas, senão pela superestrutura, foi aquele que apresentou a maior diferença, em termos de comportamento dos deslocamentos horizontais com relação aos demais modelos. No modelo de Winkler, o nó N1 para os pórticos de 4 e 7 pavimentos apresentaram deslocamentos negativos, ou seja, contrário ao sentido de aplicação da força do vento o que, pode explicar em partes, a grande divergência dos valores de esforços solicitantes se comparados aos demais modelos.

No que diz respeito ao número de pavimentos, ao se comparar os três pórticos, observou-se que a altura da edificação influencia no comportamento dos modelos de cálculo para os deslocamentos horizontais, pois a distância entre as linhas do gráfico não se manteve constante com esse aumento. Para os deslocamentos verticais, os valores tornaram-se maiores com o aumento do número de pavimentos, mas a distância entre as linhas dos gráficos se manteve constante. Portanto, todos os modelos apresentaram comportamentos semelhantes com relação aos recalques verticais absolutos.

Na avaliação dos recalques diferenciais, que são de grande importância tendo em vista que eles impõem maiores ou menores esforços solicitantes na estrutura, foi constatado que os modelos de malha de molas contínuas e de meio contínuo apresentaram os maiores valores, o que está coerente com a bibliografia referenciada, como por exemplo, no estudo de FUCHS e ASSIS (2017) e FRUTOSO et al. (2016). Os autores observaram maiores deslocamentos nos modelos com a modelagem do solo como meio contínuo quando comparados aos modelos simplificados sem a ligação dos elementos de fundação. FUCHS e ASSIS (2017) concluíram ainda que, pelo fato de que, nesses modelos mais elaborados, os recalques são estimados considerando o carregamento das fundações de forma simultânea, ou seja, se somando.

Avaliando-se todos os gráficos de esforços solicitantes apresentados anteriormente, observa-se que as grandes diferenças de valores dos esforços solicitantes ficaram concentradas na base da edificação, evidenciando a importância da rigidez da superestrutura em absorver os recalques diferenciais da edificação em concordância com a teoria apresentada no 2.1.2.

Comparando-se os resultados da força normal, da força cortante e do momento fletor obtidos nos modelos com apoios teóricos e nos modelos com ISE, percebe-se uma redistribuição desses esforços solicitantes na estrutura, conforme também apresentada nos trabalhos de PORTO (2010) e RIBEIRO; ALMEIDA; PAIVA, (2011). As diferenças encontradas podem estar contra ou a favor da segurança, e isso, vai depender do elemento estrutural analisado.

Observou-se que para cada tipo de modelagem, mesmo utilizando-se os mesmos parâmetros, ou seja, a mesma sondagem do solo, os mesmos valores do módulo de elasticidade ( $E$ ) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), os resultados encontrados para cada modelo apresentaram grandes variações entre si, principalmente na base da edificação. Esse resultado está em concordância com outros trabalhos apresentados na literatura.

De uma forma geral, as grandes diferenças são notadas nas barras, sejam vigas ou pilares, que estão mais próximas da fundação, devido aos recalques diferenciais. Pode-se afirmar que a rigidez da superestrutura contribui para a uniformização desses recalques reduzindo de forma significativa as diferenças dos esforços solicitantes entre os modelos ao analisar os pavimentos superiores.

‘Também pode ser observado, por meio da análise dos recalques diferenciais, que, considerar a influência das pressões de uma fundação isolada nas fundações vizinhas, pode vir a aumentar os recalques diferenciais na base, evidenciado pela diferença dos valores de momento fletor nas barras do primeiro pavimento.

Com relação ao resultado da força normal nas barras dos pórticos, observa-se que as vigas do primeiro pavimento foram os elementos estruturais que apresentaram maior influência com a flexibilização dos apoios. Essa diferença é aumentada quanto maior for o número de pavimentos, com diferenças percentuais que chegaram a 120%, ocorrendo também a inversão de valores, passando de barras tracionadas para barras comprimidas. Para cada tipo de modelo, a porcentagem de diferença com relação ao apoio teórico também varia. Nota-se novamente que, o número de pavimentos e, conseqüentemente, o carregamento atuante, influencia no comportamento estrutural da edificação. Mas, para o dimensionamento estrutural das vigas em edificações predominantemente residenciais ou comerciais, esse esforço solicitante não é o que determina as dimensões necessárias desse elemento estrutural, o momento fletor e a força cortante são os esforços mais importantes.

Portanto, apesar do aumento percentual ser significativo, não há grande influência no dimensionamento.

Para os pilares, a força normal, apresentaram alterações pequenas, na ordem de 2%, com uma tendência de redução desse esforço nos pilares centrais e aumento nos pilares periféricos.

Com relação ao resultado da força cortante e do momento fletor nas vigas, observa-se que esses esforços não apresentaram influência significativa com a flexibilização dos apoios, ficando com uma diferença média de 3% e 7%, respectivamente, para os três tipos de pórtico (4, 7 e 11 pavimentos).

A força cortante nos pilares do primeiro pavimento considerando os modelos com ISE apresentou grande diferença de valores com relação ao apoio teórico, cujo percentual aumenta com o aumento do número de pavimentos, chegando a valores na ordem de 100% de diferença para o pórtico mais alto. Entretanto, para o dimensionamento estrutural em edificações predominantemente residenciais ou comerciais, esse esforço solicitante não é o que determina as dimensões necessárias dos pilares, sendo a força normal e o momento fletor os esforços mais importantes. Logo, apesar do aumento percentual ser significativo, não há grande influência no dimensionamento.

O momento fletor nos pilares do primeiro pavimento foi o esforço solicitante que apresentou a maior variação e diferença percentual se comparados os modelos com ISE aos modelos com apoio teórico, atingindo uma diferença de 400% para o pórtico mais alto. Pode-se afirmar que, a diferença nos valores desse esforço é a mais importante de ser avaliada, pois determina o dimensionamento estrutural do pilar. Essa diferença merece um destaque já que, apesar de estruturas apresentarem problemas de fissuração, trincas e até rompimento devido à recalques de fundação, em sua maioria, as edificações são e estão estáveis sem que fosse feita essa análise no passado. Nessa pesquisa não foi considerado o efeito de diafragma rígido que ocorre pela presença das lajes nas edificações e, acredita-se que, essa diferença seria amenizada com a consideração dessa importante influência e contribuição das lajes da edificação. Foi visto que a superestrutura contribui na absorção dos deslocamentos e, conseqüentemente, na distribuição dos esforços solicitantes. Logo, como sugestão para trabalhos futuros, avaliar esses mesmos pórticos considerando a contribuição das lajes é importante para justificar e melhorar as grandes diferenças percentuais encontradas.

Os resultados da força cortante e do momento fletor nos pilares obtidos considerando o modelo de Pasternak aproximaram-se mais do modelo teórico, enquanto que, os modelos de malha de molas contínuas e de meio contínuo apresentaram as maiores diferenças com relação ao apoio teórico e ficaram com valores próximos entre si. Entretanto, o modelo de Winkler não apresentou um padrão de comportamento.

Além dos resultados de deslocamentos e dos esforços solicitantes obtidos para os pórticos considerando os modelos de ISE divergirem dos resultados obtidos considerando os apoios indeslocáveis, pode-se notar que, entre os quatro modelos de ISE, os valores de deslocamentos e dos esforços também apresentaram diferenças que não seguiram um padrão, apresentando inclusive, uma inversão dos sinais. Acredita-se que, quanto maior o refinamento do modelo, ou seja, quanto mais se aproximar da situação real da edificação, mais confiáveis são os resultados. Tendo isso em vista, os resultados obtidos nas análises trouxeram uma similaridade, no que tange aos esforços solicitantes, do modelo considerando-se malha de molas com o modelo considerando-se o meio contínuo.

Na Tabela 16 está apresentada uma síntese da avaliação da influência da flexibilização dos apoios nos elementos estruturais, cujas variações ocorrem basicamente no primeiro pavimento. O símbolo “✓” indica que há grande variação dos valores com relação à análise dos apoios indeslocáveis, e a marcação com “X” são aqueles cuja diferença máxima obtida foi na ordem de 10%.

*Tabela 16 - Avaliação da Influência da Flexibilização dos apoios nos elementos estruturais nos esforços solicitantes*

| Influência da Flexibilização dos apoios nos elementos estruturais |       |         |
|-------------------------------------------------------------------|-------|---------|
| Esforço Solicitante                                               | Vigas | Pilares |
| Normal                                                            | ✓     | X       |
| Cortante                                                          | X     | ✓       |
| Momento fletor                                                    | X     | ✓       |

Fonte: do Autor

Conforme apresentado na Tabela 16, observa-se que o momento fletor é o esforço que de fato influencia no dimensionamento da estrutura, em especial nos pilares da base da edificação.

## 6.0 CONCLUSÃO

O objetivo principal do trabalho foi investigar diversos tipos de modelos considerando-se os efeitos da interação do solo com a estrutura e compará-los com a estrutura modelada utilizando engastes perfeitos como apoio.

Três pórticos com alturas diferentes e utilizando-se de quatro modelos para simular a flexibilidade do solo foram analisados, visando avaliar o comportamento da estrutura quanto ao aumento de rigidez da superestrutura. Análises comparativas dos resultados obtidos dos esforços solicitantes e dos deslocamentos dentre esses modelos foram apresentados.

Pode-se concluir que a variação dos esforços solicitantes nos modelos que levam em consideração a ISE não é linear, ou seja, há uma redistribuição que precisa ser analisada e, com isso, torna-se difícil a proposição de um coeficiente de minoração ou majoração dos esforços na tentativa de se evitar a necessidade dessa análise.

Com relação à comparação dos pórticos com alturas diferentes pode-se concluir que há uma influência com tendência a aumento das diferenças percentuais na base para edificações mais altas.

Pode-se afirmar que a rigidez da superestrutura é, de fato, de suma importância no equilíbrio do pórtico, pois percentualmente é observado que as maiores diferenças dos esforços solicitantes se concentram no primeiro pavimento. Propõe-se então, que a avaliação da ISE para pórticos isolados seja feita utilizando a consideração de diafragma rígido de forma a considerar a contribuição das lajes, pois assim, espera-se que a influência da ISE seja minimizada, reduzindo a diferença percentual encontrada com relação aos modelos com apoios teóricos.

Dentre os modelos de ISE estudados, o modelo de meio contínuo é o único que fornece informações de distribuição das tensões ao longo da profundidade do solo e permite verificar, com base nas teorias atuais, se os resultados estão compatíveis com o que se espera do comportamento do solo estudado. Portanto, pode-se dizer que esse modelo, se comparado aos demais, se mostra mais adequado para avaliar as respostas relacionadas ao solo, o que confere a ele uma maior credibilidade, podendo ser refinado, se consideradas as particularidades de não linearidade física que o solo apresenta.

O modelo com malha de molas contínuas apresentou valores de deslocamentos absolutos bem maiores se comparados aos demais modelos e, além disso, não é

possível avaliar o comportamento do solo em termos de tensões, apenas em termos de deslocamentos. Quando se compara os valores dos esforços solicitantes e recalques diferenciais, os resultados desse modelo se aproximam, mas sem manter um padrão, com os resultados obtidos considerando o modelo de meio contínuo, o que era esperado, por apresentar um refinamento maior na modelagem e representação mais realista do solo. Entretanto, em termos de exigência computacional, o modelo com malhas de molas foi aquele que apresentou maior tempo de processamento dentre todos os modelos. Portanto, pode-se concluir que, dentre os dois modelos, o modelo de meio contínuo se sobressai com relação ao de malha de molas contínuas.

Esperava-se que o modelo de Pasternak apresentasse resultados intermediários entre o modelo de Winkler e os modelos com malha de molas e meio contínuo, com resultados mais próximos desses últimos, já que o modelo de Winkler possui uma falha no que tange à interação das fundações que estão próximas. Entretanto, isso não ocorreu, pois os diagramas dos esforços solicitantes do modelo de Pasternak apresentaram valores mais próximos do modelo de apoio teórico e no modelo de Winkler aconteceu justamente o contrário. Pode-se então dizer que, utilizar elementos para ligar horizontalmente as molas de Winkler, ajuda a fazer a interação entre as sapatas vizinhas, mas não substitui a modelagem do solo na tentativa de se fazer uma análise mais refinada da flexibilidade dos apoios, mas pode vir a ser o modelo mais adequado para representar pórticos de edificações reais que tenham lajes funcionando como diafragma rígido, uniformizando, dessa forma, os deslocamentos horizontais.

E, por fim, apesar de todas as diferenças dentre os modelos apresentados, pode-se concluir que a flexibilização dos apoios de uma estrutura influencia de maneira significativa nos elementos estruturais mais próximos da fundação e o esforço mais relevante nesse estudo foi o momento fletor nos pilares da base da edificação, cuja diferença percentual chegou a 400% para o pórtico de 11 pavimentos.

## 6.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As limitações da pesquisa apresentadas estão relacionadas, principalmente, ao fato de que o solo é um material heterogêneo, que apresenta características diferentes quando submerso e quando submetido a carregamentos. Essas situações não estão descritas na bibliografia e, não é possível fazer as medições tendo em vista que o trabalho proposto é teórico.

Logo, as principais limitações da pesquisa são:

- Incertezas relacionadas aos parâmetros do solo, pois no presente trabalho, não foram realizados ensaios, utilizando-se apenas das informações da sondagem do solo e de correlações teóricas.
- Incertezas relacionadas aos recalques encontrados, pois não será possível, para esse trabalho, fazer medições *in loco* para validar o modelo mais adequado.

## 6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Ao final deste trabalho, considerando a consistência dos resultados alcançados pela análise dos efeitos de 2ª ordem de pórticos planos de aço considerando interação solo-estrutura, sugere-se para pesquisas futuras:

- Incorporar na análise o modelo não linear físico para representar o comportamento do solo de forma mais realista;
- Modelar e analisar pórticos tridimensionais para captar os diferentes efeitos da interação da estrutura com solo, levando-se em consideração a contribuição da rigidez que as lajes proporcionam à estrutura;
- Instrumentar uma edificação para avaliar os recalques reais comparando com os diversos modelos teóricos de forma a calibrá-los e validá-los.
- Avaliar pórticos isolados considerando o efeito de diafragma rígido.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, V. S.; RIBEIRO, DIMAS B.; PAIVA, J. B. **Investigação de Diferentes Modelos de Elementos de Contorno e Elementos Finitos Para a Análise Eficiente de Problemas de Interação Solo-Estrutura**. XXXII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (XXXII CILAMCE), 2011, Ouro Preto. XXXII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, v. 01. 2011.
- ANTONIAZZI, J. P. **Interação Solo-Estrutura De Edifícios Com Fundações Superficiais**. Universidade Federal de Santa Maria., 2011.
- ARANHA, N. et al. **A lei de Hooke e as molas não-lineares , um estudo de caso**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 38, nº4, n. July, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6489: Prova de carga direta sobre terreno de fundação**. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010.
- BARKAN, D. D. **Dynamics of Bases and Foundations**. New York, N. Y: McGraw-Hill Book co, 1962.
- BOWLES, J. E. **Foundation Analysis and Design**. 4. ed.. New York: McGraw-Hill, 1988.
- CÂMARA, K. R. DA R.; PEREIRA, A. DA C. **Análise De Perfis De Sondagem SPT E Caracterização Geotécnica De Solos Do Município De Natal**. Holos, ano 21. 2005.
- CATARINO, B. F. DA S. P. R. **Estudo da Interação solo-estrutura num edificio corrente**. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Porto, Portugal. 2009.
- CHAN, S. L.; ZHOU, Z. H. **On the development of a robust element for second-order “non-linear integrated design and analysis (NIDA)”**. Journal of Constructional Steel Research, v. 47, n. 1–2, 1998.
- COLARES, G. M. **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios**. Escola de Engenharia de São Carlos, 2006.
- FAKURY, R.H., SILVA, A.L.R.C., CALDAS, R.B. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço e Mistos de Aço e Concreto**. São Paulo: PEARSON, 2016.
- FAROUK, H.; FAROUK, M. **Effect of Elastic Soil Structure Interaction on Modulus of Subgrade Reaction**. Recent Advances in Material, Analysis, Monitoring, and Evaluation in Foundation and Bridge Engineering, American Society of Civil Engineers, jun. 2014
- FAROUK, H.; FAROUK, M. **Soil, Foundation, and Superstructure Interaction (I): Advanced Analyses of Shallow Foundations**. IFCEE 2015. American Society of Civil Engineers, mar. 2015
- FAROUK, H.; FAROUK, M. **Soil, Foundation, and Superstructure Interaction for Plane Two-Bay Frames**. International Journal of Geomechanics, v. 16, n. 1, fev. 2016.
- FRUTOSO, A. et al. **Análise numérica do comportamento de fundações superficiais do tipo sapata**. COBRAMSEG 2016, ABMS. 2016.
- FUCHS, A. W.; ASSIS, A. R. M. G. DE A. **Procedimentos numéricos para a consideração da interação solo- estrutura aplicados na resolução de pórticos planos**. Ignis, v.6, n.3, 2017.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. EAD Série educação a distância, 1º Ed. UFRGS. 2009.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 7º ed. 2010.

HOVATH, J. S. **Beam-column- Analogy model for soil structure interaction analysis**, Journal of Geotechnical Engineering, 1993, Vol. 119, No. 2, pp 358-364

IGLESIA, S. M. **O efeito P-Delta nas estruturas de edifícios**. AltoQi, Tecnologia aplicada à engenharia, 2016.

KHOURI, M. E. **PONTES DE CONCRETO ARMADO COM CONSIDERAÇÃO DAS NÃO-LINEARIDADES FÍSICA E GEOMÉTRICA E INTERAÇÃO SOLO -ESTRUTURA**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2001.

KURIAN, N. P. AND MANOJ KUMAR, N. G. A. **New continuous model for soil structure interaction** - Journal of Structure Engineering, 2001, Vol. 27, No. 4, pp 269-276

LEAL, L. A. A. DE S. **Análise elástica dos efeitos da não linearidade geométrica em estruturas de aço**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

MITROPOULOU, C. C. et al. **Influence of soil-structure interaction on fragility assessment of building structures**. Structures, v. 6, 2016.

MORAES, M. C. **Estruturas de fundações**. São Paulo: McGraw-Hill, 1976.

NIKOLAOU, K. D.; GEORGIADIS, K.; BISBOS, C. D. **Lower bound limit analysis of 2D steel frames with foundation-structure interaction**. Engineering Structures, v. 118, jul. 2016.

PEREIRA, A. **Projeto ótimo de pórticos planos com restrição à flambagem**. Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, 2002.

PERLOFF, W.H. **Pressure distribution and settlement**. In: WINTERKORN, H.F.; FANG, H.Y. Foundation engineering handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1975. p. 148-196.

PORTO, T. B. **ESTUDO DA INTERAÇÃO DE PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL COM A ESTRUTURA DE FUNDAÇÃO**. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

RIBEIRO, D. B.; ALMEIDA, V. S.; PAIVA, J. B. **Uma técnica alternativa para analisar o problema da interação solo estratificado-fundação-superestrutura via acoplamento MEC-MEF**. Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, 2005.

RODRIGUES, R. DE O. **ANÁLISE DINÂMICA BIDIMENSIONAL NÃO-LINEAR FÍSICA E GEOMÉTRICA DE TRELIÇAS DE AÇO E PÓRTICOS DE CONCRETO ARMADO**. Cadernos de engenharia de estruturas, v.7, n. 23º. EESC-USP, São Carlos, 2005.

SAP2000, CSI Analysis Reference Manual For SAP 2000, Computers and Structures, 2018.

SILVA, R. G. L. DA. **Avaliação dos efeitos de 2a ordem em edifícios de aço utilizando métodos aproximados e análise rigorosa**. UFMG, Belo Horizonte, 2004.

SINGH, H.; JHA, J. N. **CONSTITUTIVE MODELS FOR SUSTAINABLE DESIGN OF FOUNDATION SYSTEMS**. UKIERI Concrete Congress - Innovations in Concrete Construction. 2014.

SOUZA, R. A. DE; REIS, J. H. C. DOS. **Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundações rasas**. Acta Scientiarum - Technology, v. 30, n. 2, 2008.

TEIXEIRA, A.H., GODOY, N.S., Cap.7 – **Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas** In: HACHICH, W. et al. Fundações: Teoria e Prática. 2. ed. São Paulo: PINI, 1996.

TERZAGHI, K. Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction. *Geotechnique*, Washington, v. 5, n. 4, p. 297-326, 1955.

VELLOSO, D.A., LOPES, F.R. **Fundações Volume 1** - 2ª ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 2011.

VELLOSO, D.A., MARIA, P.E.L.S., LOPES, F.R., Cap. 4 – **Princípios e Modelos Básicos de Análise**  
In: HACHICH, W. *et al.* **Fundações: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1996.

VENANZI, I.; SALCIARINI, D.; TAMAGNINI, C. **The effect of soil–foundation–structure interaction on the wind-induced response of tall buildings**. *Engineering Structures*, v. 79, nov. 2014.

## APÊNDICE

Tabela 17 - Deslocamentos Horizontais nos nós ( $D_x$ ) - Pórticos de 4 Pavimentos

| Deslocamentos Horizontais no nós - Pórtico de 4 Pavimentos |       |       |      |       |       | Diferença Percentual com Relação ao AT (%) |      |       |       |
|------------------------------------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|--------------------------------------------|------|-------|-------|
| Nó                                                         | Dx-AT | Dx-W  | Dx-P | Dx-MM | Dx-MC | Dx-W                                       | Dx-P | Dx-MM | Dx-MC |
| Nº                                                         | mm    | mm    | mm   | mm    | mm    |                                            |      |       |       |
| N1                                                         | 0,00  | -0,39 | 0,09 | 0,78  | 0,10  | ∞                                          | ∞    | ∞     | ∞     |
| N2                                                         | 0,00  | 0,15  | 0,09 | 1,28  | 0,19  | ∞                                          | ∞    | ∞     | ∞     |
| N3                                                         | 0,00  | 0,69  | 0,09 | 1,83  | 0,31  | ∞                                          | ∞    | ∞     | ∞     |
| N4                                                         | 0,43  | 0,75  | 0,69 | 1,98  | 0,80  | 73,3                                       | 60,1 | 358,2 | 86,1  |
| N5                                                         | 0,55  | 0,93  | 0,81 | 2,06  | 0,85  | 71,4                                       | 47,7 | 277,1 | 56,1  |
| N6                                                         | 0,67  | 1,14  | 0,93 | 2,16  | 0,92  | 71,1                                       | 39,1 | 222,6 | 37,0  |
| N7                                                         | 1,32  | 1,84  | 1,68 | 2,97  | 1,70  | 39,0                                       | 27,2 | 124,5 | 28,2  |
| N8                                                         | 1,31  | 1,81  | 1,67 | 2,94  | 1,68  | 38,6                                       | 27,5 | 125,2 | 28,5  |
| N9                                                         | 1,31  | 1,80  | 1,67 | 2,93  | 1,68  | 37,7                                       | 27,6 | 124,5 | 28,4  |
| N10                                                        | 1,86  | 2,44  | 2,30 | 3,59  | 2,28  | 30,8                                       | 23,4 | 92,7  | 22,4  |
| N11                                                        | 1,88  | 2,45  | 2,31 | 3,60  | 2,30  | 30,6                                       | 23,2 | 92,2  | 22,5  |
| N12                                                        | 1,90  | 2,48  | 2,34 | 3,64  | 2,33  | 30,2                                       | 23,0 | 91,0  | 22,4  |
| N13                                                        | 2,59  | 3,23  | 3,10 | 4,42  | 3,08  | 24,6                                       | 19,6 | 70,2  | 18,6  |
| N14                                                        | 2,18  | 2,81  | 2,68 | 3,99  | 2,65  | 29,0                                       | 23,1 | 83,2  | 21,5  |
| N15                                                        | 1,77  | 2,40  | 2,27 | 3,58  | 2,23  | 35,3                                       | 28,1 | 101,8 | 25,7  |
| Máximos                                                    |       |       |      |       |       | 73,3                                       | 60,1 | 358,2 | 86,1  |
| Mínimos                                                    |       |       |      |       |       | 24,6                                       | 19,6 | 70,2  | 18,6  |
| Média                                                      |       |       |      |       |       | 42,6                                       | 30,8 | 146,9 | 33,1  |

Fonte: do Autor

Tabela 18 - Deslocamentos Horizontais nos nós ( $D_x$ ) - Pórticos de 7 Pavimentos

| Deslocamentos Horizontais no nós - Pórtico de 7 Pavimentos |       |       |       |       |       | Diferença Percentual com Relação ao AT (%) |      |       |       |
|------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------------|------|-------|-------|
| Nó                                                         | Dx-AT | Dx-W  | Dx-P  | Dx-MM | Dx-MC | Dx-W                                       | Dx-P | Dx-MM | Dx-MC |
| Nº                                                         | mm    | mm    | mm    | mm    | mm    |                                            |      |       |       |
| N1                                                         | 0,00  | -0,23 | 0,23  | 2,47  | 0,56  | ∞                                          | ∞    | ∞     | ∞     |
| N2                                                         | 0,00  | 0,35  | 0,23  | 2,87  | 0,46  | ∞                                          | ∞    | ∞     | ∞     |
| N3                                                         | 0,00  | 0,85  | 0,23  | 3,26  | 0,34  | ∞                                          | ∞    | ∞     | ∞     |
| N4                                                         | 1,34  | 2,31  | 2,10  | 5,00  | 2,28  | 72,1                                       | 56,7 | 272,9 | 70,2  |
| N5                                                         | 1,46  | 2,49  | 2,22  | 5,00  | 2,26  | 70,4                                       | 51,8 | 241,5 | 54,3  |
| N6                                                         | 1,59  | 2,71  | 2,35  | 5,02  | 2,25  | 70,6                                       | 47,8 | 216,1 | 41,5  |
| N7                                                         | 3,92  | 5,42  | 5,11  | 8,01  | 5,01  | 38,2                                       | 30,2 | 104,0 | 27,6  |
| N8                                                         | 3,91  | 5,39  | 5,09  | 7,98  | 4,99  | 38,0                                       | 30,3 | 104,3 | 27,8  |
| N9                                                         | 3,91  | 5,38  | 5,09  | 7,97  | 5,00  | 37,7                                       | 30,4 | 104,1 | 27,9  |
| N10                                                        | 6,45  | 8,30  | 8,02  | 11,01 | 7,80  | 28,6                                       | 24,4 | 70,6  | 20,9  |
| N11                                                        | 6,39  | 8,23  | 7,96  | 10,94 | 7,74  | 28,9                                       | 24,6 | 71,4  | 21,2  |
| N12                                                        | 6,33  | 8,17  | 7,91  | 10,89 | 7,69  | 29,0                                       | 24,8 | 72,0  | 21,4  |
| N13                                                        | 8,80  | 10,96 | 10,74 | 13,81 | 10,41 | 24,6                                       | 22,1 | 57,0  | 18,3  |
| N14                                                        | 8,64  | 10,81 | 10,58 | 13,66 | 10,25 | 25,1                                       | 22,5 | 58,1  | 18,6  |
| N15                                                        | 8,51  | 10,68 | 10,46 | 13,53 | 10,12 | 25,5                                       | 22,8 | 59,0  | 18,8  |
| N16                                                        | 11,39 | 13,96 | 13,80 | 16,99 | 13,31 | 22,6                                       | 21,2 | 49,2  | 16,9  |
| N17                                                        | 11,35 | 13,92 | 13,76 | 16,95 | 13,28 | 22,6                                       | 21,2 | 49,3  | 17,0  |
| N18                                                        | 11,34 | 13,91 | 13,75 | 16,94 | 13,27 | 22,7                                       | 21,2 | 49,4  | 17,0  |
| N19                                                        | 13,11 | 16,06 | 15,97 | 19,27 | 15,34 | 22,6                                       | 21,9 | 47,1  | 17,1  |
| N20                                                        | 13,16 | 16,12 | 16,02 | 19,33 | 15,40 | 22,5                                       | 21,7 | 46,9  | 17,0  |
| N21                                                        | 13,24 | 16,20 | 16,10 | 19,41 | 15,48 | 22,3                                       | 21,6 | 46,6  | 16,9  |
| N22                                                        | 14,38 | 17,71 | 17,68 | 21,10 | 16,93 | 23,2                                       | 23,0 | 46,8  | 17,8  |
| N23                                                        | 14,05 | 17,38 | 17,36 | 20,77 | 16,59 | 23,7                                       | 23,5 | 47,9  | 18,1  |
| N24                                                        | 13,74 | 17,07 | 17,05 | 20,46 | 16,27 | 24,3                                       | 24,1 | 49,0  | 18,4  |
| Máximos                                                    |       |       |       |       |       | 29,0                                       | 24,8 | 72,0  | 21,4  |
| Mínimos                                                    |       |       |       |       |       | 22,3                                       | 21,2 | 46,6  | 16,9  |
| Média                                                      |       |       |       |       |       | 24,5                                       | 22,7 | 54,7  | 18,4  |

Fonte: do Autor

Tabela 19 - Deslocamentos Horizontais nos nós ( $D_x$ ) - Pórticos de 11 Pavimentos

| Deslocamentos Horizontais no nós - Pórtico de 11 Pavimentos |       |       |       |       |       | Diferença Percentual com Relação ao AT (%) |      |       |       |
|-------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------------|------|-------|-------|
| Nó                                                          | Dx-AT | Dx-W  | Dx-P  | Dx-MM | Dx-MC | Dx-W                                       | Dx-P | Dx-MM | Dx-MC |
| Nº                                                          | mm    | mm    | mm    | mm    | mm    |                                            |      |       |       |
| N1                                                          | 0,00  | 0,04  | 0,50  | 5,19  | 1,26  | ∞                                          | ∞    | ∞     | ∞     |
| N2                                                          | 0,00  | 0,67  | 0,50  | 5,43  | 0,91  | ∞                                          | ∞    | ∞     | ∞     |
| N3                                                          | 0,00  | 1,07  | 0,50  | 5,57  | 0,42  | ∞                                          | ∞    | ∞     | ∞     |
| N4                                                          | 2,88  | 5,13  | 4,76  | 10,27 | 4,92  | 78,0                                       | 65,2 | 256,2 | 70,6  |
| N5                                                          | 3,02  | 5,31  | 4,89  | 10,15 | 4,79  | 76,0                                       | 62,1 | 236,6 | 58,9  |
| N6                                                          | 3,13  | 5,52  | 5,00  | 10,04 | 4,66  | 76,2                                       | 59,6 | 220,5 | 48,7  |
| N7                                                          | 8,40  | 12,11 | 11,67 | 17,32 | 11,10 | 44,1                                       | 38,9 | 106,1 | 32,1  |
| N8                                                          | 8,39  | 12,09 | 11,66 | 17,31 | 11,11 | 44,0                                       | 38,9 | 106,2 | 32,3  |
| N9                                                          | 8,39  | 12,07 | 11,66 | 17,31 | 11,12 | 43,9                                       | 39,0 | 106,2 | 32,5  |
| N10                                                         | 14,38 | 19,34 | 19,04 | 25,05 | 18,01 | 34,5                                       | 32,4 | 74,2  | 25,3  |
| N11                                                         | 14,32 | 19,28 | 18,98 | 25,00 | 17,96 | 34,6                                       | 32,5 | 74,5  | 25,4  |
| N12                                                         | 14,27 | 19,22 | 18,93 | 24,95 | 17,91 | 34,7                                       | 32,7 | 74,9  | 25,5  |
| N13                                                         | 20,51 | 26,68 | 26,54 | 32,93 | 25,08 | 30,1                                       | 29,4 | 60,6  | 22,3  |
| N14                                                         | 20,35 | 26,52 | 26,38 | 32,77 | 24,91 | 30,3                                       | 29,7 | 61,1  | 22,4  |
| N15                                                         | 20,23 | 26,41 | 26,27 | 32,66 | 24,79 | 30,5                                       | 29,9 | 61,4  | 22,5  |
| N16                                                         | 29,07 | 36,82 | 36,91 | 43,78 | 34,83 | 26,7                                       | 27,0 | 50,6  | 19,8  |
| N17                                                         | 29,05 | 36,80 | 36,89 | 43,76 | 34,81 | 26,7                                       | 27,0 | 50,6  | 19,8  |
| N18                                                         | 29,05 | 36,80 | 36,89 | 43,76 | 34,81 | 26,7                                       | 27,0 | 50,6  | 19,8  |
| N19                                                         | 37,05 | 46,35 | 46,67 | 54,02 | 44,01 | 25,1                                       | 26,0 | 45,8  | 18,8  |
| N20                                                         | 37,03 | 46,33 | 46,65 | 54,00 | 43,99 | 25,1                                       | 26,0 | 45,8  | 18,8  |
| N21                                                         | 37,04 | 46,34 | 46,66 | 54,00 | 43,99 | 25,1                                       | 26,0 | 45,8  | 18,8  |
| N22                                                         | 43,93 | 54,74 | 55,29 | 63,10 | 52,05 | 24,6                                       | 25,9 | 43,6  | 18,5  |
| N23                                                         | 43,86 | 54,68 | 55,23 | 63,04 | 51,99 | 24,7                                       | 25,9 | 43,7  | 18,5  |
| N24                                                         | 43,84 | 54,65 | 55,20 | 63,01 | 51,96 | 24,7                                       | 25,9 | 43,7  | 18,5  |
| N25                                                         | 49,74 | 62,04 | 62,81 | 71,08 | 59,01 | 24,7                                       | 26,3 | 42,9  | 18,7  |
| N26                                                         | 49,69 | 62,00 | 62,77 | 71,04 | 58,97 | 24,8                                       | 26,3 | 43,0  | 18,7  |
| N27                                                         | 49,68 | 61,98 | 62,75 | 71,02 | 58,95 | 24,8                                       | 26,3 | 43,0  | 18,7  |
| N28                                                         | 53,94 | 67,69 | 68,68 | 77,40 | 64,34 | 25,5                                       | 27,3 | 43,5  | 19,3  |
| N29                                                         | 54,05 | 67,80 | 68,79 | 77,52 | 64,45 | 25,4                                       | 27,3 | 43,4  | 19,2  |
| N30                                                         | 54,19 | 67,94 | 68,94 | 77,66 | 64,59 | 25,4                                       | 27,2 | 43,3  | 19,2  |
| N31                                                         | 57,14 | 72,30 | 73,51 | 82,67 | 68,64 | 26,5                                       | 28,7 | 44,7  | 20,1  |
| N32                                                         | 57,01 | 72,17 | 73,38 | 82,54 | 68,51 | 26,6                                       | 28,7 | 44,8  | 20,2  |
| N33                                                         | 56,91 | 72,07 | 73,28 | 82,44 | 68,41 | 26,6                                       | 28,8 | 44,9  | 20,2  |
| N34                                                         | 59,32 | 76,04 | 77,49 | 87,14 | 72,05 | 28,2                                       | 30,6 | 46,9  | 21,5  |
| N35                                                         | 58,97 | 75,70 | 77,16 | 86,80 | 71,70 | 28,4                                       | 30,8 | 47,2  | 21,6  |
| N36                                                         | 58,64 | 75,38 | 76,84 | 86,49 | 71,37 | 28,6                                       | 31,0 | 47,5  | 21,7  |
| Máximos                                                     |       |       |       |       |       | 78,0                                       | 65,2 | 256,2 | 70,6  |
| Mínimos                                                     |       |       |       |       |       | 24,6                                       | 25,9 | 42,9  | 18,5  |
| Média                                                       |       |       |       |       |       | 33,4                                       | 32,3 | 72,5  | 25,1  |

Fonte: do Autor

Tabela 20 - Deslocamentos Verticais nos nós ( $D_z$ ) - Pórticos de 4 Pavimentos

| Deslocamentos Verticais no nós - Pórtico de 4 Pavimentos |       |        |        |        |        | Diferença Percentual com Relação ao AT |        |        |        |
|----------------------------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------------|--------|--------|--------|
| Nó                                                       | Dz-AT | Dz-W   | Dz-P   | Dz-MM  | Dz-MC  | Dz-W                                   | Dz-P   | Dz-MM  | Dz-MC  |
| Nº                                                       | mm    | mm     | mm     | mm     | mm     |                                        |        |        |        |
| N1                                                       | 0,00  | -13,40 | -15,72 | -20,60 | -12,27 | ∞                                      | ∞      | ∞      | ∞      |
| N2                                                       | 0,00  | -14,05 | -16,23 | -21,45 | -13,46 | ∞                                      | ∞      | ∞      | ∞      |
| N3                                                       | 0,00  | -13,65 | -16,02 | -20,97 | -12,48 | ∞                                      | ∞      | ∞      | ∞      |
| N4                                                       | -1,18 | -14,58 | -16,90 | -21,78 | -13,46 | 1137,9                                 | 1334,6 | 1749,1 | 1042,5 |
| N5                                                       | -1,80 | -15,85 | -18,02 | -23,25 | -15,25 | 778,5                                  | 899,1  | 1188,5 | 745,1  |
| N6                                                       | -1,20 | -14,85 | -17,23 | -22,18 | -13,69 | 1139,4                                 | 1337,9 | 1751,2 | 1042,7 |
| N7                                                       | -2,05 | -15,46 | -17,78 | -22,66 | -14,34 | 653,5                                  | 766,3  | 1004,3 | 598,9  |
| N8                                                       | -3,13 | -17,17 | -19,35 | -24,57 | -16,56 | 447,9                                  | 517,4  | 683,9  | 428,5  |
| N9                                                       | -2,09 | -15,74 | -18,12 | -23,07 | -14,58 | 654,9                                  | 768,8  | 1006,4 | 599,5  |
| N10                                                      | -2,62 | -16,03 | -18,35 | -23,23 | -14,91 | 511,7                                  | 600,0  | 786,4  | 469,0  |
| N11                                                      | -3,99 | -18,03 | -20,21 | -25,42 | -17,42 | 351,4                                  | 406,0  | 536,5  | 336,1  |
| N12                                                      | -2,66 | -16,32 | -18,69 | -23,65 | -15,16 | 513,4                                  | 602,7  | 789,0  | 470,1  |
| N13                                                      | -2,88 | -16,29 | -18,61 | -23,50 | -15,18 | 465,2                                  | 545,5  | 714,9  | 426,5  |
| N14                                                      | -4,39 | -18,42 | -20,60 | -25,81 | -17,80 | 320,0                                  | 369,7  | 488,6  | 306,0  |
| N15                                                      | -2,92 | -16,58 | -18,96 | -23,91 | -15,43 | 467,1                                  | 548,3  | 717,8  | 427,7  |
| Máximos                                                  |       |        |        |        |        | 1139,4                                 | 1337,9 | 1751,2 | 1042,7 |
| Mínimos                                                  |       |        |        |        |        | 320,0                                  | 369,7  | 488,6  | 306,0  |
| Média                                                    |       |        |        |        |        | 620,1                                  | 724,7  | 951,4  | 574,4  |

Fonte: do Autor

Tabela 21 - Deslocamentos Verticais nos nós ( $D_z$ ) - Pórticos de 7 Pavimentos

| Deslocamentos Verticais no nós - Pórtico de 7 Pavimentos |        |        |        |        |        | Diferença Percentual com Relação ao AT |        |        |        |
|----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------------|--------|--------|--------|
| Nó                                                       | Dz-AT  | Dz-W   | Dz-P   | Dz-MM  | Dz-MC  | Dz-W                                   | Dz-P   | Dz-MM  | Dz-MC  |
| Nº                                                       | mm     | mm     | mm     | mm     | mm     |                                        |        |        |        |
| N1                                                       | 0,00   | -22,13 | -25,90 | -33,96 | -20,29 | ∞                                      | ∞      | ∞      | ∞      |
| N2                                                       | 0,00   | -22,81 | -26,42 | -34,98 | -21,97 | ∞                                      | ∞      | ∞      | ∞      |
| N3                                                       | 0,00   | -23,49 | -27,50 | -35,96 | -21,38 | ∞                                      | ∞      | ∞      | ∞      |
| N4                                                       | -1,95  | -24,08 | -27,85 | -35,91 | -22,26 | 1133,1                                 | 1325,8 | 1738,6 | 1039,6 |
| N5                                                       | -2,92  | -25,73 | -29,35 | -37,89 | -24,86 | 782,0                                  | 906,1  | 1199,0 | 752,1  |
| N6                                                       | -2,07  | -25,56 | -29,57 | -38,03 | -23,47 | 1136,1                                 | 1329,7 | 1739,2 | 1034,9 |
| N7                                                       | -3,61  | -25,74 | -29,50 | -37,56 | -23,93 | 613,1                                  | 717,3  | 940,8  | 563,0  |
| N8                                                       | -5,36  | -28,17 | -31,80 | -40,34 | -27,28 | 425,5                                  | 493,1  | 652,4  | 408,8  |
| N9                                                       | -3,82  | -27,31 | -31,31 | -39,79 | -25,23 | 615,4                                  | 720,2  | 942,1  | 560,9  |
| N10                                                      | -4,97  | -27,09 | -30,85 | -38,92 | -25,29 | 445,5                                  | 521,1  | 683,6  | 409,2  |
| N11                                                      | -7,34  | -30,15 | -33,78 | -42,31 | -29,24 | 310,9                                  | 360,3  | 476,6  | 298,4  |
| N12                                                      | -5,25  | -28,74 | -32,74 | -41,22 | -26,67 | 447,9                                  | 524,1  | 685,6  | 408,4  |
| N13                                                      | -6,03  | -28,15 | -31,91 | -39,98 | -26,36 | 367,3                                  | 429,6  | 563,5  | 337,5  |
| N14                                                      | -8,85  | -31,66 | -35,29 | -43,82 | -30,73 | 257,8                                  | 298,9  | 395,3  | 247,3  |
| N15                                                      | -6,35  | -29,85 | -33,84 | -42,32 | -27,79 | 369,9                                  | 432,8  | 566,3  | 337,5  |
| N16                                                      | -7,24  | -29,37 | -33,12 | -41,19 | -27,59 | 305,5                                  | 357,4  | 468,8  | 280,9  |
| N17                                                      | -10,90 | -33,71 | -37,34 | -45,87 | -32,76 | 209,4                                  | 242,8  | 321,0  | 200,7  |
| N18                                                      | -7,61  | -31,11 | -35,10 | -43,58 | -29,06 | 308,7                                  | 361,2  | 472,6  | 281,8  |
| N19                                                      | -8,06  | -30,18 | -33,94 | -42,01 | -28,41 | 274,6                                  | 321,2  | 421,4  | 252,6  |
| N20                                                      | -12,26 | -35,08 | -38,72 | -47,24 | -34,12 | 186,0                                  | 215,7  | 285,2  | 178,2  |
| N21                                                      | -8,44  | -31,94 | -35,93 | -44,41 | -29,90 | 278,3                                  | 325,5  | 426,0  | 254,0  |
| N22                                                      | -8,46  | -30,59 | -34,34 | -42,41 | -28,81 | 261,5                                  | 305,9  | 401,3  | 240,6  |
| N23                                                      | -12,96 | -35,77 | -39,41 | -47,93 | -34,81 | 176,0                                  | 204,1  | 269,9  | 168,6  |
| N24                                                      | -8,85  | -32,35 | -36,34 | -44,82 | -30,31 | 265,4                                  | 310,5  | 406,3  | 242,4  |
| Máximos                                                  |        |        |        |        |        | 447,9                                  | 524,1  | 685,6  | 409,2  |
| Mínimos                                                  |        |        |        |        |        | 176,0                                  | 204,1  | 269,9  | 168,6  |
| Média                                                    |        |        |        |        |        | 297,6                                  | 347,4  | 456,2  | 275,9  |

Fonte: do Autor

Tabela 22 - Deslocamentos Verticais nos nós ( $D_z$ ) - Pórticos de 11 Pavimentos

| Deslocamentos Verticais no nós - Pórtico de 11 Pavimentos |        |        |        |        |        | Diferença Percentual com Relação ao AT (%) |        |        |        |
|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------------------|--------|--------|--------|
| Nó                                                        | Dz-AT  | Dz-W   | Dz-P   | Dz-MM  | Dz-MC  | Dz-W                                       | Dz-P   | Dz-MM  | Dz-MC  |
| Nº                                                        | mm     | mm     | mm     | mm     | mm     |                                            |        |        |        |
| N1                                                        | 0,00   | -33,64 | -39,30 | -51,52 | -31,01 | ∞                                          | ∞      | ∞      | ∞      |
| N2                                                        | 0,00   | -34,73 | -40,36 | -53,53 | -33,62 | ∞                                          | ∞      | ∞      | ∞      |
| N3                                                        | 0,00   | -38,60 | -45,03 | -58,79 | -34,90 | ∞                                          | ∞      | ∞      | ∞      |
| N4                                                        | -3,00  | -36,60 | -42,26 | -54,48 | -34,02 | 1120,8                                     | 1309,5 | 1717,1 | 1034,7 |
| N5                                                        | -4,40  | -39,17 | -44,81 | -57,97 | -37,99 | 790,7                                      | 918,9  | 1218,2 | 763,9  |
| N6                                                        | -3,42  | -42,00 | -48,42 | -62,19 | -38,33 | 1128,7                                     | 1316,6 | 1719,5 | 1021,5 |
| N7                                                        | -5,71  | -39,28 | -44,93 | -57,15 | -36,74 | 588,0                                      | 686,9  | 900,9  | 543,4  |
| N8                                                        | -8,33  | -43,14 | -48,79 | -61,95 | -41,90 | 418,2                                      | 486,1  | 644,1  | 403,3  |
| N9                                                        | -6,51  | -45,07 | -51,49 | -65,26 | -41,44 | 592,6                                      | 691,2  | 902,9  | 536,8  |
| N10                                                       | -8,14  | -41,69 | -47,33 | -59,55 | -39,17 | 412,2                                      | 481,6  | 631,8  | 381,3  |
| N11                                                       | -11,79 | -46,63 | -52,29 | -65,45 | -45,35 | 295,7                                      | 343,7  | 455,3  | 284,8  |
| N12                                                       | -9,26  | -47,80 | -54,21 | -67,99 | -44,20 | 416,4                                      | 485,7  | 634,6  | 377,5  |
| N13                                                       | -10,28 | -43,81 | -49,45 | -61,67 | -41,32 | 326,1                                      | 381,0  | 499,9  | 301,9  |
| N14                                                       | -14,78 | -49,66 | -55,33 | -68,48 | -48,33 | 235,9                                      | 274,3  | 363,2  | 226,9  |
| N15                                                       | -11,67 | -50,20 | -56,60 | -70,39 | -46,62 | 330,3                                      | 385,2  | 503,4  | 299,6  |
| N16                                                       | -13,18 | -46,68 | -52,31 | -64,53 | -44,23 | 254,2                                      | 296,9  | 389,7  | 235,6  |
| N17                                                       | -19,53 | -54,45 | -60,13 | -73,28 | -53,06 | 178,8                                      | 207,9  | 275,2  | 171,7  |
| N18                                                       | -14,88 | -53,40 | -59,80 | -73,58 | -49,85 | 258,8                                      | 301,8  | 394,5  | 235,0  |
| N19                                                       | -15,70 | -49,18 | -54,80 | -67,03 | -46,75 | 213,3                                      | 249,1  | 327,0  | 197,8  |
| N20                                                       | -23,61 | -58,57 | -64,26 | -77,40 | -57,12 | 148,1                                      | 172,2  | 227,9  | 141,9  |
| N21                                                       | -17,63 | -56,13 | -62,53 | -76,32 | -52,61 | 218,3                                      | 254,6  | 332,8  | 198,3  |
| N22                                                       | -17,83 | -51,29 | -56,91 | -69,14 | -48,89 | 187,7                                      | 219,2  | 287,8  | 174,2  |
| N23                                                       | -27,03 | -62,02 | -67,72 | -80,86 | -60,53 | 129,4                                      | 150,5  | 199,1  | 123,9  |
| N24                                                       | -19,92 | -58,41 | -64,80 | -78,59 | -54,91 | 193,2                                      | 225,3  | 294,5  | 175,6  |
| N25                                                       | -20,04 | -53,49 | -59,10 | -71,33 | -51,11 | 166,9                                      | 194,9  | 255,9  | 155,0  |
| N26                                                       | -30,59 | -65,60 | -71,32 | -84,45 | -64,07 | 114,5                                      | 133,2  | 176,1  | 109,5  |
| N27                                                       | -22,26 | -60,74 | -67,12 | -80,92 | -57,26 | 172,8                                      | 201,5  | 263,5  | 157,2  |
| N28                                                       | -21,73 | -55,17 | -60,78 | -73,01 | -52,80 | 153,8                                      | 179,6  | 235,9  | 143,0  |
| N29                                                       | -33,32 | -68,36 | -74,08 | -87,20 | -66,79 | 105,2                                      | 122,3  | 161,7  | 100,5  |
| N30                                                       | -24,02 | -62,49 | -68,87 | -82,67 | -59,02 | 160,1                                      | 186,7  | 244,1  | 145,7  |
| N31                                                       | -22,89 | -56,31 | -61,92 | -74,15 | -53,96 | 146,1                                      | 170,6  | 224,0  | 135,8  |
| N32                                                       | -35,25 | -70,30 | -76,02 | -89,15 | -68,71 | 99,5                                       | 115,7  | 152,9  | 94,9   |
| N33                                                       | -25,21 | -63,66 | -70,04 | -83,84 | -60,21 | 152,6                                      | 177,9  | 232,6  | 138,9  |
| N34                                                       | -23,09 | -56,51 | -62,12 | -74,35 | -54,17 | 144,7                                      | 169,0  | 222,0  | 134,6  |
| N35                                                       | -35,47 | -70,53 | -76,26 | -89,38 | -68,93 | 98,8                                       | 115,0  | 152,0  | 94,3   |
| N36                                                       | -25,42 | -63,87 | -70,25 | -84,05 | -60,43 | 151,3                                      | 176,4  | 230,6  | 137,7  |
| Máximos                                                   |        |        |        |        |        | 1128,7                                     | 1316,6 | 1719,5 | 1034,7 |
| Mínimos                                                   |        |        |        |        |        | 98,8                                       | 115,0  | 152,0  | 94,3   |
| Média                                                     |        |        |        |        |        | 306,2                                      | 357,0  | 468,8  | 284,1  |

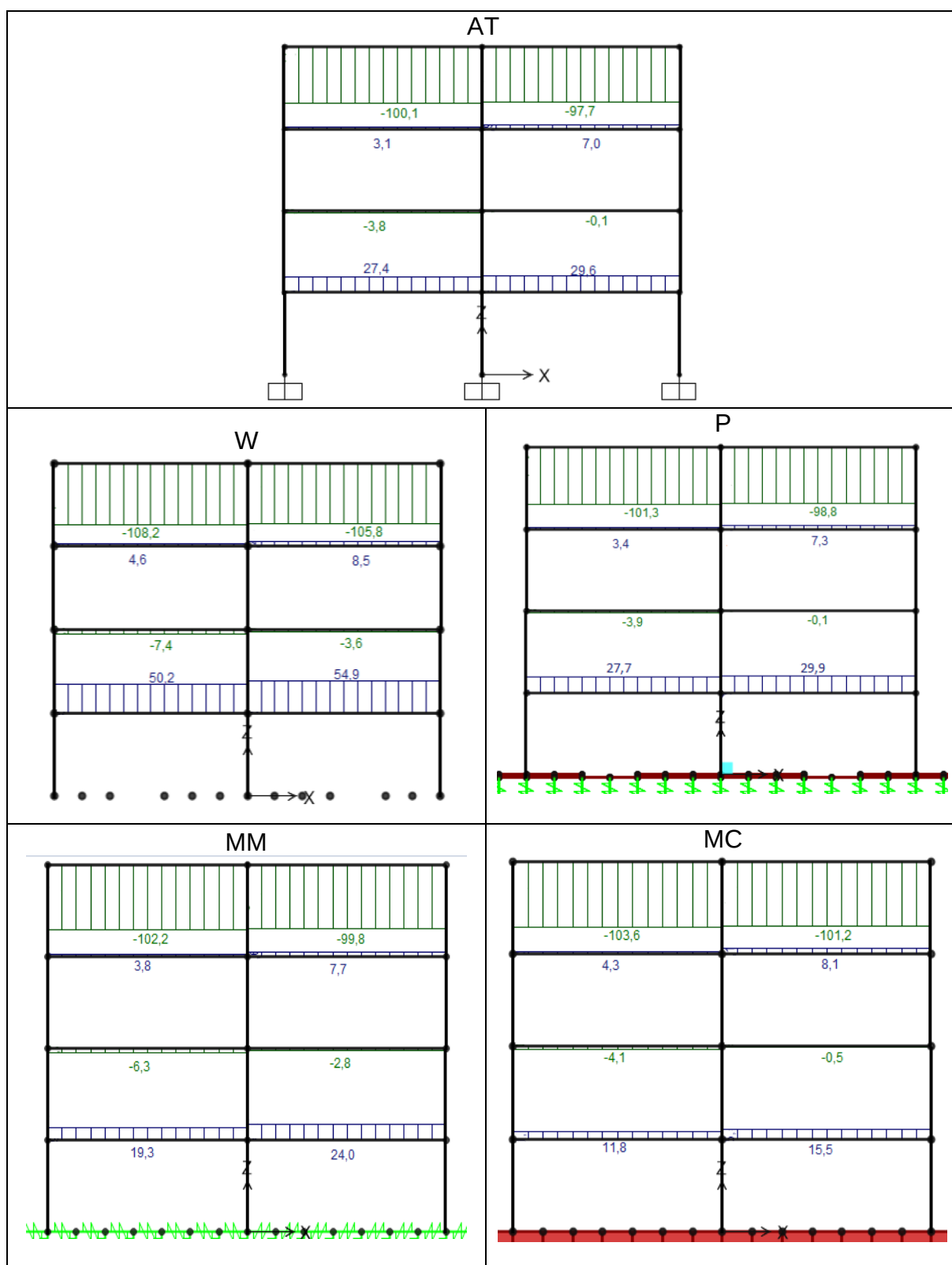
Fonte: do Autor

Tabela 23 - Força Normal nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos

| Força Normal nas Vigas- Pórtico de 4 Pavimentos |        |        |        |        |        | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |        |      |        |       |
|-------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------------------------------------------------|--------|------|--------|-------|
| Vigas                                           | N-AT   | N-W    | N-P    | N-MM   | N-MC   | Vigas                                                                    | N-W    | N-P  | N-MM   | N-MC  |
| Nº                                              | kN     | kN     | kN     | kN     | kN     | Nº                                                                       |        |      |        |       |
| 2                                               | 27,4   | 50,2   | 27,7   | 19,3   | 11,8   | 2                                                                        | 83,1   | 1,2  | 29,7   | 56,9  |
| 4                                               | 29,6   | 54,9   | 29,9   | 24,0   | 15,5   | 4                                                                        | 85,2   | 1,0  | 19,0   | 47,6  |
| 7                                               | -3,8   | -7,4   | -3,9   | -6,3   | -4,1   | 7                                                                        | 93,4   | 1,0  | 64,8   | 6,9   |
| 9                                               | -0,1   | -3,6   | -0,1   | -2,8   | -0,5   | 9                                                                        | 3612,2 | 48,0 | 2721,4 | 410,2 |
| 12                                              | 3,1    | 4,6    | 3,4    | 3,8    | 4,3    | 12                                                                       | 47,5   | 8,4  | 22,0   | 37,1  |
| 14                                              | 7,0    | 8,5    | 7,3    | 7,7    | 8,1    | 14                                                                       | 21,5   | 3,9  | 10,1   | 16,7  |
| 17                                              | -100,1 | -108,2 | -101,3 | -102,2 | -103,6 | 17                                                                       | 8,1    | 1,1  | 2,1    | 3,5   |
| 19                                              | -97,7  | -105,8 | -98,8  | -99,8  | -101,2 | 19                                                                       | 8,3    | 1,2  | 2,1    | 3,6   |
| Máximos                                         |        |        |        |        |        |                                                                          | 3612,2 | 48,0 | 2721,4 | 410,2 |
| Mínimos                                         |        |        |        |        |        |                                                                          | 8,1    | 1,0  | 2,1    | 3,5   |
| Média                                           |        |        |        |        |        |                                                                          | 494,9  | 8,2  | 358,9  | 72,8  |

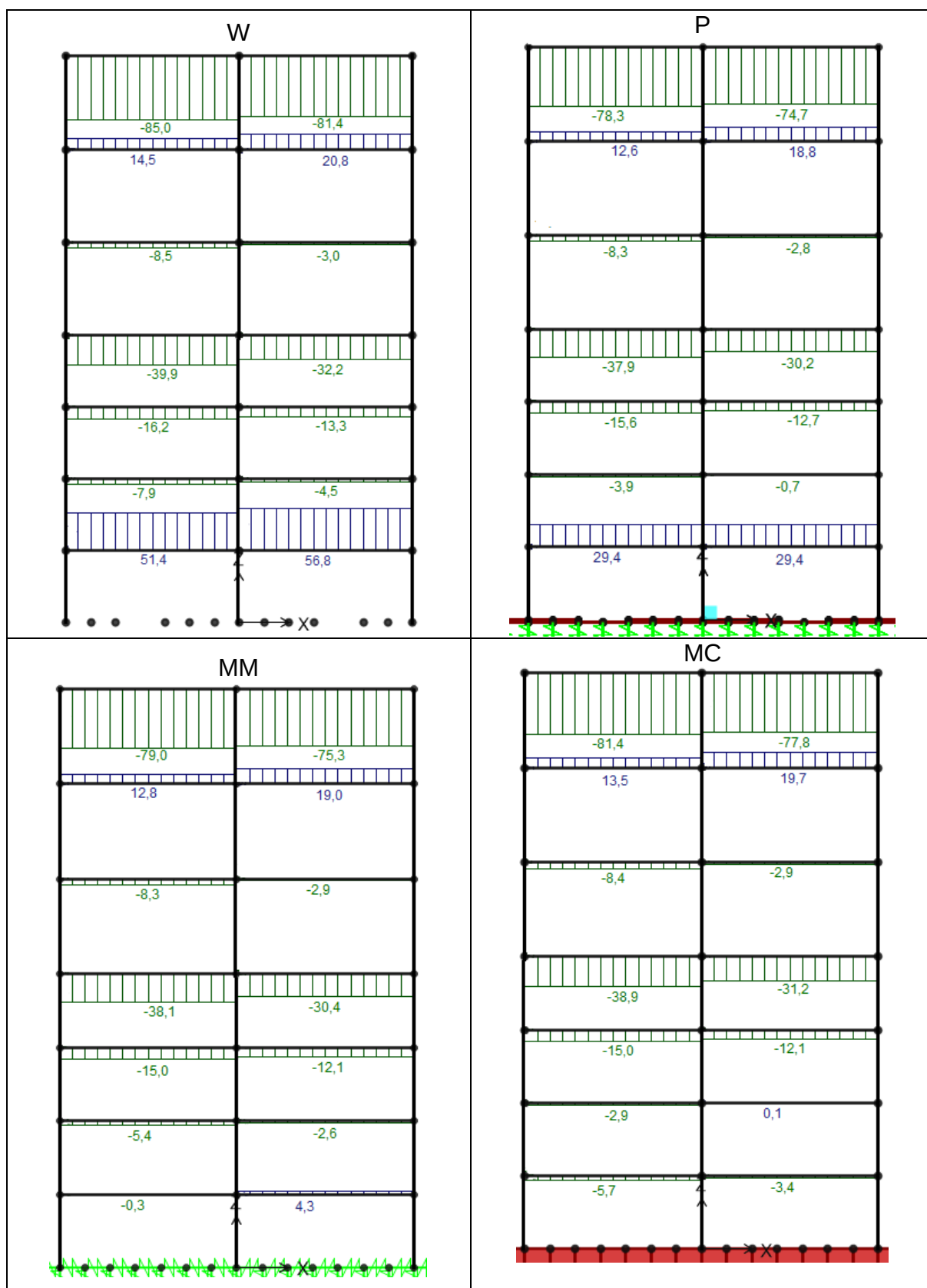
Fonte: do Autor

Figura 38 - Diagramas de Força Normal (kN) nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos



Fonte: do Autor





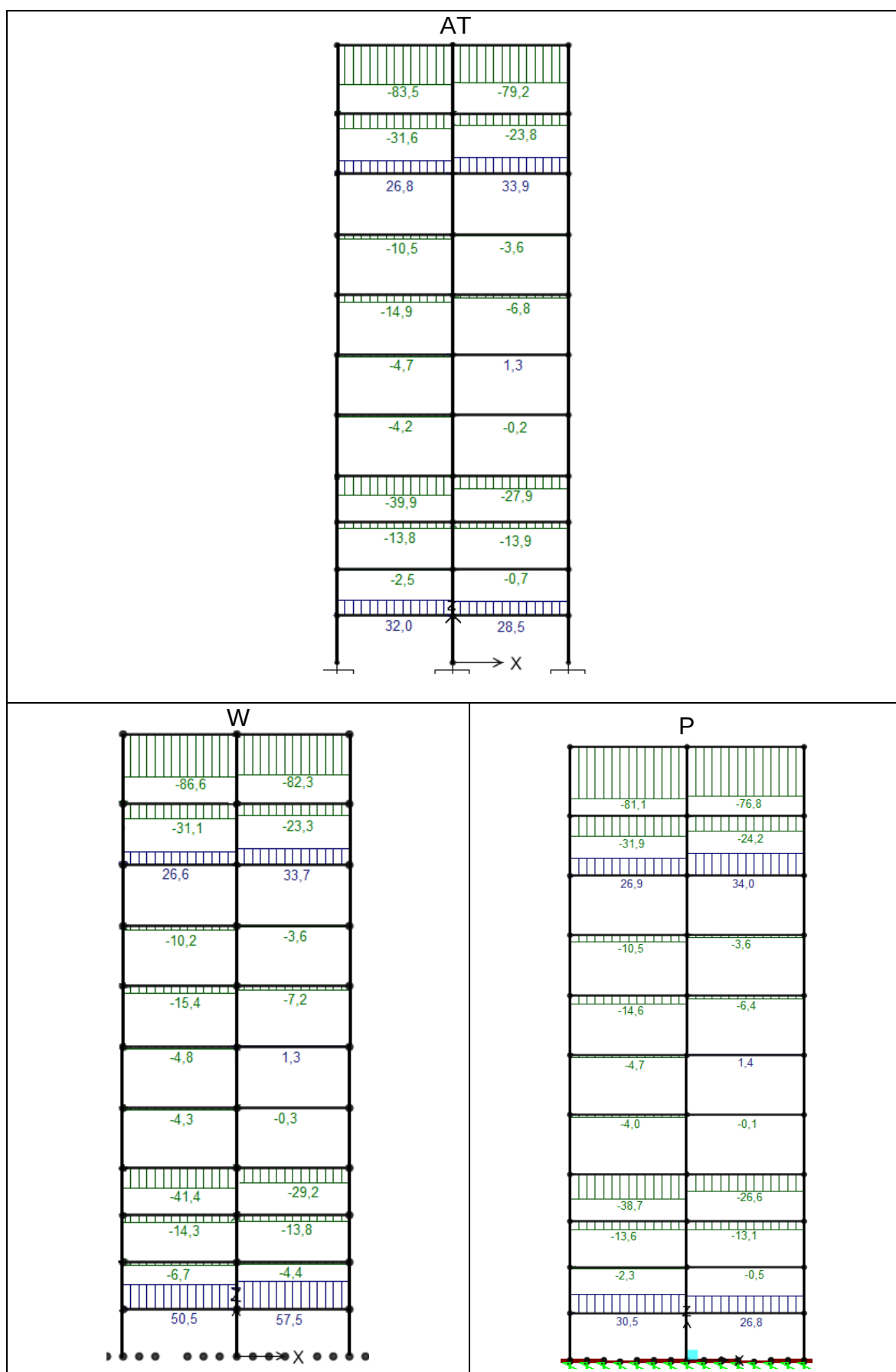
Fonte: do Autor

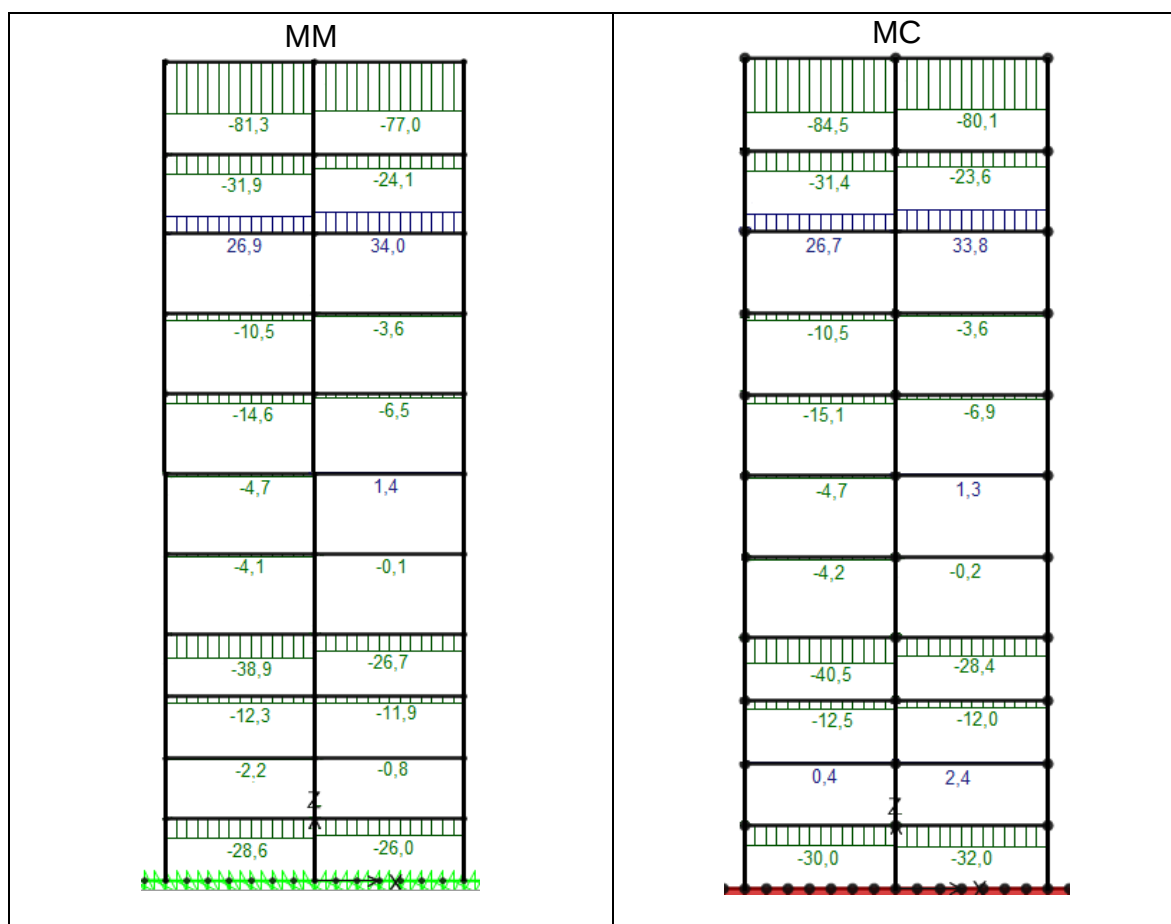
Tabela 25 - Força Normal (kN) nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos

| Força Normal nas Vigas - Pórtico de 11 Pavimentos |       |       |       |       |       | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Vigas                                             | N-AT  | N-W   | N-P   | N-MM  | N-MC  | Vigas                                                                    | N-W   | N-P   | N-MM  | N-MC  |
| Nº                                                | kN    | kN    | kN    | kN    | kN    | Nº                                                                       |       |       |       |       |
| 2                                                 | 32,0  | 50,5  | 30,5  | -28,6 | -30,0 | 2                                                                        | 57,9  | 4,5   | 189,6 | 193,9 |
| 4                                                 | 28,5  | 57,5  | 26,8  | -26,0 | -32,0 | 4                                                                        | 101,5 | 5,9   | 191,2 | 212,2 |
| 7                                                 | -2,5  | -6,7  | -2,3  | -2,2  | 0,4   | 7                                                                        | 166,5 | 9,0   | 11,0  | 117,7 |
| 9                                                 | -0,7  | -4,4  | -0,5  | -0,8  | 2,4   | 9                                                                        | 516,9 | 28,6  | 14,2  | 439,0 |
| 12                                                | -13,8 | -14,3 | -13,6 | -12,3 | -12,5 | 12                                                                       | 4,0   | 1,6   | 10,4  | 9,2   |
| 14                                                | -13,2 | -13,8 | -13,1 | -11,9 | -12,0 | 14                                                                       | 4,6   | 0,9   | 9,7   | 9,0   |
| 17                                                | -39,9 | -41,4 | -38,7 | -38,9 | -40,5 | 17                                                                       | 4,0   | 2,9   | 2,4   | 1,5   |
| 19                                                | -27,9 | -29,2 | -26,6 | -26,7 | -28,4 | 19                                                                       | 4,6   | 4,9   | 4,5   | 1,7   |
| 22                                                | -4,2  | -4,3  | -4,0  | -4,1  | -4,2  | 22                                                                       | 2,3   | 3,9   | 3,5   | 0,8   |
| 24                                                | -0,2  | -0,3  | -0,1  | -0,1  | -0,2  | 24                                                                       | 68,2  | 45,5  | 27,3  | 34,7  |
| 27                                                | -4,7  | -4,8  | -4,7  | -4,7  | -4,7  | 27                                                                       | 0,8   | 1,0   | 1,1   | 0,1   |
| 29                                                | 1,3   | 1,3   | 1,4   | 1,4   | 1,3   | 29                                                                       | 0,2   | 2,6   | 3,0   | 0,6   |
| 32                                                | -14,9 | -15,4 | -14,6 | -14,6 | -15,1 | 32                                                                       | 3,3   | 2,4   | 2,1   | 1,0   |
| 34                                                | -6,8  | -7,2  | -6,4  | -6,5  | -6,9  | 34                                                                       | 5,9   | 5,8   | 5,4   | 1,5   |
| 37                                                | -10,5 | -10,5 | -10,5 | -10,5 | -10,5 | 37                                                                       | 0,0   | 0,1   | 0,1   | 0,0   |
| 39                                                | -3,6  | -3,6  | -3,6  | -3,6  | -3,6  | 39                                                                       | 0,8   | 0,1   | 0,2   | 0,3   |
| 42                                                | 26,8  | 26,6  | 26,9  | 26,9  | 26,7  | 42                                                                       | 0,8   | 0,5   | 0,5   | 0,2   |
| 44                                                | 33,9  | 33,7  | 34,0  | 34,0  | 33,8  | 44                                                                       | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,1   |
| 47                                                | -31,6 | -31,1 | -31,9 | -31,9 | -31,4 | 47                                                                       | 1,5   | 1,1   | 1,0   | 0,5   |
| 49                                                | -23,8 | -23,3 | -24,2 | -24,1 | -23,6 | 49                                                                       | 2,0   | 1,6   | 1,5   | 0,6   |
| 52                                                | -83,5 | -86,6 | -81,1 | -81,3 | -84,5 | 52                                                                       | 3,7   | 2,9   | 2,6   | 1,1   |
| 54                                                | -79,2 | -82,3 | -76,8 | -77,0 | -80,1 | 54                                                                       | 3,8   | 3,1   | 2,8   | 1,1   |
| Máximos                                           |       |       |       |       |       | 516,9                                                                    | 45,5  | 191,2 | 439,0 |       |
| Mínimos                                           |       |       |       |       |       | 0,0                                                                      | 0,1   | 0,1   | 0,0   |       |
| Média                                             |       |       |       |       |       | 43,3                                                                     | 5,9   | 22,0  | 46,7  |       |

Fonte: do Autor

Figura 40 - Diagramas de Força Normal (kN) nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos



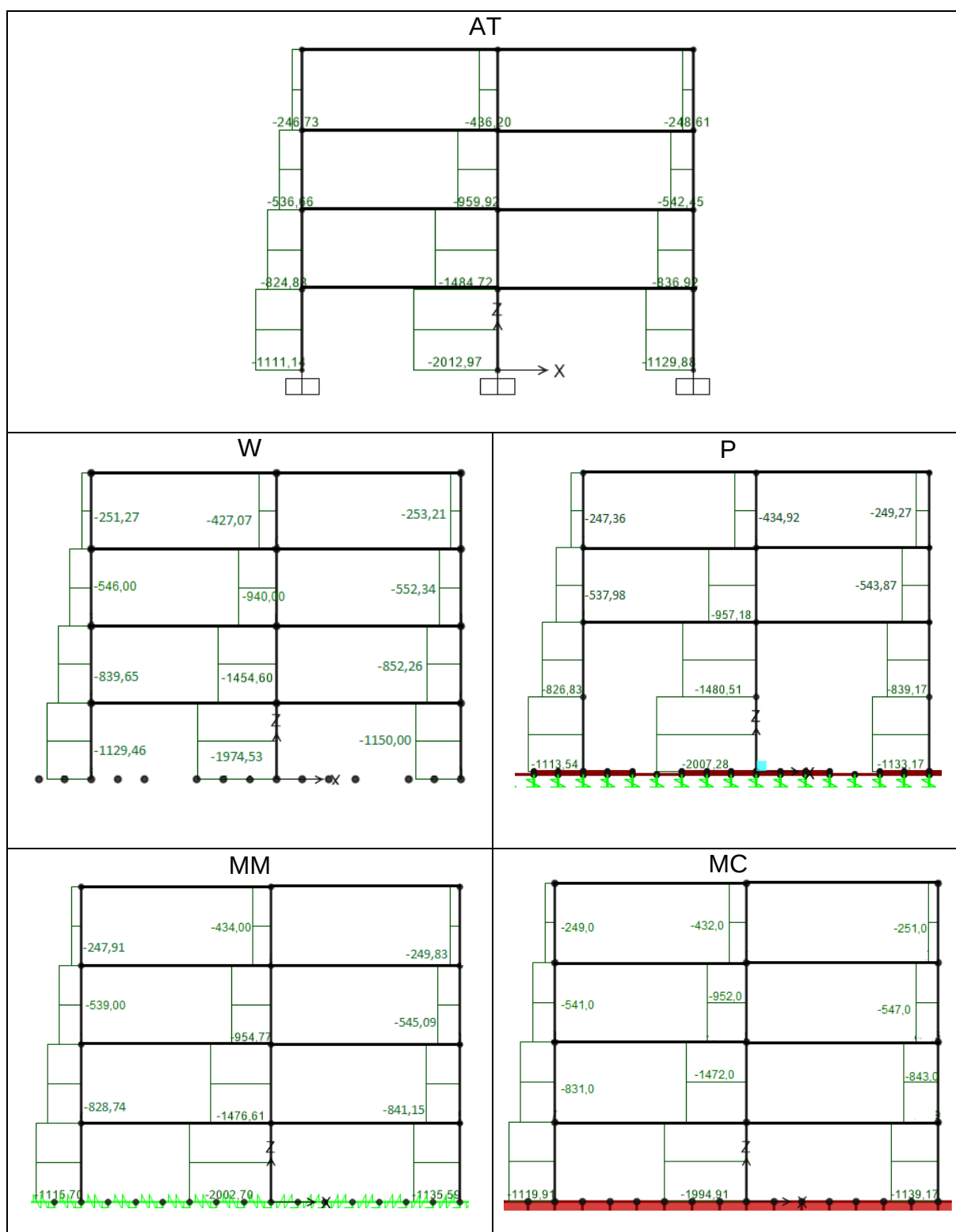


Fonte: do Autor

Tabela 26 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos

| Força Normal nos Pilares - Pórtico de 4 Pavimentos |       |       |       |       |       | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |     |     |      |      |
|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|
| Pilares                                            | N-AT  | N-W   | N-P   | N-MM  | N-MC  | Pilares                                                                  | N-W | N-P | N-MM | N-MC |
| Nº                                                 | kN    | kN    | kN    | kN    | kN    | Nº                                                                       |     |     |      |      |
| 1                                                  | -1111 | -1129 | -1114 | -1116 | -1120 | 1                                                                        | 1,6 | 0,2 | 0,4  | 0,8  |
| 3                                                  | -2013 | -1975 | -2007 | -2003 | -1995 | 3                                                                        | 1,9 | 0,3 | 0,5  | 0,9  |
| 5                                                  | -1130 | -1150 | -1133 | -1136 | -1139 | 5                                                                        | 1,8 | 0,3 | 0,5  | 0,8  |
| 6                                                  | -825  | -840  | -827  | -829  | -831  | 6                                                                        | 1,8 | 0,2 | 0,5  | 0,8  |
| 8                                                  | -1485 | -1455 | -1481 | -1477 | -1472 | 8                                                                        | 2,0 | 0,3 | 0,5  | 0,9  |
| 10                                                 | -837  | -852  | -839  | -841  | -843  | 10                                                                       | 1,8 | 0,3 | 0,5  | 0,8  |
| 11                                                 | -537  | -546  | -538  | -539  | -541  | 11                                                                       | 1,8 | 0,2 | 0,5  | 0,8  |
| 13                                                 | -960  | -940  | -957  | -955  | -952  | 13                                                                       | 2,0 | 0,3 | 0,5  | 0,9  |
| 15                                                 | -542  | -552  | -544  | -545  | -547  | 15                                                                       | 1,8 | 0,3 | 0,5  | 0,8  |
| 16                                                 | -247  | -251  | -247  | -248  | -249  | 16                                                                       | 1,8 | 0,3 | 0,5  | 0,8  |
| 18                                                 | -436  | -427  | -435  | -434  | -432  | 18                                                                       | 2,1 | 0,3 | 0,5  | 0,9  |
| 20                                                 | -249  | -253  | -249  | -250  | -251  | 20                                                                       | 1,8 | 0,3 | 0,5  | 0,8  |
| Máximos                                            |       |       |       |       |       |                                                                          | 2,1 | 0,3 | 0,5  | 0,9  |
| Mínimos                                            |       |       |       |       |       |                                                                          | 1,6 | 0,2 | 0,4  | 0,8  |
| Média                                              |       |       |       |       |       |                                                                          | 1,9 | 0,3 | 0,5  | 0,8  |

Figura 41 - Diagramas de Força Normal (kN) nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos



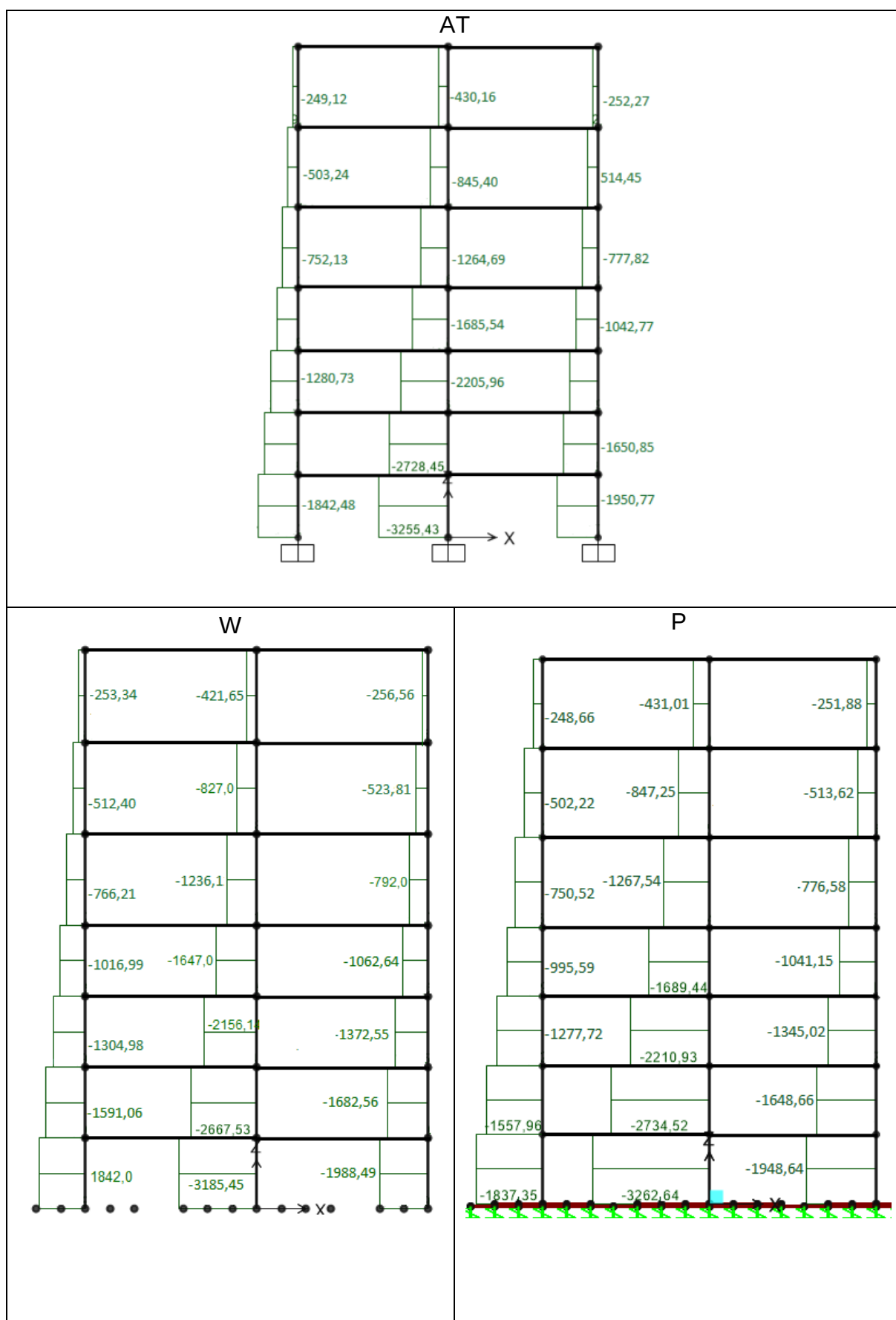
Fonte: do Autor

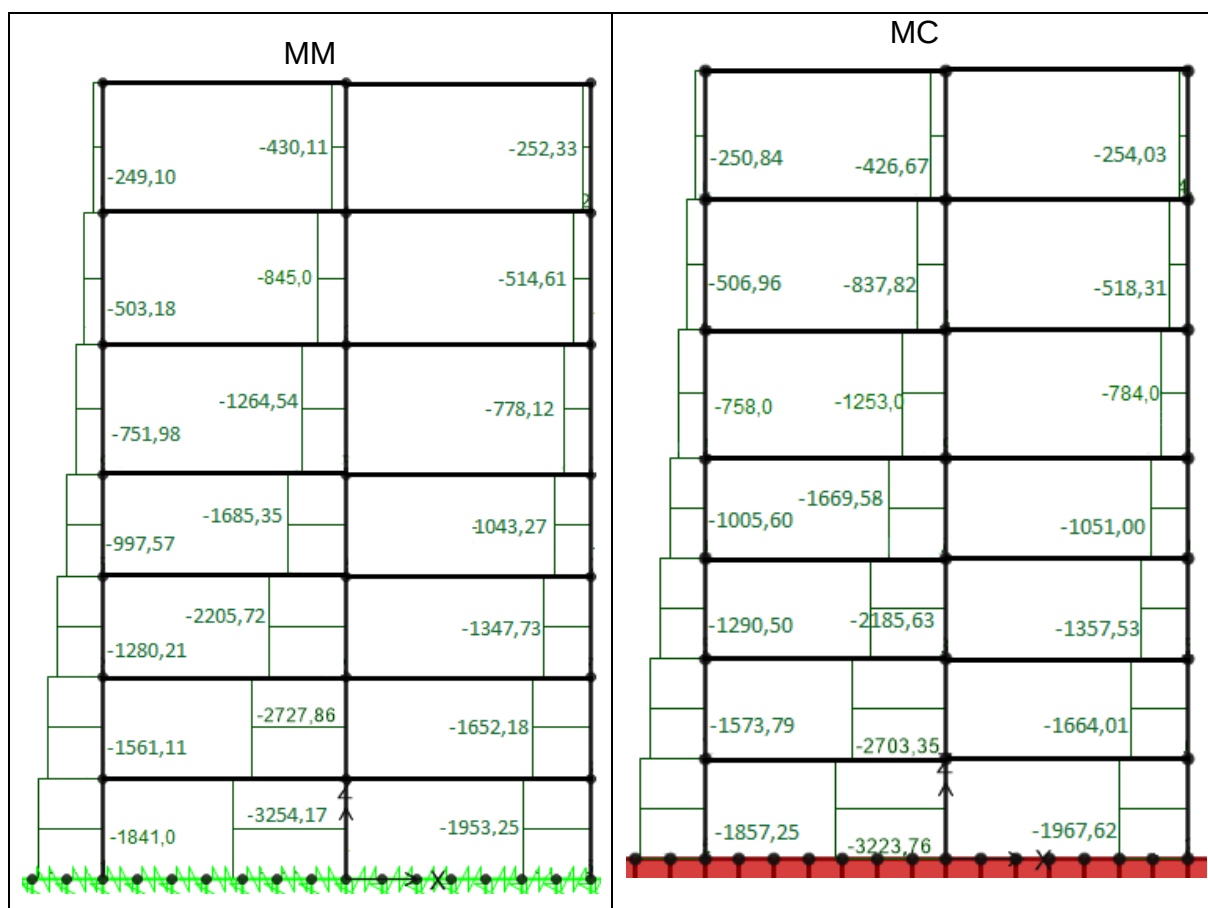
Tabela 27 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos

| Força Normal nos Pilares - Pórtico de 7 Pavimentos |       |       |       |       |       | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |     |     |      |      |
|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|
| Pilares                                            | N-AT  | N-W   | N-P   | N-MM  | N-MC  | Pilares                                                                  | N-W | N-P | N-MM | N-MC |
| Nº                                                 | kN    | kN    | kN    | kN    | kN    | Nº                                                                       |     |     |      |      |
| 1                                                  | -1842 | -1875 | -1837 | -1841 | -1857 | 1                                                                        | 1,8 | 0,3 | 0,1  | 0,8  |
| 3                                                  | -3255 | -3185 | -3263 | -3254 | -3224 | 3                                                                        | 2,1 | 0,2 | 0,0  | 1,0  |
| 5                                                  | -1951 | -1988 | -1949 | -1953 | -1968 | 5                                                                        | 1,9 | 0,1 | 0,1  | 0,9  |
| 6                                                  | -1562 | -1591 | -1558 | -1561 | -1574 | 6                                                                        | 1,9 | 0,2 | 0,0  | 0,8  |
| 8                                                  | -2728 | -2668 | -2735 | -2728 | -2703 | 8                                                                        | 2,2 | 0,2 | 0,0  | 0,9  |
| 10                                                 | -1651 | -1683 | -1649 | -1652 | -1664 | 10                                                                       | 1,9 | 0,1 | 0,1  | 0,8  |
| 11                                                 | -1281 | -1305 | -1278 | -1280 | -1291 | 11                                                                       | 1,9 | 0,2 | 0,0  | 0,8  |
| 13                                                 | -2206 | -2156 | -2211 | -2206 | -2186 | 13                                                                       | 2,3 | 0,2 | 0,0  | 0,9  |
| 15                                                 | -1347 | -1373 | -1345 | -1348 | -1358 | 15                                                                       | 1,9 | 0,1 | 0,1  | 0,8  |
| 16                                                 | -998  | -1017 | -996  | -998  | -1006 | 16                                                                       | 1,9 | 0,2 | 0,0  | 0,8  |
| 18                                                 | -1686 | -1647 | -1689 | -1685 | -1670 | 18                                                                       | 2,3 | 0,2 | 0,0  | 0,9  |
| 20                                                 | -1043 | -1063 | -1041 | -1043 | -1051 | 20                                                                       | 1,9 | 0,2 | 0,0  | 0,8  |
| 21                                                 | -752  | -766  | -751  | -752  | -758  | 21                                                                       | 1,9 | 0,2 | 0,0  | 0,8  |
| 23                                                 | -1265 | -1236 | -1268 | -1265 | -1253 | 23                                                                       | 2,3 | 0,2 | 0,0  | 0,9  |
| 25                                                 | -778  | -792  | -777  | -778  | -784  | 25                                                                       | 1,9 | 0,2 | 0,0  | 0,8  |
| 26                                                 | -503  | -512  | -502  | -503  | -507  | 26                                                                       | 1,8 | 0,2 | 0,0  | 0,7  |
| 28                                                 | -845  | -827  | -847  | -845  | -838  | 28                                                                       | 2,2 | 0,2 | 0,0  | 0,9  |
| 30                                                 | -514  | -524  | -514  | -515  | -518  | 30                                                                       | 1,8 | 0,2 | 0,0  | 0,7  |
| 31                                                 | -249  | -253  | -249  | -249  | -251  | 31                                                                       | 1,7 | 0,2 | 0,0  | 0,7  |
| 33                                                 | -430  | -422  | -431  | -430  | -427  | 33                                                                       | 2,0 | 0,2 | 0,0  | 0,8  |
| 35                                                 | -252  | -257  | -252  | -252  | -254  | 35                                                                       | 1,7 | 0,2 | 0,0  | 0,7  |
| Máximos                                            |       |       |       |       |       |                                                                          | 2,3 | 0,3 | 0,1  | 1,0  |
| Mínimos                                            |       |       |       |       |       |                                                                          | 1,7 | 0,1 | 0,0  | 0,7  |
| Média                                              |       |       |       |       |       |                                                                          | 2,0 | 0,2 | 0,0  | 0,8  |

Fonte: do Autor

Figura 42 - Diagramas de Força Normal (kN) nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos





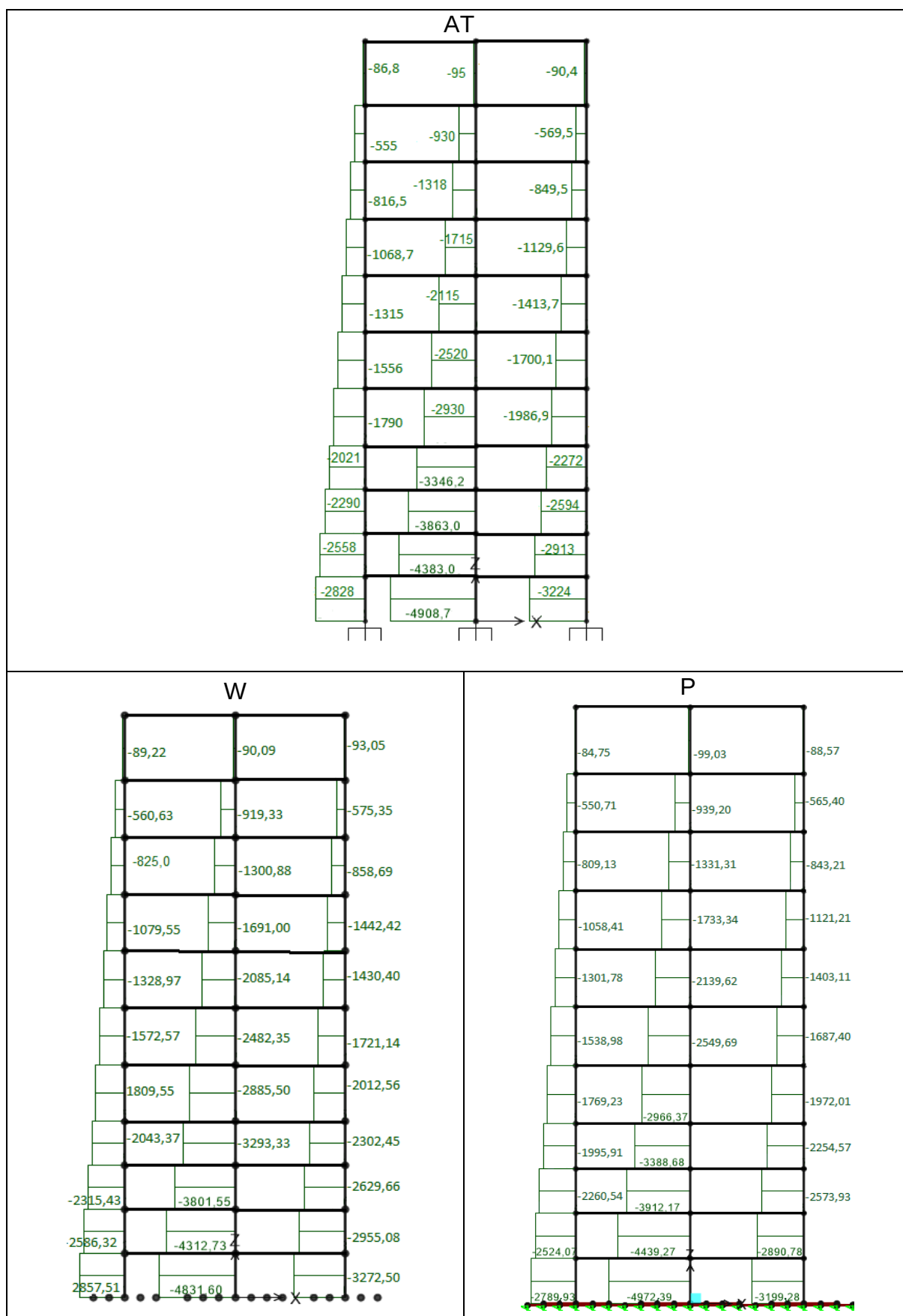
Fonte: do Autor

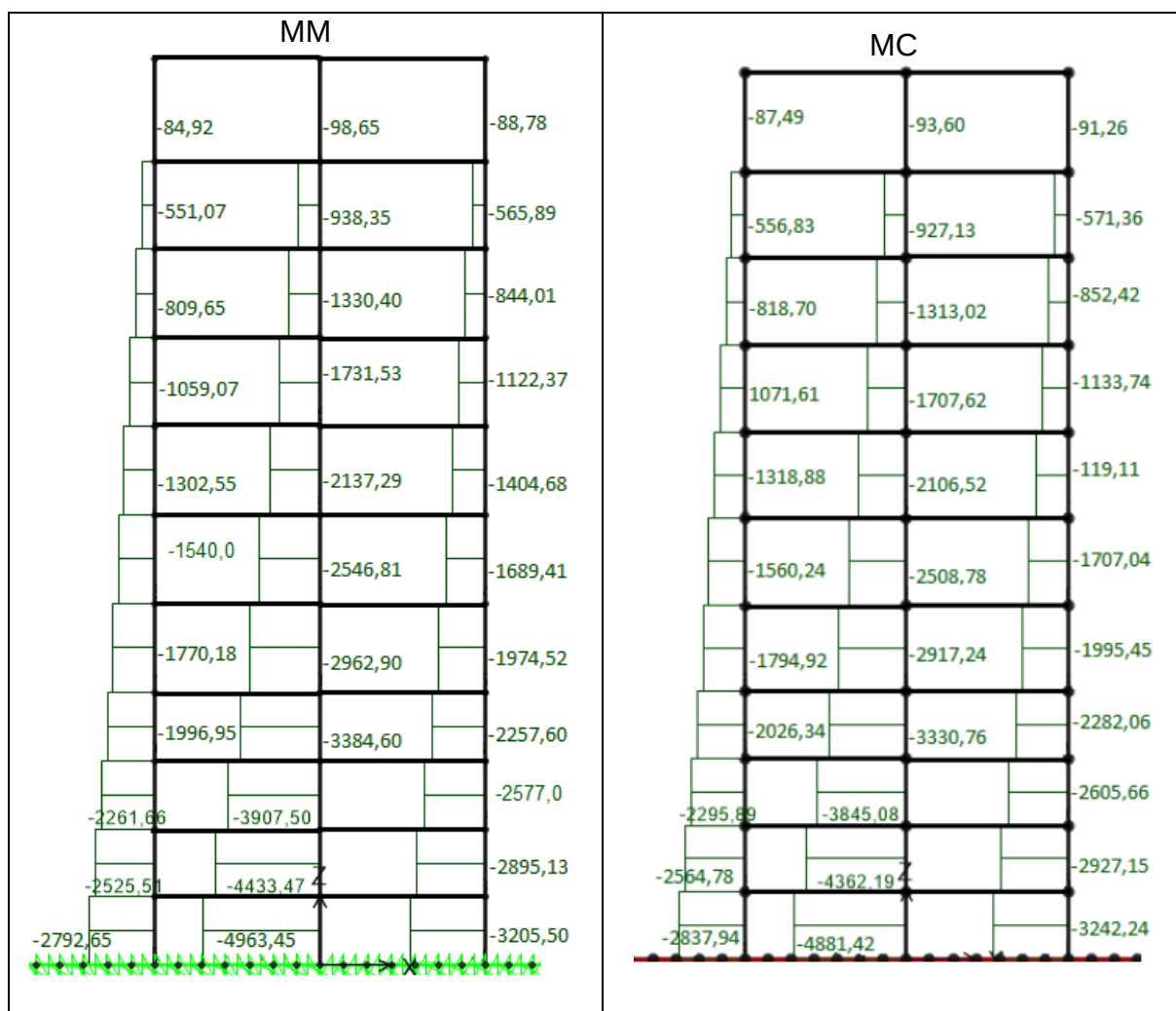
Tabela 28 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos

| Força Normal nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos |       |       |       |       |       | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |     |     |      |      |
|-----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|
| Pilares                                             | N-AT  | N-W   | N-P   | N-MM  | N-MC  | Pilares                                                                  | N-W | N-P | N-MM | N-MC |
| Nº                                                  | kN    | kN    | kN    | kN    | kN    | Nº                                                                       |     |     |      |      |
| 1                                                   | -2828 | -2858 | -2790 | -2793 | -2838 | 1                                                                        | 1,0 | 1,4 | 1,3  | 0,3  |
| 3                                                   | -4909 | -4832 | -4972 | -4963 | -4881 | 3                                                                        | 1,6 | 1,3 | 1,1  | 0,6  |
| 5                                                   | -3224 | -3272 | -3199 | -3206 | -3242 | 5                                                                        | 1,5 | 0,8 | 0,6  | 0,6  |
| 6                                                   | -2558 | -2586 | -2524 | -2526 | -2565 | 6                                                                        | 1,1 | 1,3 | 1,3  | 0,3  |
| 8                                                   | -4383 | -4313 | -4439 | -4433 | -4362 | 8                                                                        | 1,6 | 1,3 | 1,2  | 0,5  |
| 10                                                  | -2913 | -2955 | -2891 | -2895 | -2927 | 10                                                                       | 1,4 | 0,8 | 0,6  | 0,5  |
| 11                                                  | -2290 | -2315 | -2261 | -2262 | -2296 | 11                                                                       | 1,1 | 1,3 | 1,2  | 0,3  |
| 13                                                  | -3863 | -3802 | -3912 | -3908 | -3845 | 13                                                                       | 1,6 | 1,3 | 1,2  | 0,5  |
| 15                                                  | -2594 | -2630 | -2574 | -2577 | -2606 | 15                                                                       | 1,4 | 0,8 | 0,6  | 0,5  |
| 16                                                  | -2021 | -2043 | -1996 | -1997 | -2026 | 16                                                                       | 1,1 | 1,2 | 1,2  | 0,3  |
| 18                                                  | -3346 | -3293 | -3389 | -3385 | -3331 | 18                                                                       | 1,6 | 1,3 | 1,1  | 0,5  |
| 20                                                  | -2272 | -2302 | -2255 | -2258 | -2282 | 20                                                                       | 1,3 | 0,8 | 0,6  | 0,4  |
| 21                                                  | -1790 | -1810 | -1769 | -1770 | -1795 | 21                                                                       | 1,1 | 1,2 | 1,1  | 0,3  |
| 23                                                  | -2930 | -2886 | -2966 | -2963 | -2917 | 23                                                                       | 1,5 | 1,2 | 1,1  | 0,4  |
| 25                                                  | -1987 | -2013 | -1972 | -1975 | -1995 | 25                                                                       | 1,3 | 0,8 | 0,6  | 0,4  |
| 26                                                  | -1556 | -1573 | -1539 | -1540 | -1560 | 26                                                                       | 1,1 | 1,1 | 1,0  | 0,3  |
| 28                                                  | -2520 | -2482 | -2550 | -2547 | -2509 | 28                                                                       | 1,5 | 1,2 | 1,1  | 0,4  |
| 30                                                  | -1700 | -1721 | -1687 | -1689 | -1707 | 30                                                                       | 1,2 | 0,8 | 0,6  | 0,4  |
| 31                                                  | -1315 | -1329 | -1302 | -1303 | -1319 | 31                                                                       | 1,0 | 1,0 | 1,0  | 0,3  |
| 33                                                  | -2115 | -2085 | -2140 | -2137 | -2107 | 33                                                                       | 1,4 | 1,1 | 1,0  | 0,4  |
| 35                                                  | -1414 | -1430 | -1403 | -1405 | -1419 | 35                                                                       | 1,2 | 0,7 | 0,6  | 0,4  |
| 36                                                  | -1069 | -1080 | -1058 | -1059 | -1072 | 36                                                                       | 1,0 | 1,0 | 0,9  | 0,3  |
| 38                                                  | -1715 | -1691 | -1733 | -1732 | -1708 | 38                                                                       | 1,4 | 1,1 | 1,0  | 0,4  |
| 40                                                  | -1130 | -1142 | -1121 | -1122 | -1134 | 40                                                                       | 1,1 | 0,7 | 0,6  | 0,4  |
| 41                                                  | -817  | -825  | -809  | -810  | -819  | 41                                                                       | 1,0 | 0,9 | 0,8  | 0,3  |
| 43                                                  | -1318 | -1301 | -1332 | -1330 | -1313 | 43                                                                       | 1,3 | 1,0 | 0,9  | 0,4  |
| 45                                                  | -850  | -859  | -843  | -844  | -852  | 45                                                                       | 1,1 | 0,7 | 0,7  | 0,3  |
| 46                                                  | -555  | -561  | -551  | -551  | -557  | 46                                                                       | 0,9 | 0,8 | 0,8  | 0,3  |
| 48                                                  | -930  | -919  | -939  | -938  | -927  | 48                                                                       | 1,2 | 0,9 | 0,9  | 0,3  |
| 50                                                  | -570  | -575  | -565  | -566  | -571  | 50                                                                       | 1,0 | 0,7 | 0,6  | 0,3  |
| 51                                                  | -87   | -89   | -85   | -85   | -87   | 51                                                                       | 2,8 | 2,4 | 2,2  | 0,8  |
| 53                                                  | -95   | -90   | -99   | -99   | -94   | 53                                                                       | 5,2 | 4,2 | 3,8  | 1,5  |
| 55                                                  | -90   | -93   | -89   | -89   | -91   | 55                                                                       | 2,8 | 2,1 | 1,9  | 0,9  |
| Máximos                                             |       |       |       |       |       | 5,2                                                                      | 4,2 | 3,8 | 1,5  |      |
| Mínimos                                             |       |       |       |       |       | 0,9                                                                      | 0,7 | 0,6 | 0,3  |      |
| Média                                               |       |       |       |       |       | 1,5                                                                      | 1,2 | 1,1 | 0,4  |      |

Fonte: do Autor

Figura 43 - Diagramas de Força Normal (kN) nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos





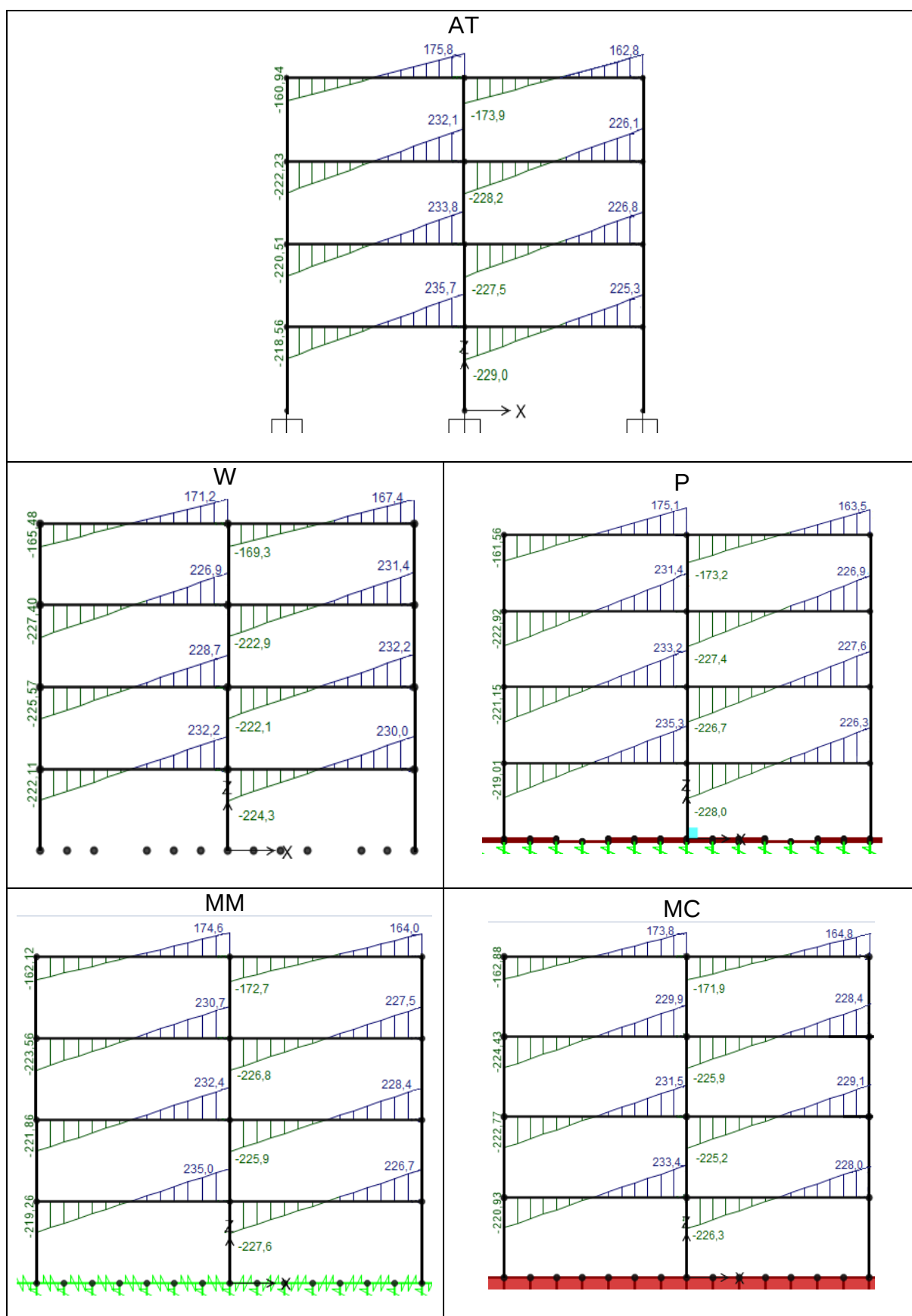
Fonte: do Autor

Tabela 29 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos

| Força Cortante nas Vigas - Pórtico de 4 Pavimentos |       |        |        |        |        |        | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |     |     |      |      |
|----------------------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|
| Vigas                                              | Coord | V-AT   | V-W    | V-P    | V-MM   | V-MC   | Vigas                                                                    | V-W | V-P | V-MM | V-MC |
| Nº                                                 | m     | kN     | kN     | kN     | kN     | kN     | Nº                                                                       |     |     |      |      |
| 2                                                  | 0     | -218,6 | -222,1 | -219,0 | -219,3 | -220,9 | 2                                                                        | 1,6 | 0,2 | 0,3  | 1,1  |
| 2                                                  | 7     | 235,7  | 232,2  | 235,3  | 235,0  | 233,4  | 2                                                                        | 1,5 | 0,2 | 0,3  | 1,0  |
| 4                                                  | 0     | -229,0 | -224,3 | -228,0 | -227,6 | -226,3 | 4                                                                        | 2,1 | 0,5 | 0,6  | 1,2  |
| 4                                                  | 7     | 225,3  | 230,0  | 226,3  | 226,7  | 228,0  | 4                                                                        | 2,1 | 0,5 | 0,7  | 1,2  |
| 7                                                  | 0     | -220,5 | -225,6 | -221,1 | -221,9 | -222,8 | 7                                                                        | 2,3 | 0,3 | 0,6  | 1,0  |
| 7                                                  | 7     | 233,8  | 228,7  | 233,2  | 232,4  | 231,5  | 7                                                                        | 2,2 | 0,3 | 0,6  | 1,0  |
| 9                                                  | 0     | -227,5 | -222,1 | -226,7 | -225,9 | -225,2 | 9                                                                        | 2,4 | 0,4 | 0,7  | 1,0  |
| 9                                                  | 7     | 226,8  | 232,2  | 227,6  | 228,4  | 229,1  | 9                                                                        | 2,4 | 0,4 | 0,7  | 1,0  |
| 12                                                 | 0     | -222,2 | -227,4 | -222,9 | -223,6 | -224,4 | 12                                                                       | 2,3 | 0,3 | 0,6  | 1,0  |
| 12                                                 | 7     | 232,1  | 226,9  | 231,4  | 230,7  | 229,9  | 12                                                                       | 2,2 | 0,3 | 0,6  | 0,9  |
| 14                                                 | 0     | -228,2 | -222,9 | -227,4 | -226,8 | -225,9 | 14                                                                       | 2,3 | 0,3 | 0,6  | 1,0  |
| 14                                                 | 7     | 226,1  | 231,4  | 226,9  | 227,5  | 228,4  | 14                                                                       | 2,3 | 0,3 | 0,6  | 1,0  |
| 17                                                 | 0     | -160,9 | -165,5 | -161,6 | -162,1 | -162,9 | 17                                                                       | 2,8 | 0,4 | 0,7  | 1,2  |
| 17                                                 | 7     | 175,8  | 171,2  | 175,1  | 174,6  | 173,8  | 17                                                                       | 2,6 | 0,4 | 0,7  | 1,1  |
| 19                                                 | 0     | -173,9 | -169,3 | -173,2 | -172,7 | -171,9 | 19                                                                       | 2,6 | 0,4 | 0,7  | 1,1  |
| 19                                                 | 7     | 162,8  | 167,4  | 163,5  | 164,0  | 164,8  | 19                                                                       | 2,8 | 0,4 | 0,7  | 1,2  |
| Máximos                                            |       |        |        |        |        |        |                                                                          | 2,8 | 0,5 | 0,7  | 1,2  |
| Mínimos                                            |       |        |        |        |        |        |                                                                          | 1,5 | 0,2 | 0,3  | 0,9  |
| Média                                              |       |        |        |        |        |        |                                                                          | 2,3 | 0,3 | 0,6  | 1,1  |

Fonte: do Autor

Figura 44 - Diagramas de Força Cortante (kN) nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos



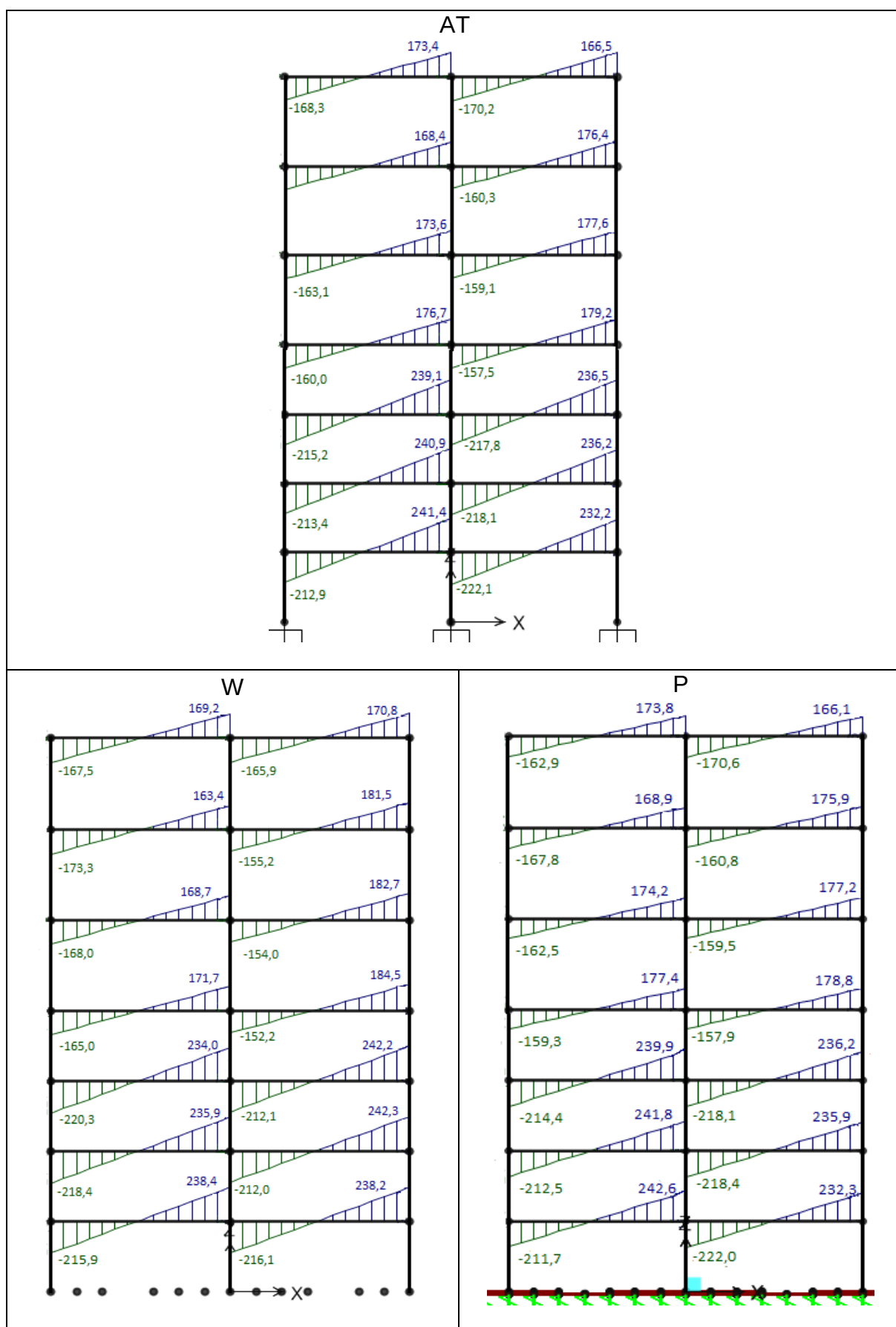
Fonte: do Autor

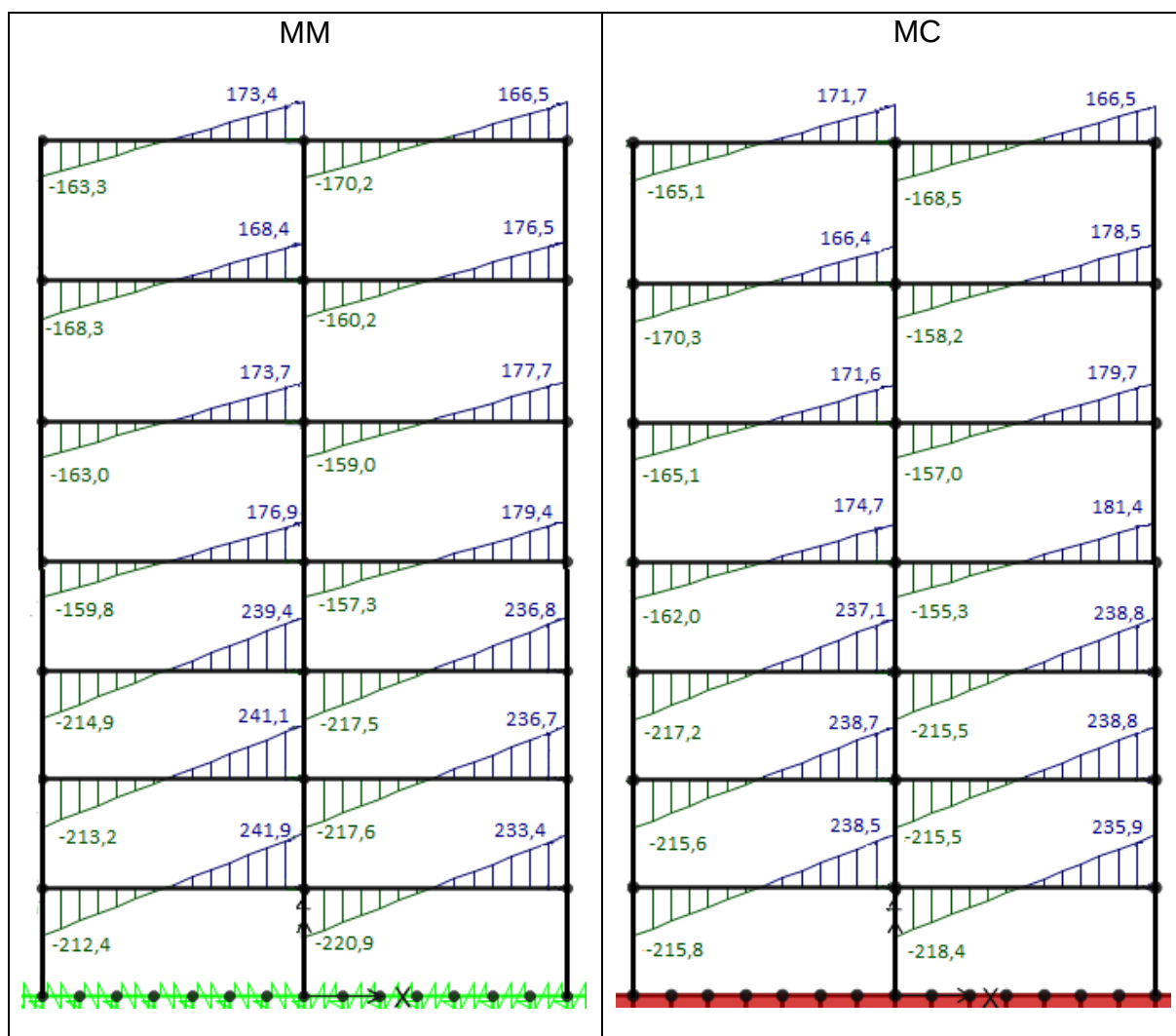
Tabela 30 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos

| Força cortante nas Vigas - Pórtico de 7 Pavimentos |       |        |        |        |        |        | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |     |     |      |      |
|----------------------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|
| Vigas                                              | Coord | V-AT   | V-W    | V-P    | V-MM   | V-MC   | Vigas                                                                    | V-W | V-P | V-MM | V-MC |
| Nº                                                 | m     | kN     | kN     | kN     | kN     | kN     | Nº                                                                       |     |     |      |      |
| 2                                                  | 0     | -212,9 | -215,9 | -211,7 | -212,4 | -215,8 | 2                                                                        | 1,4 | 0,6 | 0,2  | 1,4  |
| 2                                                  | 7     | 241,4  | 238,4  | 242,6  | 241,9  | 238,5  | 2                                                                        | 1,3 | 0,5 | 0,2  | 1,2  |
| 4                                                  | 0     | -222,1 | -216,1 | -222,0 | -220,9 | -218,4 | 4                                                                        | 2,7 | 0,0 | 0,5  | 1,7  |
| 4                                                  | 7     | 232,2  | 238,2  | 232,3  | 233,4  | 235,9  | 4                                                                        | 2,6 | 0,0 | 0,5  | 1,6  |
| 7                                                  | 0     | -213,4 | -218,4 | -212,5 | -213,2 | -215,6 | 7                                                                        | 2,3 | 0,4 | 0,1  | 1,0  |
| 7                                                  | 7     | 240,9  | 235,9  | 241,8  | 241,1  | 238,7  | 7                                                                        | 2,1 | 0,4 | 0,1  | 0,9  |
| 9                                                  | 0     | -218,1 | -212,0 | -218,4 | -217,6 | -215,5 | 9                                                                        | 2,8 | 0,1 | 0,3  | 1,2  |
| 9                                                  | 7     | 236,2  | 242,3  | 235,9  | 236,7  | 238,8  | 9                                                                        | 2,6 | 0,1 | 0,2  | 1,1  |
| 12                                                 | 0     | -215,2 | -220,3 | -214,4 | -214,9 | -217,2 | 12                                                                       | 2,4 | 0,3 | 0,1  | 0,9  |
| 12                                                 | 7     | 239,1  | 234,0  | 239,9  | 239,4  | 237,1  | 12                                                                       | 2,1 | 0,3 | 0,1  | 0,9  |
| 14                                                 | 0     | -217,8 | -212,1 | -218,1 | -217,5 | -215,5 | 14                                                                       | 2,6 | 0,2 | 0,1  | 1,1  |
| 14                                                 | 7     | 236,5  | 242,2  | 236,2  | 236,8  | 238,8  | 14                                                                       | 2,4 | 0,1 | 0,1  | 1,0  |
| 17                                                 | 0     | -160,0 | -165,0 | -159,3 | -159,8 | -162,0 | 17                                                                       | 3,1 | 0,4 | 0,1  | 1,3  |
| 17                                                 | 7     | 176,7  | 171,7  | 177,4  | 176,9  | 174,7  | 17                                                                       | 2,8 | 0,4 | 0,1  | 1,1  |
| 19                                                 | 0     | -157,5 | -152,2 | -157,9 | -157,3 | -155,3 | 19                                                                       | 3,4 | 0,2 | 0,1  | 1,4  |
| 19                                                 | 7     | 179,2  | 184,5  | 178,8  | 179,4  | 181,4  | 19                                                                       | 3,0 | 0,2 | 0,1  | 1,3  |
| 22                                                 | 0     | -163,1 | -168,0 | -162,5 | -163,0 | -165,1 | 22                                                                       | 3,0 | 0,4 | 0,1  | 1,2  |
| 22                                                 | 7     | 173,6  | 168,7  | 174,2  | 173,7  | 171,6  | 22                                                                       | 2,8 | 0,3 | 0,1  | 1,1  |
| 24                                                 | 0     | -159,1 | -154,0 | -159,5 | -159,0 | -157,0 | 24                                                                       | 3,2 | 0,3 | 0,1  | 1,3  |
| 24                                                 | 7     | 177,6  | 182,7  | 177,2  | 177,7  | 179,7  | 24                                                                       | 2,9 | 0,2 | 0,1  | 1,2  |
| 27                                                 | 0     | -168,3 | -173,3 | -167,8 | -168,3 | -170,3 | 27                                                                       | 2,9 | 0,3 | 0,0  | 1,2  |
| 27                                                 | 7     | 168,4  | 163,4  | 168,9  | 168,4  | 166,4  | 27                                                                       | 2,9 | 0,3 | 0,0  | 1,2  |
| 29                                                 | 0     | -160,3 | -155,2 | -160,8 | -160,2 | -158,2 | 29                                                                       | 3,2 | 0,3 | 0,1  | 1,3  |
| 29                                                 | 7     | 176,4  | 181,5  | 175,9  | 176,5  | 178,5  | 29                                                                       | 2,9 | 0,3 | 0,1  | 1,2  |
| 32                                                 | 0     | -163,3 | -167,5 | -162,9 | -163,3 | -165,0 | 32                                                                       | 2,6 | 0,3 | 0,0  | 1,1  |
| 32                                                 | 7     | 173,4  | 169,2  | 173,8  | 173,4  | 171,7  | 32                                                                       | 2,4 | 0,3 | 0,0  | 1,0  |
| 34                                                 | 0     | -170,2 | -165,9 | -170,6 | -170,2 | -168,5 | 34                                                                       | 2,5 | 0,2 | 0,0  | 1,0  |
| 34                                                 | 7     | 166,5  | 170,8  | 166,1  | 166,5  | 168,2  | 34                                                                       | 2,6 | 0,2 | 0,0  | 1,1  |
| Máximos                                            |       |        |        |        |        |        |                                                                          | 3,4 | 0,6 | 0,5  | 1,7  |
| Mínimos                                            |       |        |        |        |        |        |                                                                          | 1,3 | 0,0 | 0,0  | 0,9  |
| Média                                              |       |        |        |        |        |        |                                                                          | 2,6 | 0,3 | 0,1  | 1,2  |

Fonte: do Autor

Figura 45 - Diagramas de Força Cortante (kN) nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos





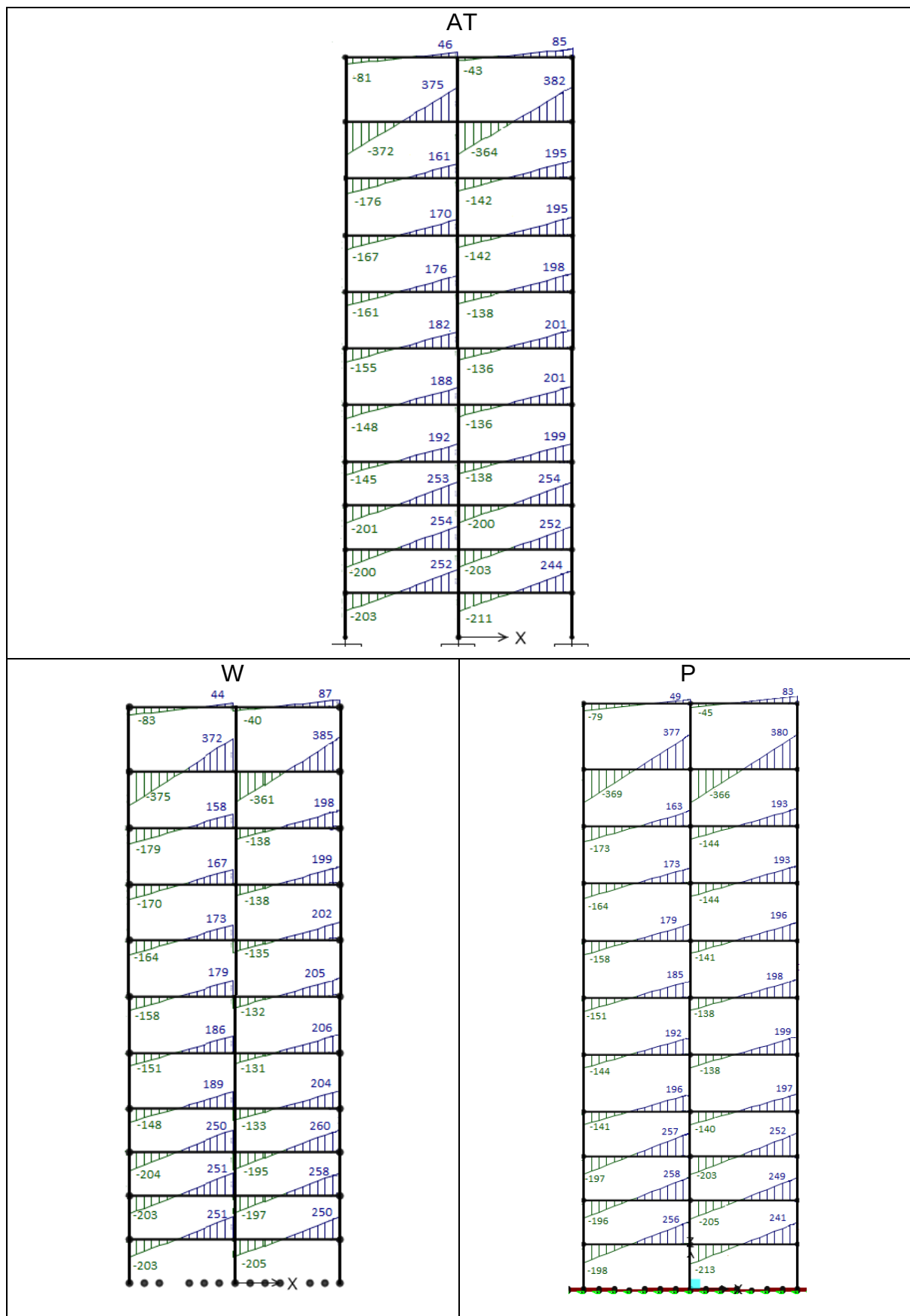
Fonte: do Autor

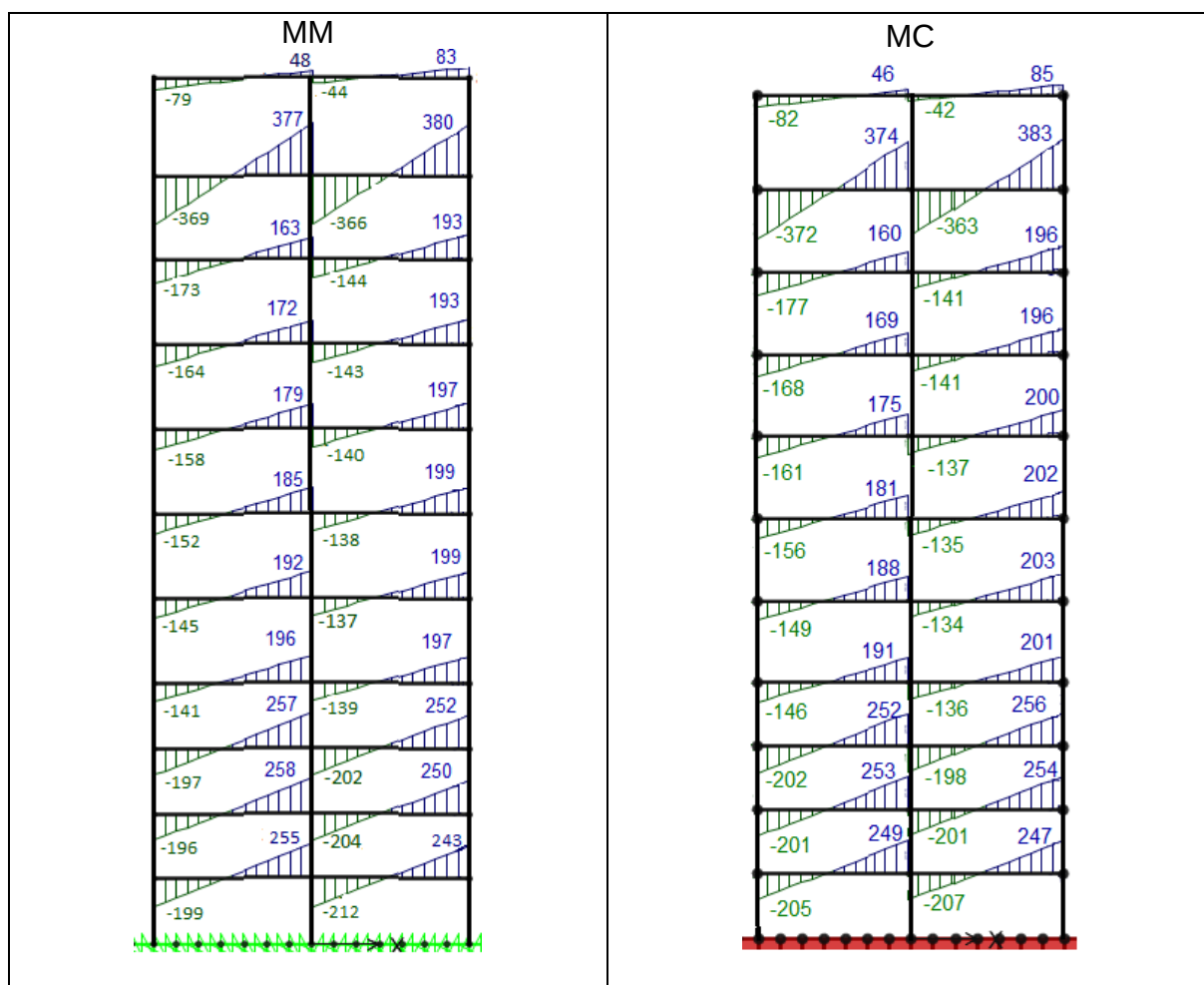
Tabela 31 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos

| Força cortante nas Vigas - Pórtico de 11 Pavimentos |       |      |      |      |      |      | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |     |     |      |      |
|-----------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|--------------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|
| Vigas                                               | Coord | V-AT | V-W  | V-P  | V-MM | V-MC | Vigas                                                                    | V-W | V-P | V-MM | V-MC |
| Nº                                                  | m     | kN   | kN   | kN   | kN   | kN   | Nº                                                                       |     |     |      |      |
| 2                                                   | 0     | -203 | -203 | -198 | -199 | -205 | 2                                                                        | 0,4 | 2,3 | 1,6  | 1,3  |
| 2                                                   | 7     | 252  | 251  | 256  | 255  | 249  | 2                                                                        | 0,3 | 1,8 | 1,3  | 1,1  |
| 4                                                   | 0     | -211 | -205 | -213 | -212 | -207 | 4                                                                        | 2,9 | 1,3 | 0,4  | 1,8  |
| 4                                                   | 7     | 244  | 250  | 241  | 243  | 247  | 4                                                                        | 2,5 | 1,1 | 0,4  | 1,6  |
| 7                                                   | 0     | -200 | -203 | -196 | -196 | -201 | 7                                                                        | 1,4 | 2,2 | 2,1  | 0,4  |
| 7                                                   | 7     | 254  | 251  | 258  | 258  | 253  | 7                                                                        | 1,1 | 1,8 | 1,6  | 0,4  |
| 9                                                   | 0     | -203 | -197 | -205 | -204 | -201 | 9                                                                        | 2,9 | 1,3 | 0,9  | 1,0  |
| 9                                                   | 7     | 252  | 258  | 249  | 250  | 254  | 9                                                                        | 2,4 | 1,0 | 0,7  | 0,8  |
| 12                                                  | 0     | -201 | -204 | -197 | -197 | -202 | 12                                                                       | 1,6 | 2,1 | 2,1  | 0,3  |
| 12                                                  | 7     | 253  | 250  | 257  | 257  | 252  | 12                                                                       | 1,3 | 1,7 | 1,7  | 0,3  |
| 14                                                  | 0     | -200 | -195 | -203 | -202 | -198 | 14                                                                       | 2,7 | 1,3 | 1,0  | 0,9  |
| 14                                                  | 7     | 254  | 260  | 252  | 252  | 256  | 14                                                                       | 2,1 | 1,0 | 0,8  | 0,7  |
| 17                                                  | 0     | -145 | -148 | -141 | -141 | -146 | 17                                                                       | 2,1 | 2,8 | 2,8  | 0,4  |
| 17                                                  | 7     | 192  | 189  | 196  | 196  | 191  | 17                                                                       | 1,6 | 2,1 | 2,1  | 0,3  |
| 19                                                  | 0     | -138 | -133 | -140 | -139 | -136 | 19                                                                       | 3,6 | 1,7 | 1,3  | 1,2  |
| 19                                                  | 7     | 199  | 204  | 197  | 197  | 201  | 19                                                                       | 2,5 | 1,2 | 0,9  | 0,9  |
| 22                                                  | 0     | -148 | -151 | -144 | -145 | -149 | 22                                                                       | 2,0 | 2,6 | 2,5  | 0,4  |
| 22                                                  | 7     | 188  | 186  | 192  | 192  | 188  | 22                                                                       | 1,5 | 2,0 | 2,0  | 0,3  |
| 24                                                  | 0     | -136 | -131 | -138 | -137 | -134 | 24                                                                       | 3,4 | 1,6 | 1,3  | 1,2  |
| 24                                                  | 7     | 201  | 206  | 199  | 199  | 203  | 24                                                                       | 2,3 | 1,1 | 0,8  | 0,8  |
| 27                                                  | 0     | -155 | -158 | -151 | -152 | -156 | 27                                                                       | 1,8 | 2,3 | 2,2  | 0,4  |
| 27                                                  | 7     | 182  | 179  | 185  | 185  | 181  | 27                                                                       | 1,6 | 2,0 | 1,9  | 0,3  |
| 29                                                  | 0     | -136 | -132 | -138 | -138 | -135 | 29                                                                       | 3,2 | 1,6 | 1,3  | 1,1  |
| 29                                                  | 7     | 201  | 205  | 198  | 199  | 202  | 29                                                                       | 2,1 | 1,1 | 0,9  | 0,7  |
| 32                                                  | 0     | -161 | -164 | -158 | -158 | -161 | 32                                                                       | 1,7 | 2,0 | 2,0  | 0,4  |
| 32                                                  | 7     | 176  | 173  | 179  | 179  | 175  | 32                                                                       | 1,6 | 1,9 | 1,8  | 0,4  |
| 34                                                  | 0     | -138 | -135 | -141 | -140 | -137 | 34                                                                       | 2,9 | 1,5 | 1,2  | 1,0  |
| 34                                                  | 7     | 198  | 202  | 196  | 197  | 200  | 34                                                                       | 2,0 | 1,1 | 0,9  | 0,7  |
| 37                                                  | 0     | -167 | -170 | -164 | -164 | -168 | 37                                                                       | 1,6 | 1,8 | 1,7  | 0,4  |
| 37                                                  | 7     | 170  | 167  | 173  | 172  | 169  | 37                                                                       | 1,6 | 1,7 | 1,7  | 0,4  |
| 39                                                  | 0     | -142 | -138 | -144 | -143 | -141 | 39                                                                       | 2,5 | 1,5 | 1,2  | 0,8  |
| 39                                                  | 7     | 195  | 199  | 193  | 193  | 196  | 39                                                                       | 1,9 | 1,1 | 0,9  | 0,6  |
| 42                                                  | 0     | -176 | -179 | -173 | -173 | -177 | 42                                                                       | 1,6 | 1,6 | 1,5  | 0,4  |
| 42                                                  | 7     | 161  | 158  | 163  | 163  | 160  | 42                                                                       | 1,7 | 1,7 | 1,6  | 0,4  |
| 44                                                  | 0     | -142 | -138 | -144 | -144 | -141 | 44                                                                       | 2,4 | 1,5 | 1,3  | 0,8  |
| 44                                                  | 7     | 195  | 198  | 193  | 193  | 196  | 44                                                                       | 1,7 | 1,1 | 1,0  | 0,6  |
| 47                                                  | 0     | -372 | -375 | -369 | -369 | -372 | 47                                                                       | 0,8 | 0,7 | 0,6  | 0,2  |
| 47                                                  | 7     | 375  | 372  | 377  | 377  | 374  | 47                                                                       | 0,8 | 0,7 | 0,6  | 0,2  |
| 49                                                  | 0     | -364 | -361 | -366 | -366 | -363 | 49                                                                       | 0,9 | 0,6 | 0,5  | 0,3  |
| 49                                                  | 7     | 382  | 385  | 380  | 380  | 383  | 49                                                                       | 0,8 | 0,6 | 0,5  | 0,3  |
| 52                                                  | 0     | -81  | -83  | -79  | -79  | -82  | 52                                                                       | 3,0 | 2,6 | 2,3  | 0,8  |
| 52                                                  | 7     | 46   | 44   | 49   | 48   | 46   | 52                                                                       | 5,2 | 4,5 | 4,1  | 1,5  |
| 54                                                  | 0     | -43  | -40  | -45  | -44  | -42  | 54                                                                       | 6,0 | 4,5 | 4,0  | 1,8  |
| 54                                                  | 7     | 85   | 87   | 83   | 83   | 85   | 54                                                                       | 3,0 | 2,3 | 2,0  | 0,9  |
| Máximos                                             |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 6,0 | 4,5 | 4,1  | 1,8  |
| Mínimos                                             |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 0,3 | 0,6 | 0,4  | 0,2  |
| Média                                               |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 2,1 | 1,7 | 1,5  | 0,7  |

Fonte: do Autor

Figura 46 - Diagramas de Força Cortante (kN) nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos





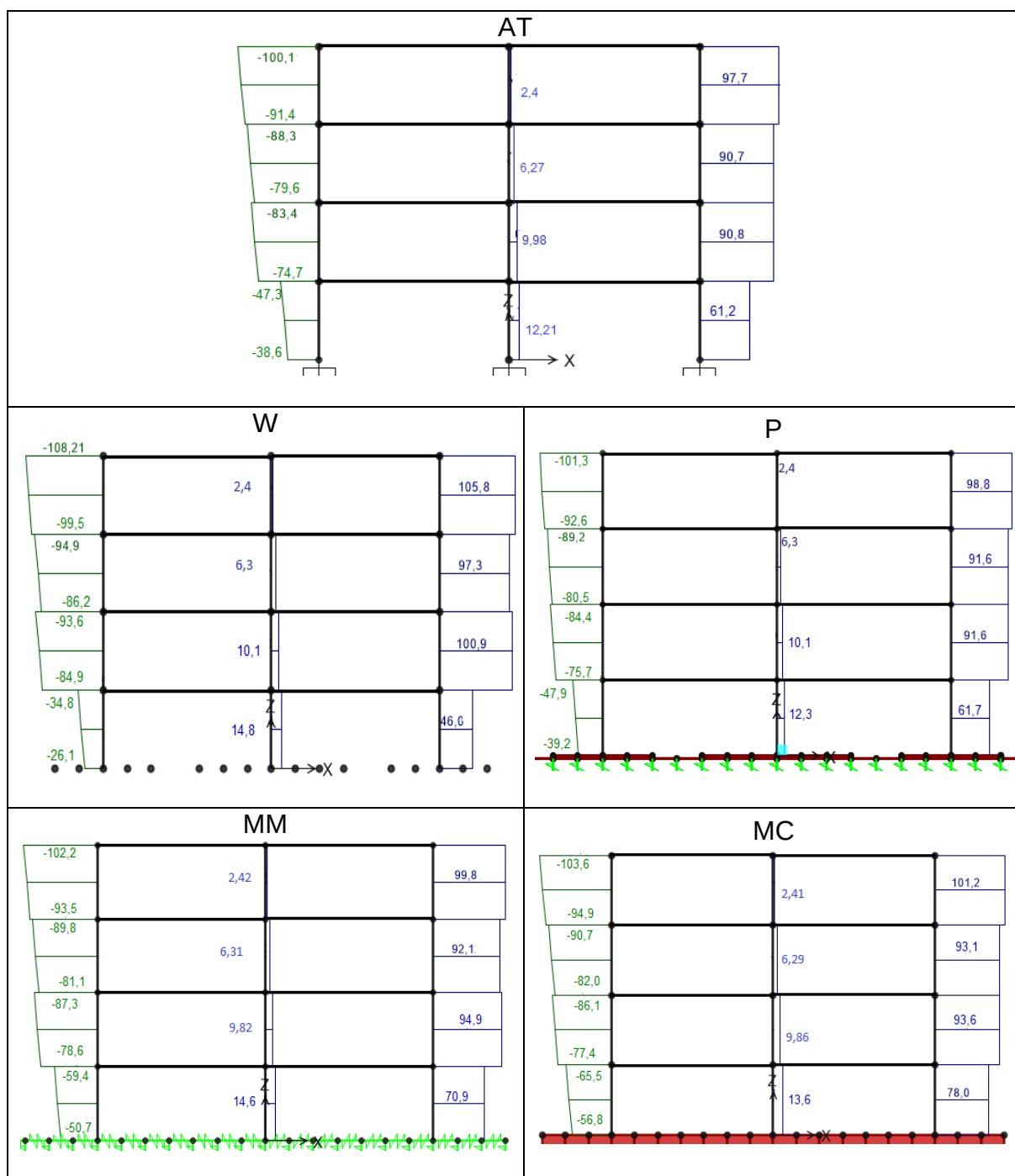
Fonte: do Autor

Tabela 32 - Força Cortante nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos

| Força cortante nos Pilares - Pórtico de 4 Pavimentos |       |        |        |        |        |        | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |      |     |      |      |
|------------------------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------------------------------------------------|------|-----|------|------|
| Pilares                                              | Coord | V-AT   | V-W    | V-P    | V-MM   | V-MC   | Pilares                                                                  | V-W  | V-P | V-MM | V-MC |
| Nº                                                   | m     | kN     | kN     | kN     | kN     | kN     | Nº                                                                       |      |     |      |      |
| 1                                                    | 0     | -38,6  | -26,1  | -39,2  | -50,7  | -56,8  | 1                                                                        | 32,6 | 1,6 | 31,2 | 47,2 |
| 1                                                    | 2,9   | -47,3  | -34,8  | -47,9  | -59,4  | -65,5  | 1                                                                        | 26,6 | 1,3 | 25,5 | 38,5 |
| 3                                                    | 0     | 12,2   | 14,8   | 12,3   | 14,6   | 13,6   | 3                                                                        | 20,9 | 0,7 | 19,4 | 11,3 |
| 3                                                    | 2,9   | 12,2   | 14,8   | 12,3   | 14,6   | 13,6   | 3                                                                        | 20,9 | 0,7 | 19,4 | 11,3 |
| 5                                                    | 0     | 61,2   | 46,0   | 61,7   | 70,9   | 78,0   | 5                                                                        | 24,8 | 0,8 | 15,8 | 27,5 |
| 5                                                    | 2,9   | 61,2   | 46,0   | 61,7   | 70,9   | 78,0   | 5                                                                        | 24,8 | 0,8 | 15,8 | 27,5 |
| 6                                                    | 0     | -74,7  | -84,9  | -75,7  | -78,6  | -77,4  | 6                                                                        | 13,6 | 1,2 | 5,2  | 3,5  |
| 6                                                    | 2,9   | -83,4  | -93,6  | -84,4  | -87,3  | -86,1  | 6                                                                        | 12,2 | 1,1 | 4,7  | 3,1  |
| 8                                                    | 0     | 10,0   | 10,1   | 10,1   | 9,8    | 9,9    | 8                                                                        | 0,7  | 1,1 | 1,6  | 1,2  |
| 8                                                    | 2,9   | 10,0   | 10,1   | 10,1   | 9,8    | 9,9    | 8                                                                        | 0,7  | 1,1 | 1,6  | 1,2  |
| 10                                                   | 0     | 90,8   | 100,9  | 91,6   | 94,9   | 93,6   | 10                                                                       | 11,1 | 0,9 | 4,5  | 3,0  |
| 10                                                   | 2,9   | 90,8   | 100,9  | 91,6   | 94,9   | 93,6   | 10                                                                       | 11,1 | 0,9 | 4,5  | 3,0  |
| 11                                                   | 0     | -79,6  | -86,2  | -80,5  | -81,1  | -82,0  | 11                                                                       | 8,3  | 1,1 | 1,8  | 3,0  |
| 11                                                   | 2,9   | -88,3  | -94,9  | -89,2  | -89,8  | -90,7  | 11                                                                       | 7,5  | 1,0 | 1,6  | 2,7  |
| 13                                                   | 0     | 6,3    | 6,3    | 6,3    | 6,3    | 6,3    | 13                                                                       | 0,9  | 0,4 | 0,6  | 0,3  |
| 13                                                   | 2,9   | 6,3    | 6,3    | 6,3    | 6,3    | 6,3    | 13                                                                       | 0,9  | 0,4 | 0,6  | 0,3  |
| 15                                                   | 0     | 90,7   | 97,3   | 91,6   | 92,1   | 93,1   | 15                                                                       | 7,2  | 1,0 | 1,5  | 2,6  |
| 15                                                   | 2,9   | 90,7   | 97,3   | 91,6   | 92,1   | 93,1   | 15                                                                       | 7,2  | 1,0 | 1,5  | 2,6  |
| 16                                                   | 0     | -91,4  | -99,5  | -92,6  | -93,5  | -94,9  | 16                                                                       | 8,9  | 1,3 | 2,3  | 3,8  |
| 16                                                   | 2,9   | -100,1 | -108,2 | -101,3 | -102,2 | -103,6 | 16                                                                       | 8,1  | 1,1 | 2,1  | 3,5  |
| 18                                                   | 0     | 2,4    | 2,4    | 2,4    | 2,4    | 2,4    | 18                                                                       | 1,2  | 0,6 | 0,8  | 0,4  |
| 18                                                   | 2,9   | 2,4    | 2,4    | 2,4    | 2,4    | 2,4    | 18                                                                       | 1,2  | 0,6 | 0,8  | 0,4  |
| 20                                                   | 0     | 97,7   | 105,8  | 98,8   | 99,8   | 101,2  | 20                                                                       | 8,3  | 1,2 | 2,1  | 3,6  |
| 20                                                   | 2,9   | 97,7   | 105,8  | 98,8   | 99,8   | 101,2  | 20                                                                       | 8,3  | 1,2 | 2,1  | 3,6  |
|                                                      |       |        |        |        |        |        | Máximos                                                                  | 32,6 | 1,6 | 31,2 | 47,2 |
|                                                      |       |        |        |        |        |        | Mínimos                                                                  | 0,7  | 0,4 | 0,6  | 0,3  |
|                                                      |       |        |        |        |        |        | Média                                                                    | 11,2 | 1,0 | 7,0  | 8,5  |

Fonte: do Autor

Figura 47 - Diagramas de Força Cortante (kN) nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos



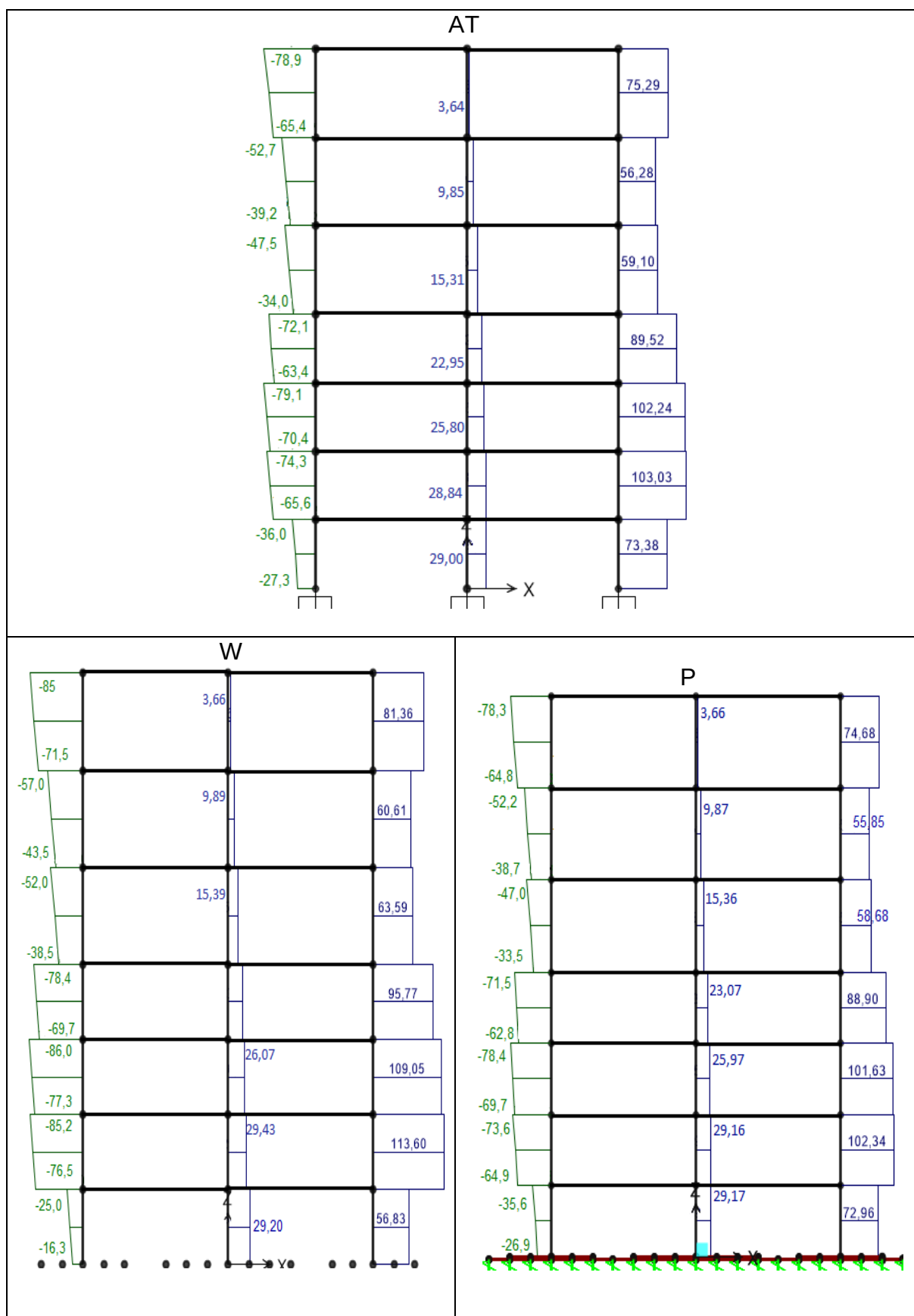
Fonte: do Autor

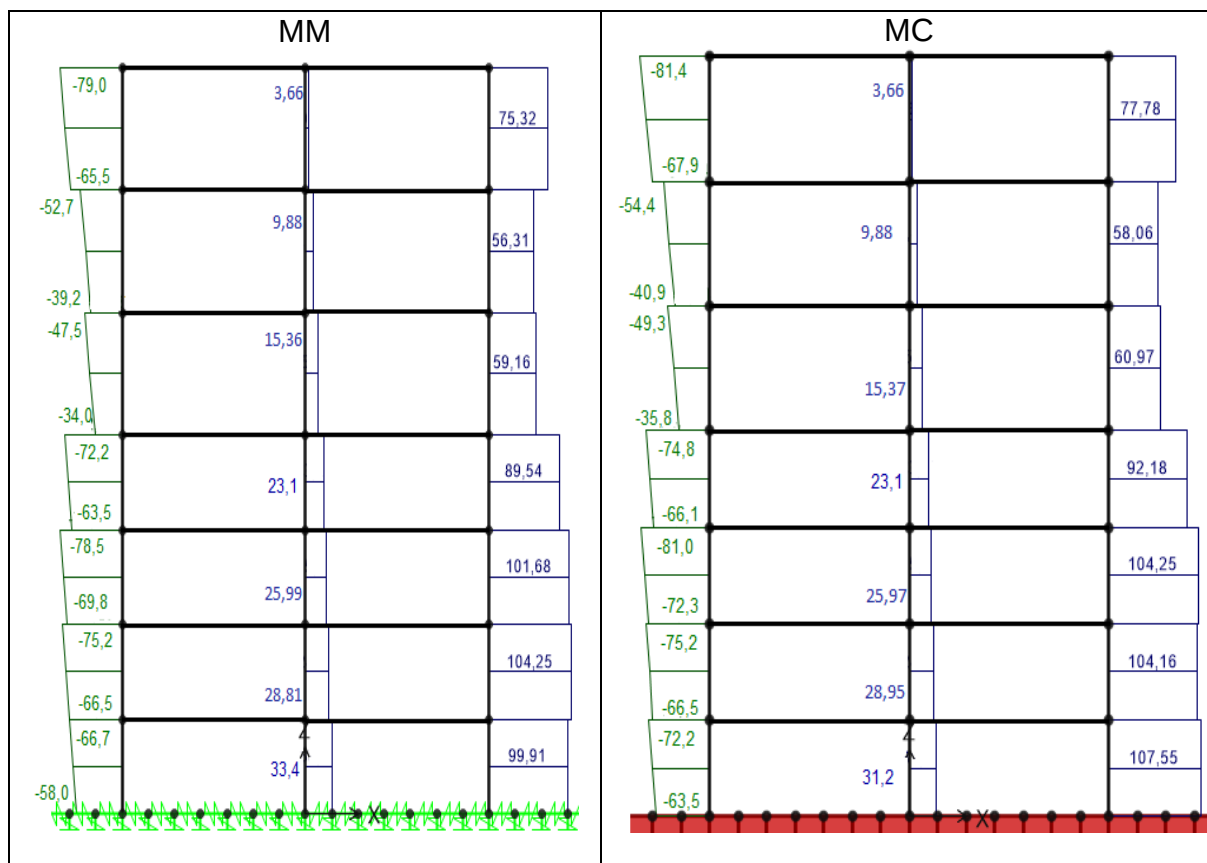
Tabela 33 - Força Cortante nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos

| Força cortante nos Pilares - Pórtico de 7 Pavimentos |       |       |       |       |       |       | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |      |     |       |       |
|------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------------------------------------------|------|-----|-------|-------|
| Pilares                                              | Coord | V-AT  | V-W   | V-P   | V-MM  | V-MC  | Pilares                                                                  | V-W  | V-P | V-MM  | V-MC  |
| Nº                                                   | m     | kN    | kN    | kN    | kN    | kN    | Nº                                                                       |      |     |       |       |
| 1                                                    | 0     | -27,3 | -16,3 | -26,9 | -58,0 | -63,5 | 1                                                                        | 40,1 | 1,6 | 112,7 | 132,7 |
| 1                                                    | 2,9   | -36,0 | -25,0 | -35,6 | -66,7 | -72,2 | 1                                                                        | 30,4 | 1,2 | 85,4  | 100,6 |
| 3                                                    | 0     | 29,0  | 34,8  | 29,2  | 33,4  | 31,2  | 3                                                                        | 19,9 | 0,6 | 15,2  | 7,7   |
| 3                                                    | 2,9   | 29,0  | 34,8  | 29,2  | 33,4  | 31,2  | 3                                                                        | 19,9 | 0,6 | 15,2  | 7,7   |
| 5                                                    | 0     | 73,4  | 56,8  | 73,0  | 99,9  | 107,6 | 5                                                                        | 22,6 | 0,6 | 36,1  | 46,6  |
| 5                                                    | 2,9   | 73,4  | 56,8  | 73,0  | 99,9  | 107,6 | 5                                                                        | 22,6 | 0,6 | 36,1  | 46,6  |
| 6                                                    | 0     | -65,6 | -76,5 | -64,9 | -66,5 | -66,5 | 6                                                                        | 16,6 | 1,0 | 1,4   | 1,4   |
| 6                                                    | 2,9   | -74,3 | -85,2 | -73,6 | -75,2 | -75,2 | 6                                                                        | 14,6 | 0,9 | 1,2   | 1,2   |
| 8                                                    | 0     | 28,8  | 29,4  | 29,2  | 28,8  | 28,9  | 8                                                                        | 2,1  | 1,1 | 0,1   | 0,4   |
| 8                                                    | 2,9   | 28,8  | 29,4  | 29,2  | 28,8  | 28,9  | 8                                                                        | 2,1  | 1,1 | 0,1   | 0,4   |
| 10                                                   | 0     | 103,0 | 113,6 | 102,3 | 104,2 | 104,2 | 10                                                                       | 10,3 | 0,7 | 1,2   | 1,1   |
| 10                                                   | 2,9   | 103,0 | 113,6 | 102,3 | 104,2 | 104,2 | 10                                                                       | 10,3 | 0,7 | 1,2   | 1,1   |
| 11                                                   | 0     | -70,4 | -77,3 | -69,7 | -69,8 | -72,3 | 11                                                                       | 9,7  | 1,0 | 0,9   | 2,7   |
| 11                                                   | 2,9   | -79,1 | -86,0 | -78,4 | -78,5 | -81,0 | 11                                                                       | 8,6  | 0,9 | 0,8   | 2,4   |
| 13                                                   | 0     | 25,8  | 26,1  | 26,0  | 26,0  | 26,0  | 13                                                                       | 1,1  | 0,7 | 0,8   | 0,7   |
| 13                                                   | 2,9   | 25,8  | 26,1  | 26,0  | 26,0  | 26,0  | 13                                                                       | 1,1  | 0,7 | 0,8   | 0,7   |
| 15                                                   | 0     | 102,2 | 109,1 | 101,6 | 101,7 | 104,3 | 15                                                                       | 6,7  | 0,6 | 0,6   | 2,0   |
| 15                                                   | 2,9   | 102,2 | 109,1 | 101,6 | 101,7 | 104,3 | 15                                                                       | 6,7  | 0,6 | 0,6   | 2,0   |
| 16                                                   | 0     | -63,4 | -69,7 | -62,8 | -63,5 | -66,1 | 16                                                                       | 9,9  | 1,0 | 0,0   | 4,1   |
| 16                                                   | 2,9   | -72,1 | -78,4 | -71,5 | -72,2 | -74,8 | 16                                                                       | 8,7  | 0,9 | 0,0   | 3,6   |
| 18                                                   | 0     | 23,0  | 23,1  | 23,1  | 23,1  | 23,1  | 18                                                                       | 0,8  | 0,5 | 0,6   | 0,5   |
| 18                                                   | 2,9   | 23,0  | 23,1  | 23,1  | 23,1  | 23,1  | 18                                                                       | 0,8  | 0,5 | 0,6   | 0,5   |
| 20                                                   | 0     | 89,5  | 95,8  | 88,9  | 89,5  | 92,2  | 20                                                                       | 7,0  | 0,7 | 0,0   | 3,0   |
| 20                                                   | 2,9   | 89,5  | 95,8  | 88,9  | 89,5  | 92,2  | 20                                                                       | 7,0  | 0,7 | 0,0   | 3,0   |
| 21                                                   | 0     | -34,0 | -38,5 | -33,5 | -34,0 | -35,8 | 21                                                                       | 13,1 | 1,4 | 0,0   | 5,4   |
| 21                                                   | 3,75  | -47,5 | -52,0 | -47,0 | -47,5 | -49,3 | 21                                                                       | 9,4  | 1,0 | 0,0   | 3,8   |
| 23                                                   | 0     | 15,3  | 15,4  | 15,4  | 15,4  | 15,4  | 23                                                                       | 0,5  | 0,3 | 0,3   | 0,4   |
| 23                                                   | 3,75  | 15,3  | 15,4  | 15,4  | 15,4  | 15,4  | 23                                                                       | 0,5  | 0,3 | 0,3   | 0,4   |
| 25                                                   | 0     | 59,1  | 63,6  | 58,7  | 59,2  | 61,0  | 25                                                                       | 7,6  | 0,7 | 0,1   | 3,2   |
| 25                                                   | 3,75  | 59,1  | 63,6  | 58,7  | 59,2  | 61,0  | 25                                                                       | 7,6  | 0,7 | 0,1   | 3,2   |
| 26                                                   | 0     | -39,2 | -43,5 | -38,7 | -39,2 | -40,9 | 26                                                                       | 11,1 | 1,1 | 0,0   | 4,5   |
| 26                                                   | 3,75  | -52,7 | -57,0 | -52,2 | -52,7 | -54,4 | 26                                                                       | 8,2  | 0,8 | 0,0   | 3,4   |
| 28                                                   | 0     | 9,8   | 9,9   | 9,9   | 9,9   | 9,9   | 28                                                                       | 0,4  | 0,3 | 0,3   | 0,3   |
| 28                                                   | 3,75  | 9,8   | 9,9   | 9,9   | 9,9   | 9,9   | 28                                                                       | 0,4  | 0,3 | 0,3   | 0,3   |
| 30                                                   | 0     | 56,3  | 60,6  | 55,9  | 56,3  | 58,1  | 30                                                                       | 7,7  | 0,8 | 0,0   | 3,2   |
| 30                                                   | 3,75  | 56,3  | 60,6  | 55,9  | 56,3  | 58,1  | 30                                                                       | 7,7  | 0,8 | 0,0   | 3,2   |
| 31                                                   | 0     | -65,4 | -71,5 | -64,8 | -65,5 | -67,9 | 31                                                                       | 9,3  | 0,9 | 0,1   | 3,8   |
| 31                                                   | 3,75  | -78,9 | -85,0 | -78,3 | -79,0 | -81,4 | 31                                                                       | 7,7  | 0,8 | 0,0   | 3,2   |
| 33                                                   | 0     | 3,6   | 3,7   | 3,7   | 3,7   | 3,7   | 33                                                                       | 0,5  | 0,4 | 0,5   | 0,4   |
| 33                                                   | 3,75  | 3,6   | 3,7   | 3,7   | 3,7   | 3,7   | 33                                                                       | 0,5  | 0,4 | 0,5   | 0,4   |
| 35                                                   | 0     | 75,3  | 81,4  | 74,7  | 75,3  | 77,8  | 35                                                                       | 8,1  | 0,8 | 0,0   | 3,3   |
| 35                                                   | 3,75  | 75,3  | 81,4  | 74,7  | 75,3  | 77,8  | 35                                                                       | 8,1  | 0,8 | 0,0   | 3,3   |
| Máximos                                              |       |       |       |       |       |       |                                                                          | 40,1 | 1,6 | 112,7 | 132,7 |
| Mínimos                                              |       |       |       |       |       |       |                                                                          | 0,4  | 0,3 | 0,0   | 0,3   |
| Média                                                |       |       |       |       |       |       |                                                                          | 9,2  | 0,8 | 7,5   | 10,0  |

Fonte: do Autor

Figura 48 - Diagramas de Força Cortante (kN) nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos





Fonte: do Autor

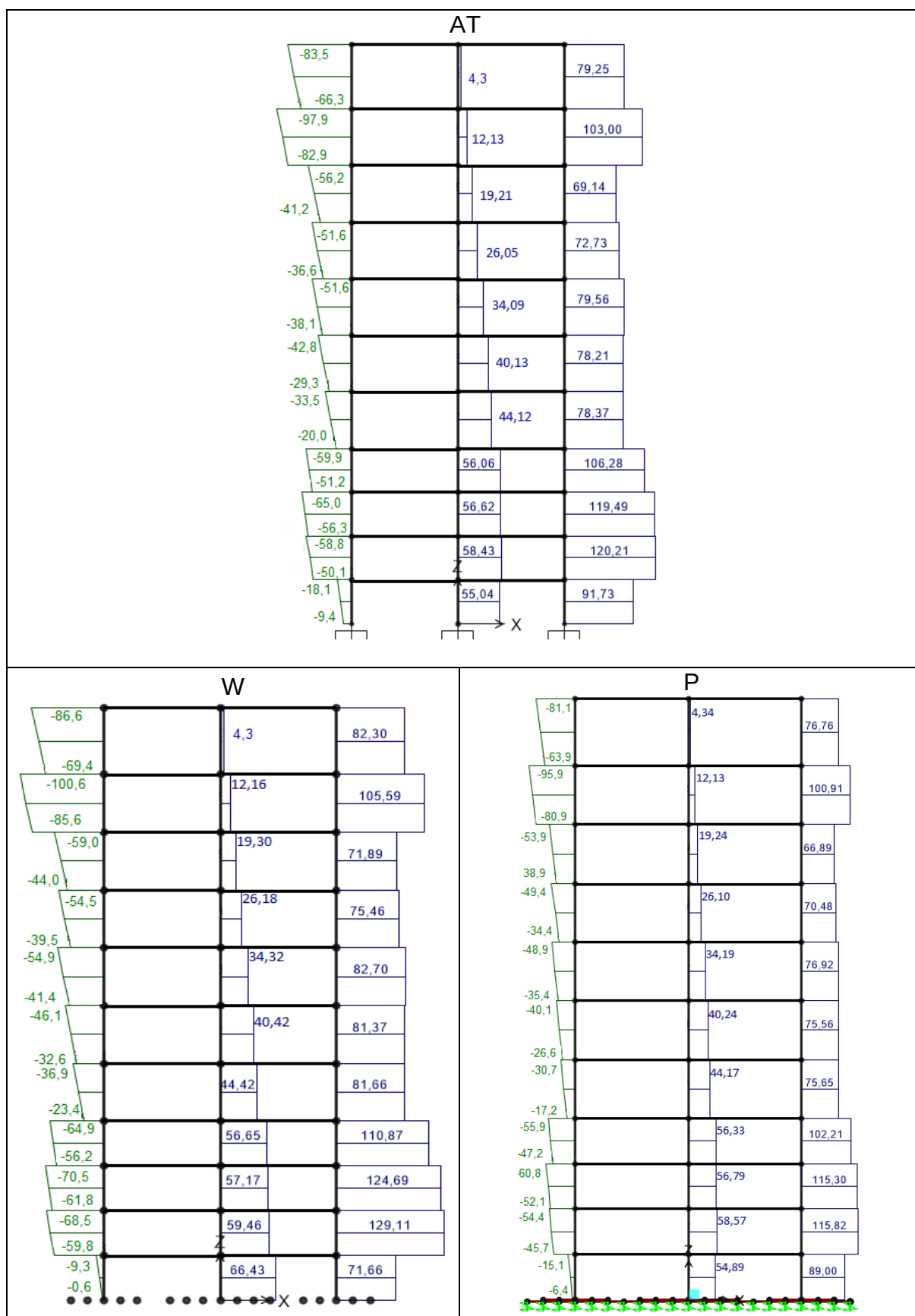
Tabela 34 - Força Cortante nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos

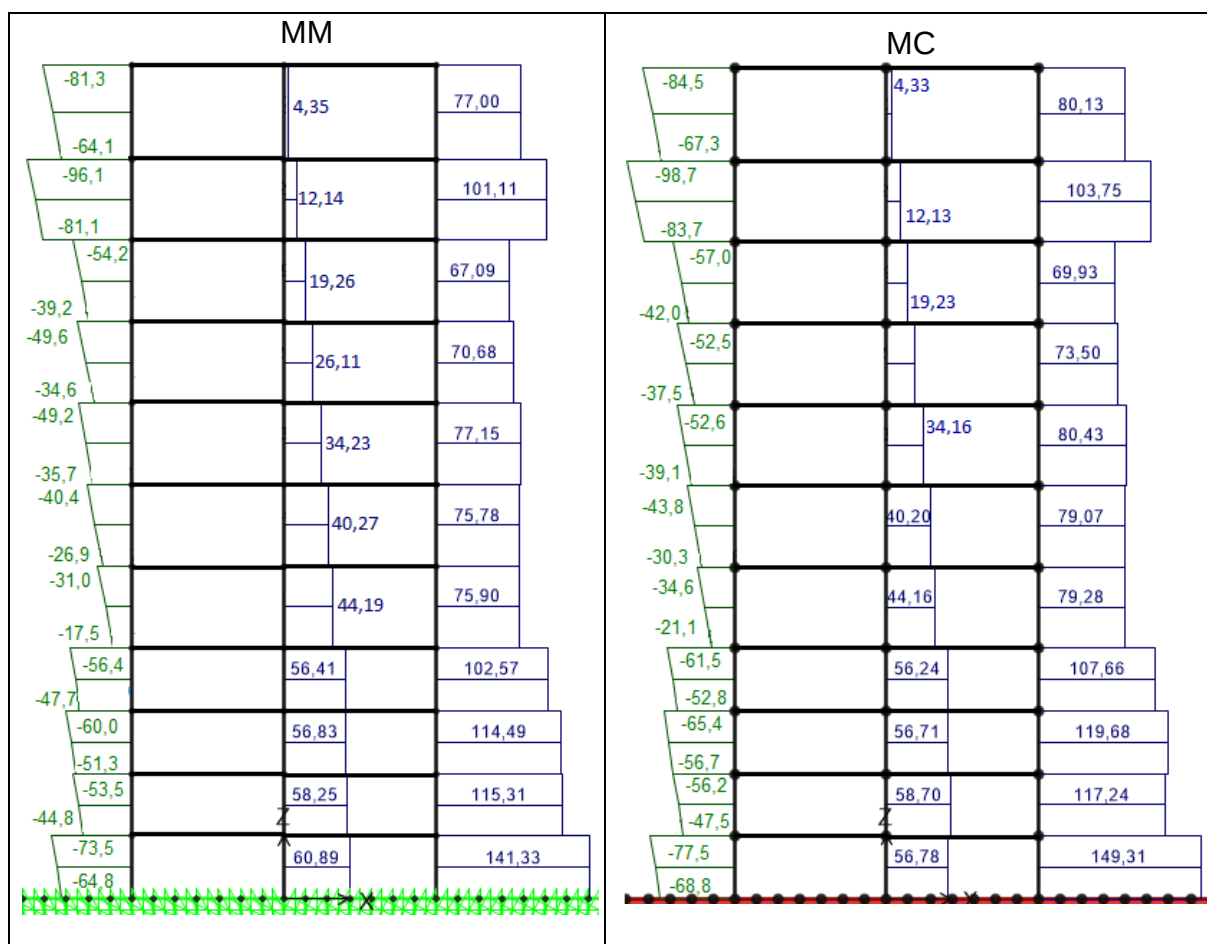
| Força cortante nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos |       |       |       |       |       |       | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |      |      |       |       |
|-------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------------------------------------------|------|------|-------|-------|
| Pilares                                               | Coord | V-AT  | V-W   | V-P   | V-MM  | V-MC  | Pilares                                                                  | V-W  | V-P  | V-MM  | V-MC  |
| Nº                                                    | m     | kN    | kN    | kN    | kN    | kN    | Nº                                                                       |      |      |       |       |
| 1                                                     | 0,0   | -9,4  | -0,6  | -6,4  | -64,8 | -68,8 | 1                                                                        | 93,2 | 31,6 | 589,4 | 632,3 |
| 1                                                     | 2,9   | -18,1 | -9,3  | -15,1 | -73,5 | -77,5 | 1                                                                        | 48,4 | 16,4 | 306,0 | 328,3 |
| 3                                                     | 0,0   | 55,0  | 66,4  | 54,9  | 60,9  | 56,8  | 3                                                                        | 20,7 | 0,3  | 10,6  | 3,1   |
| 3                                                     | 2,9   | 55,0  | 66,4  | 54,9  | 60,9  | 56,8  | 3                                                                        | 20,7 | 0,3  | 10,6  | 3,1   |
| 5                                                     | 0,0   | 91,7  | 71,7  | 89,0  | 141,3 | 149,3 | 5                                                                        | 21,9 | 3,0  | 54,1  | 62,8  |
| 5                                                     | 2,9   | 91,7  | 71,7  | 89,0  | 141,3 | 149,3 | 5                                                                        | 21,9 | 3,0  | 54,1  | 62,8  |
| 6                                                     | 0,0   | -50,1 | -59,8 | -45,7 | -44,8 | -47,5 | 6                                                                        | 19,5 | 8,9  | 10,5  | 5,1   |
| 6                                                     | 2,9   | -58,8 | -68,5 | -54,4 | -53,5 | -56,2 | 6                                                                        | 16,6 | 7,6  | 8,9   | 4,4   |
| 8                                                     | 0,0   | 58,4  | 59,5  | 58,6  | 58,3  | 58,7  | 8                                                                        | 1,8  | 0,2  | 0,3   | 0,5   |
| 8                                                     | 2,9   | 58,4  | 59,5  | 58,6  | 58,3  | 58,7  | 8                                                                        | 1,8  | 0,2  | 0,3   | 0,5   |
| 10                                                    | 0,0   | 120,2 | 129,1 | 115,8 | 115,3 | 117,2 | 10                                                                       | 7,4  | 3,7  | 4,1   | 2,5   |
| 10                                                    | 2,9   | 120,2 | 129,1 | 115,8 | 115,3 | 117,2 | 10                                                                       | 7,4  | 3,7  | 4,1   | 2,5   |
| 11                                                    | 0,0   | -56,3 | -61,8 | -52,1 | -51,3 | -56,7 | 11                                                                       | 9,9  | 7,5  | 8,8   | 0,7   |
| 11                                                    | 2,9   | -65,0 | -70,5 | -60,8 | -60,0 | -65,4 | 11                                                                       | 8,5  | 6,5  | 7,7   | 0,6   |
| 13                                                    | 0,0   | 56,6  | 57,2  | 56,8  | 56,8  | 56,7  | 13                                                                       | 1,0  | 0,3  | 0,4   | 0,1   |
| 13                                                    | 2,9   | 56,6  | 57,2  | 56,8  | 56,8  | 56,7  | 13                                                                       | 1,0  | 0,3  | 0,4   | 0,1   |
| 15                                                    | 0,0   | 119,5 | 124,7 | 115,3 | 114,5 | 119,7 | 15                                                                       | 4,3  | 3,5  | 4,2   | 0,2   |
| 15                                                    | 2,9   | 119,5 | 124,7 | 115,3 | 114,5 | 119,7 | 15                                                                       | 4,3  | 3,5  | 4,2   | 0,2   |

|         |     |       |        |       |       |       |    |      |      |       |       |
|---------|-----|-------|--------|-------|-------|-------|----|------|------|-------|-------|
| 16      | 0,0 | -51,2 | -56,2  | -47,2 | -47,7 | -52,8 | 16 | 9,8  | 7,8  | 6,9   | 3,2   |
| 16      | 2,9 | -59,9 | -64,9  | -55,9 | -56,4 | -61,5 | 16 | 8,3  | 6,7  | 5,9   | 2,8   |
| 18      | 0,0 | 56,1  | 56,7   | 56,3  | 56,4  | 56,2  | 18 | 1,1  | 0,5  | 0,6   | 0,3   |
| 18      | 2,9 | 56,1  | 56,7   | 56,3  | 56,4  | 56,2  | 18 | 1,1  | 0,5  | 0,6   | 0,3   |
| 20      | 0,0 | 106,3 | 110,9  | 102,2 | 102,6 | 107,7 | 20 | 4,3  | 3,8  | 3,5   | 1,3   |
| 20      | 2,9 | 106,3 | 110,9  | 102,2 | 102,6 | 107,7 | 20 | 4,3  | 3,8  | 3,5   | 1,3   |
| 21      | 0,0 | -20,0 | -23,4  | -17,2 | -17,5 | -21,1 | 21 | 17,0 | 14,2 | 12,8  | 5,2   |
| 21      | 3,8 | -33,5 | -36,9  | -30,7 | -31,0 | -34,6 | 21 | 10,1 | 8,5  | 7,7   | 3,1   |
| 23      | 0,0 | 44,1  | 44,4   | 44,2  | 44,2  | 44,2  | 23 | 0,7  | 0,1  | 0,2   | 0,1   |
| 23      | 3,8 | 44,1  | 44,4   | 44,2  | 44,2  | 44,2  | 23 | 0,7  | 0,1  | 0,2   | 0,1   |
| 25      | 0,0 | 78,4  | 81,7   | 75,7  | 75,9  | 79,3  | 25 | 4,2  | 3,5  | 3,1   | 1,2   |
| 25      | 3,8 | 78,4  | 81,7   | 75,7  | 75,9  | 79,3  | 25 | 4,2  | 3,5  | 3,1   | 1,2   |
| 26      | 0,0 | -29,3 | -32,6  | -26,6 | -26,9 | -30,3 | 26 | 11,3 | 9,1  | 8,2   | 3,4   |
| 26      | 3,8 | -42,8 | -46,1  | -40,1 | -40,4 | -43,8 | 26 | 7,7  | 6,2  | 5,6   | 2,4   |
| 28      | 0,0 | 40,1  | 40,4   | 40,2  | 40,3  | 40,2  | 28 | 0,7  | 0,3  | 0,4   | 0,2   |
| 28      | 3,8 | 40,1  | 40,4   | 40,2  | 40,3  | 40,2  | 28 | 0,7  | 0,3  | 0,4   | 0,2   |
| 30      | 0,0 | 78,2  | 81,4   | 75,6  | 75,8  | 79,1  | 30 | 4,0  | 3,4  | 3,1   | 1,1   |
| 30      | 3,8 | 78,2  | 81,4   | 75,6  | 75,8  | 79,1  | 30 | 4,0  | 3,4  | 3,1   | 1,1   |
| 31      | 0,0 | -38,1 | -41,4  | -35,4 | -35,7 | -39,1 | 31 | 8,6  | 6,9  | 6,2   | 2,6   |
| 31      | 3,8 | -51,6 | -54,9  | -48,9 | -49,2 | -52,6 | 31 | 6,4  | 5,1  | 4,6   | 1,9   |
| 33      | 0,0 | 34,1  | 34,3   | 34,2  | 34,2  | 34,2  | 33 | 0,7  | 0,3  | 0,4   | 0,2   |
| 33      | 3,8 | 34,1  | 34,3   | 34,2  | 34,2  | 34,2  | 33 | 0,7  | 0,3  | 0,4   | 0,2   |
| 35      | 0,0 | 79,6  | 82,7   | 76,9  | 77,1  | 80,4  | 35 | 3,9  | 3,3  | 3,0   | 1,1   |
| 35      | 3,8 | 79,6  | 82,7   | 76,9  | 77,1  | 80,4  | 35 | 3,9  | 3,3  | 3,0   | 1,1   |
| 36      | 0,0 | -36,6 | -39,5  | -34,4 | -34,6 | -37,5 | 36 | 7,7  | 6,1  | 5,5   | 2,3   |
| 36      | 3,8 | -51,6 | -54,5  | -49,4 | -49,6 | -52,5 | 36 | 5,5  | 4,3  | 3,9   | 1,6   |
| 38      | 0,0 | 26,1  | 26,2   | 26,1  | 26,1  | 26,1  | 38 | 0,5  | 0,2  | 0,2   | 0,1   |
| 38      | 3,8 | 26,1  | 26,2   | 26,1  | 26,1  | 26,1  | 38 | 0,5  | 0,2  | 0,2   | 0,1   |
| 40      | 0,0 | 72,7  | 75,5   | 70,5  | 70,7  | 73,5  | 40 | 3,8  | 3,1  | 2,8   | 1,1   |
| 40      | 3,8 | 72,7  | 75,5   | 70,5  | 70,7  | 73,5  | 40 | 3,8  | 3,1  | 2,8   | 1,1   |
| 41      | 0,0 | -41,2 | -44,0  | -38,9 | -39,2 | -42,0 | 41 | 6,9  | 5,4  | 4,9   | 2,0   |
| 41      | 3,8 | -56,2 | -59,0  | -53,9 | -54,2 | -57,0 | 41 | 5,0  | 4,0  | 3,6   | 1,5   |
| 43      | 0,0 | 19,2  | 19,3   | 19,2  | 19,3  | 19,2  | 43 | 0,5  | 0,2  | 0,3   | 0,1   |
| 43      | 3,8 | 19,2  | 19,3   | 19,2  | 19,3  | 19,2  | 43 | 0,5  | 0,2  | 0,3   | 0,1   |
| 45      | 0,0 | 69,1  | 71,9   | 66,9  | 67,1  | 69,9  | 45 | 4,0  | 3,3  | 3,0   | 1,1   |
| 45      | 3,8 | 69,1  | 71,9   | 66,9  | 67,1  | 69,9  | 45 | 4,0  | 3,3  | 3,0   | 1,1   |
| 46      | 0,0 | -82,9 | -85,6  | -80,9 | -81,1 | -83,7 | 46 | 3,2  | 2,5  | 2,3   | 0,9   |
| 46      | 3,8 | -97,9 | -100,6 | -95,9 | -96,1 | -98,7 | 46 | 2,7  | 2,1  | 1,9   | 0,8   |
| 48      | 0,0 | 12,1  | 12,2   | 12,1  | 12,1  | 12,1  | 48 | 0,3  | 0,1  | 0,1   | 0,0   |
| 48      | 3,8 | 12,1  | 12,2   | 12,1  | 12,1  | 12,1  | 48 | 0,3  | 0,1  | 0,1   | 0,0   |
| 50      | 0,0 | 103,0 | 105,6  | 100,9 | 101,1 | 103,8 | 50 | 2,5  | 2,0  | 1,8   | 0,7   |
| 50      | 3,8 | 103,0 | 105,6  | 100,9 | 101,1 | 103,8 | 50 | 2,5  | 2,0  | 1,8   | 0,7   |
| 51      | 0,0 | -66,3 | -69,4  | -63,9 | -64,1 | -67,3 | 51 | 4,7  | 3,7  | 3,3   | 1,4   |
| 51      | 4,3 | -83,5 | -86,6  | -81,1 | -81,3 | -84,5 | 51 | 3,7  | 2,9  | 2,6   | 1,1   |
| 53      | 0,0 | 4,3   | 4,3    | 4,3   | 4,4   | 4,3   | 53 | 1,2  | 1,0  | 1,3   | 0,7   |
| 53      | 4,3 | 4,3   | 4,3    | 4,3   | 4,4   | 4,3   | 53 | 1,2  | 1,0  | 1,3   | 0,7   |
| 55      | 0,0 | 79,2  | 82,3   | 76,8  | 77,0  | 80,1  | 55 | 3,8  | 3,1  | 2,8   | 1,1   |
| 55      | 4,3 | 79,2  | 82,3   | 76,8  | 77,0  | 80,1  | 55 | 3,8  | 3,1  | 2,8   | 1,1   |
| Máximos |     |       |        |       |       |       |    | 93,2 | 31,6 | 589,4 | 632,3 |
| Mínimos |     |       |        |       |       |       |    | 0,3  | 0,1  | 0,1   | 0,0   |
| Média   |     |       |        |       |       |       |    | 7,6  | 3,8  | 18,4  | 17,7  |

Fonte: do Autor

Figura 49 - Diagramas de Força Cortante (kN) nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos





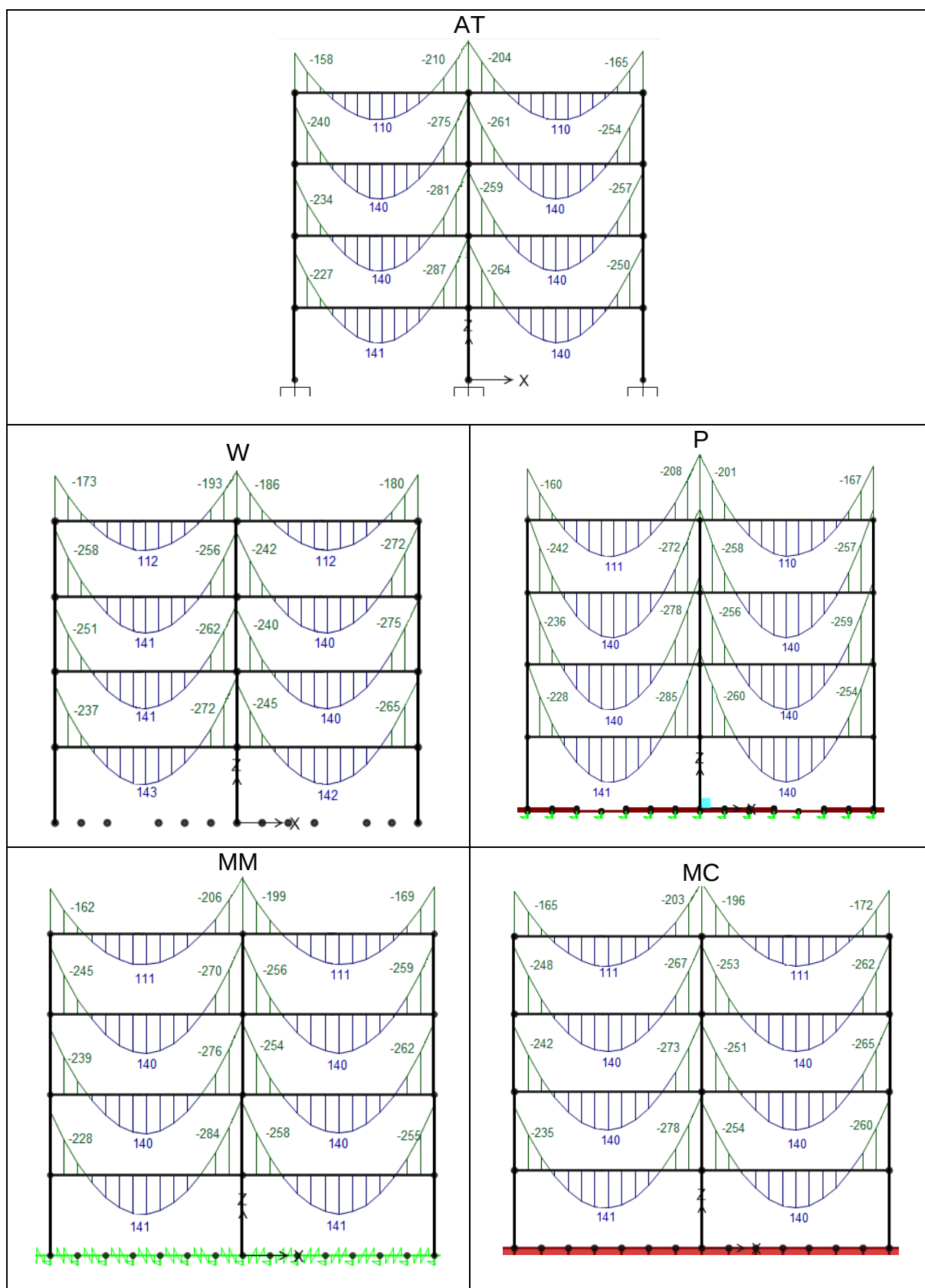
Fonte: do Autor

Tabela 35 - Momento Fletor nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos

| Momento Fletor nas Vigas - Pórtico de 4 Pavimentos |       |      |      |      |      |      | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |      |      |      |      |
|----------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|--------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| Vigas                                              | Coord | M-AT | M-W  | M-P  | M-MM | M-MC | Vigas                                                                    | M-W  | M-P  | M-MM | M-MC |
| Nº                                                 | m     | kNxm | kNxm | kNxm | kNxm | kNxm | Nº                                                                       |      |      |      |      |
| 2                                                  | 0     | -227 | -237 | -228 | -228 | -235 | 2                                                                        | 4,56 | 0,64 | 0,87 | 3,73 |
| 2                                                  | 3,5   | 141  | 143  | 141  | 141  | 141  | 2                                                                        | 1,40 | 0,08 | 0,32 | 0,10 |
| 2                                                  | 7     | -287 | -272 | -285 | -284 | -278 | 2                                                                        | 5,00 | 0,58 | 1,00 | 2,84 |
| 4                                                  | 0     | -264 | -245 | -260 | -258 | -254 | 4                                                                        | 7,09 | 1,40 | 2,19 | 3,60 |
| 4                                                  | 3,5   | 140  | 142  | 140  | 141  | 140  | 4                                                                        | 1,44 | 0,04 | 0,44 | 0,02 |
| 4                                                  | 7     | -250 | -265 | -254 | -255 | -260 | 4                                                                        | 5,83 | 1,42 | 1,82 | 3,83 |
| 7                                                  | 0     | -234 | -251 | -236 | -239 | -242 | 7                                                                        | 7,34 | 0,92 | 2,01 | 3,31 |
| 7                                                  | 3,5   | 140  | 141  | 140  | 140  | 140  | 7                                                                        | 0,38 | 0,06 | 0,03 | 0,10 |
| 7                                                  | 7     | -281 | -262 | -278 | -276 | -273 | 7                                                                        | 6,50 | 0,82 | 1,70 | 2,87 |
| 9                                                  | 0     | -259 | -240 | -256 | -254 | -251 | 9                                                                        | 7,56 | 1,15 | 2,16 | 3,25 |
| 9                                                  | 3,5   | 140  | 140  | 140  | 140  | 140  | 9                                                                        | 0,37 | 0,05 | 0,01 | 0,10 |
| 9                                                  | 7     | -257 | -275 | -259 | -262 | -265 | 9                                                                        | 7,24 | 1,11 | 2,17 | 3,18 |
| 12                                                 | 0     | -240 | -258 | -242 | -245 | -248 | 12                                                                       | 7,34 | 0,98 | 1,89 | 3,11 |
| 12                                                 | 3,5   | 140  | 141  | 140  | 140  | 140  | 12                                                                       | 0,34 | 0,05 | 0,09 | 0,16 |
| 12                                                 | 7     | -275 | -256 | -272 | -270 | -267 | 12                                                                       | 6,76 | 0,91 | 1,75 | 2,88 |
| 14                                                 | 0     | -261 | -242 | -258 | -256 | -253 | 14                                                                       | 7,28 | 1,05 | 1,95 | 3,09 |
| 14                                                 | 3,5   | 140  | 140  | 140  | 140  | 140  | 14                                                                       | 0,33 | 0,05 | 0,09 | 0,16 |
| 14                                                 | 7     | -254 | -272 | -257 | -259 | -262 | 14                                                                       | 7,12 | 1,03 | 1,91 | 3,00 |
| 17                                                 | 0     | -158 | -173 | -160 | -162 | -165 | 17                                                                       | 9,37 | 1,29 | 2,43 | 4,00 |
| 17                                                 | 3,5   | 110  | 112  | 111  | 111  | 111  | 17                                                                       | 1,09 | 0,15 | 0,29 | 0,47 |
| 17                                                 | 7     | -210 | -193 | -208 | -206 | -203 | 17                                                                       | 8,19 | 1,13 | 2,13 | 3,50 |
| 19                                                 | 0     | -204 | -186 | -201 | -199 | -196 | 19                                                                       | 8,54 | 1,21 | 2,26 | 3,64 |
| 19                                                 | 3,5   | 110  | 112  | 110  | 111  | 111  | 19                                                                       | 1,09 | 0,15 | 0,29 | 0,47 |
| 19                                                 | 7     | -165 | -180 | -167 | -169 | -172 | 19                                                                       | 9,10 | 1,30 | 2,41 | 3,88 |
| Máximos                                            |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 9,37 | 1,42 | 2,43 | 4,00 |
| Mínimos                                            |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 0,33 | 0,04 | 0,01 | 0,02 |
| Média                                              |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 5,05 | 0,73 | 1,34 | 2,30 |

Fonte: do Autor

Figura 50 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos



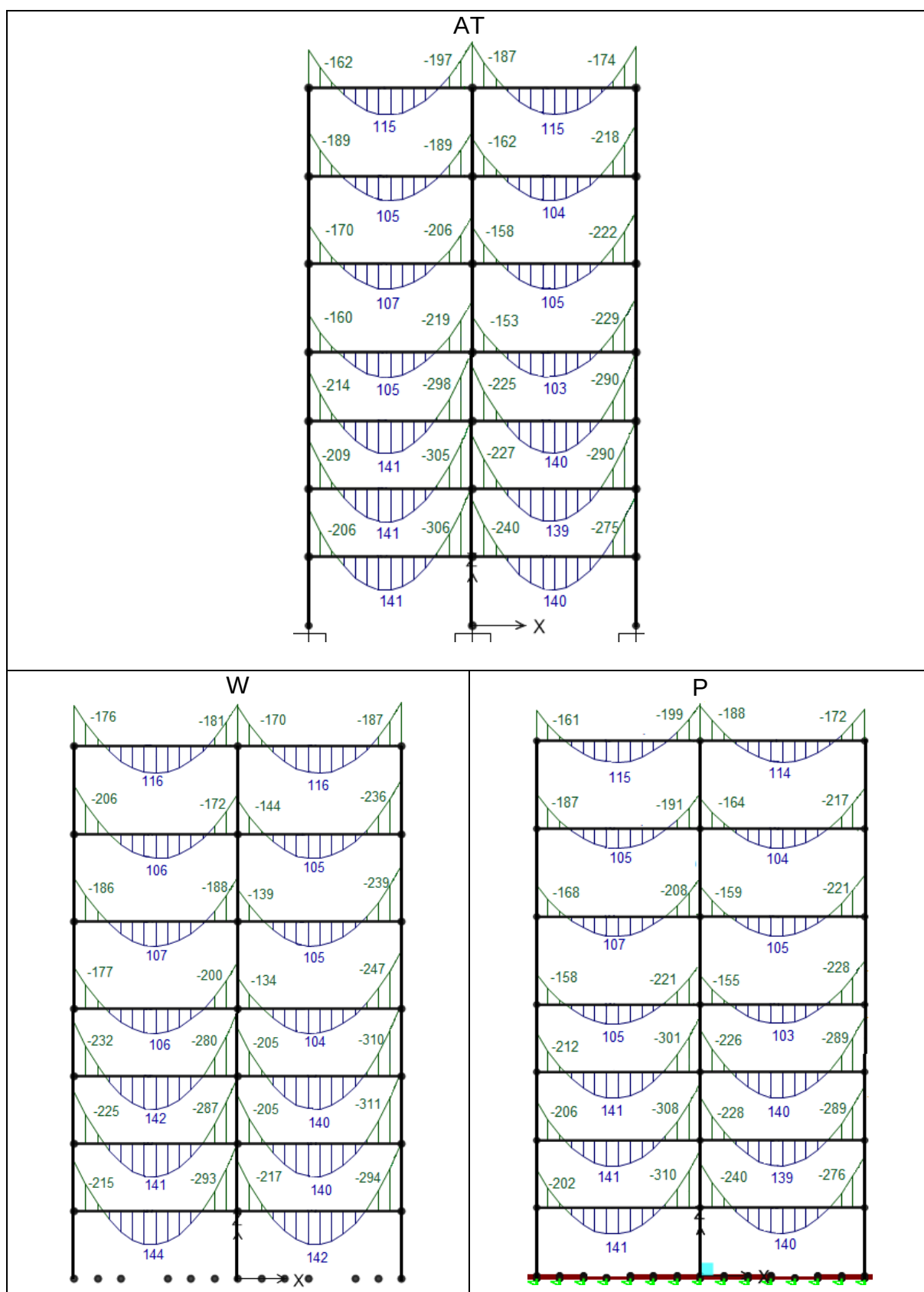
Fonte: do Autor

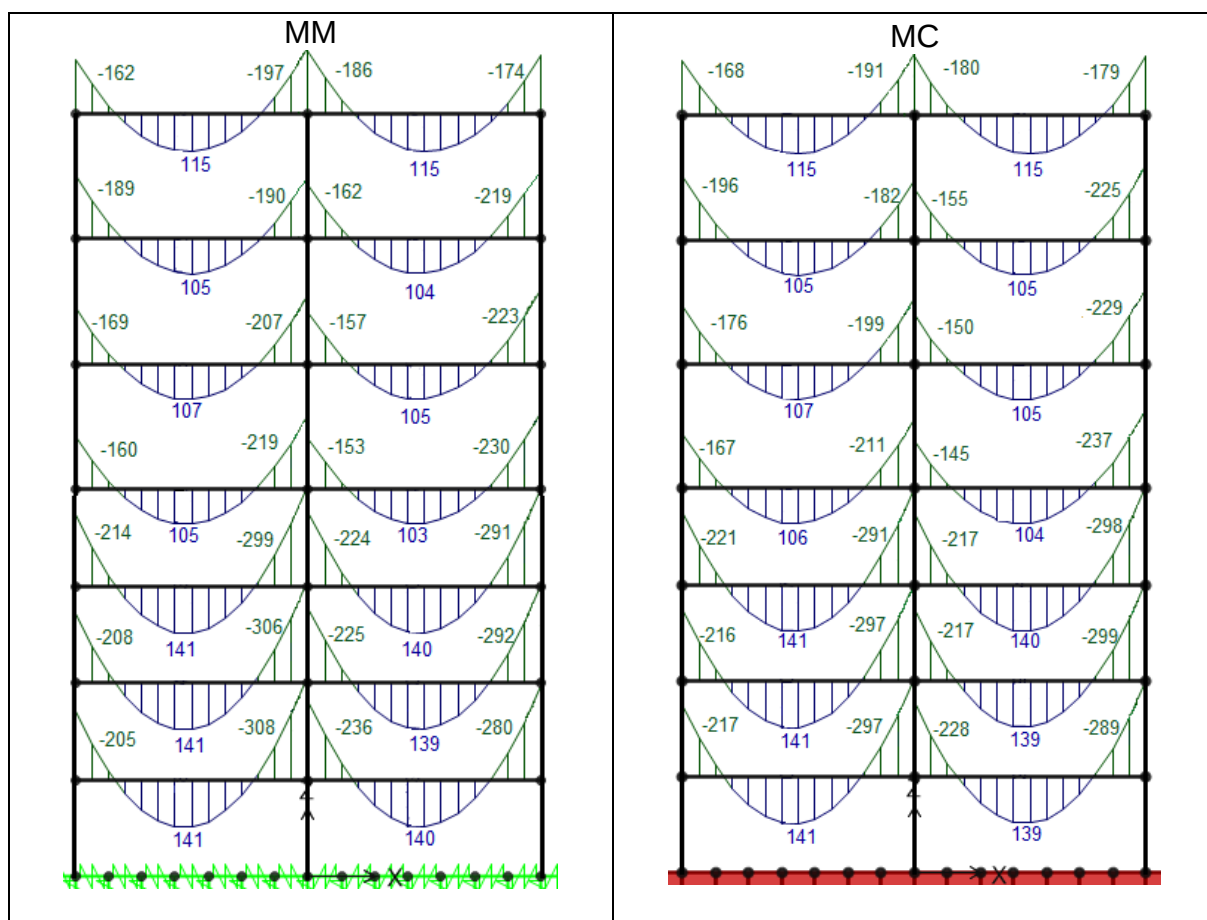
Tabela 36 - Momento Fletor (kNxm) nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos

| Momento Fletor nas Vigas - Pórtico de 7 Pavimentos |       |      |      |      |      |      | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |       |      |      |      |
|----------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|--------------------------------------------------------------------------|-------|------|------|------|
| Vigas                                              | Coord | M-AT | M-W  | M-P  | M-MM | M-MC | Vigas                                                                    | M-W   | M-P  | M-MM | M-MC |
| Nº                                                 | m     | kNxm | kNxm | kNxm | kNxm | kNxm | Nº                                                                       |       |      |      |      |
| 2                                                  | 0     | -206 | -215 | -202 | -205 | -217 | 2                                                                        | 4,12  | 2,01 | 0,56 | 5,39 |
| 2                                                  | 3,5   | 141  | 144  | 141  | 141  | 141  | 2                                                                        | 1,49  | 0,01 | 0,33 | 0,67 |
| 2                                                  | 7     | -306 | -293 | -310 | -308 | -297 | 2                                                                        | 4,16  | 1,36 | 0,70 | 3,00 |
| 4                                                  | 0     | -240 | -217 | -240 | -236 | -228 | 4                                                                        | 9,61  | 0,03 | 1,57 | 5,01 |
| 4                                                  | 3,5   | 140  | 142  | 140  | 140  | 139  | 4                                                                        | 1,46  | 0,08 | 0,19 | 0,62 |
| 4                                                  | 7     | -275 | -294 | -276 | -280 | -289 | 4                                                                        | 6,86  | 0,11 | 1,57 | 5,01 |
| 7                                                  | 0     | -209 | -225 | -206 | -208 | -216 | 7                                                                        | 8,04  | 1,45 | 0,29 | 3,58 |
| 7                                                  | 3,5   | 141  | 141  | 141  | 141  | 141  | 7                                                                        | 0,42  | 0,03 | 0,11 | 0,08 |
| 7                                                  | 7     | -305 | -287 | -308 | -306 | -297 | 7                                                                        | 5,89  | 1,02 | 0,30 | 2,52 |
| 9                                                  | 0     | -227 | -205 | -228 | -225 | -217 | 9                                                                        | 9,72  | 0,39 | 0,79 | 4,05 |
| 9                                                  | 3,5   | 139  | 140  | 139  | 139  | 139  | 9                                                                        | 0,39  | 0,05 | 0,15 | 0,06 |
| 9                                                  | 7     | -290 | -311 | -289 | -292 | -299 | 9                                                                        | 7,23  | 0,25 | 0,76 | 3,11 |
| 12                                                 | 0     | -214 | -232 | -212 | -214 | -221 | 12                                                                       | 8,14  | 1,18 | 0,37 | 3,21 |
| 12                                                 | 3,5   | 141  | 142  | 141  | 141  | 141  | 12                                                                       | 0,38  | 0,03 | 0,02 | 0,18 |
| 12                                                 | 7     | -298 | -280 | -301 | -299 | -291 | 12                                                                       | 6,21  | 0,88 | 0,25 | 2,48 |
| 14                                                 | 0     | -225 | -205 | -226 | -224 | -217 | 14                                                                       | 9,10  | 0,56 | 0,40 | 3,73 |
| 14                                                 | 3,5   | 140  | 140  | 140  | 140  | 140  | 14                                                                       | 0,36  | 0,05 | 0,00 | 0,17 |
| 14                                                 | 7     | -290 | -310 | -289 | -291 | -298 | 14                                                                       | 6,70  | 0,39 | 0,31 | 2,73 |
| 17                                                 | 0     | -160 | -177 | -158 | -160 | -167 | 17                                                                       | 10,67 | 1,42 | 0,33 | 4,28 |
| 17                                                 | 3,5   | 105  | 106  | 105  | 105  | 106  | 17                                                                       | 0,58  | 0,04 | 0,02 | 0,24 |
| 17                                                 | 7     | -219 | -200 | -221 | -219 | -211 | 17                                                                       | 8,36  | 1,08 | 0,22 | 3,37 |
| 19                                                 | 0     | -153 | -134 | -155 | -153 | -145 | 19                                                                       | 12,70 | 0,91 | 0,44 | 5,28 |
| 19                                                 | 3,5   | 103  | 104  | 103  | 103  | 104  | 19                                                                       | 0,56  | 0,07 | 0,01 | 0,23 |
| 19                                                 | 7     | -229 | -247 | -228 | -230 | -237 | 19                                                                       | 7,99  | 0,55 | 0,30 | 3,32 |
| 22                                                 | 0     | -170 | -186 | -168 | -169 | -176 | 22                                                                       | 9,76  | 1,20 | 0,19 | 3,94 |
| 22                                                 | 3,5   | 107  | 107  | 107  | 107  | 107  | 22                                                                       | 0,62  | 0,05 | 0,02 | 0,26 |
| 22                                                 | 7     | -206 | -188 | -208 | -207 | -199 | 22                                                                       | 8,66  | 1,04 | 0,14 | 3,50 |
| 24                                                 | 0     | -158 | -139 | -159 | -157 | -150 | 24                                                                       | 11,79 | 0,95 | 0,31 | 4,89 |
| 24                                                 | 3,5   | 105  | 105  | 105  | 105  | 105  | 24                                                                       | 0,60  | 0,07 | 0,01 | 0,24 |
| 24                                                 | 7     | -222 | -239 | -221 | -223 | -229 | 24                                                                       | 7,79  | 0,60 | 0,23 | 3,24 |
| 27                                                 | 0     | -189 | -206 | -187 | -189 | -196 | 27                                                                       | 8,85  | 1,00 | 0,08 | 3,59 |
| 27                                                 | 3,5   | 105  | 106  | 105  | 105  | 105  | 27                                                                       | 0,53  | 0,05 | 0,01 | 0,22 |
| 27                                                 | 7     | -189 | -172 | -191 | -190 | -182 | 27                                                                       | 9,42  | 1,05 | 0,07 | 3,83 |
| 29                                                 | 0     | -162 | -144 | -164 | -162 | -155 | 29                                                                       | 11,25 | 0,99 | 0,20 | 4,64 |
| 29                                                 | 3,5   | 104  | 105  | 104  | 104  | 105  | 29                                                                       | 0,52  | 0,06 | 0,00 | 0,21 |
| 29                                                 | 7     | -218 | -236 | -217 | -219 | -225 | 29                                                                       | 7,86  | 0,68 | 0,15 | 3,25 |
| 32                                                 | 0     | -162 | -176 | -161 | -162 | -168 | 32                                                                       | 8,34  | 0,90 | 0,03 | 3,40 |
| 32                                                 | 3,5   | 115  | 116  | 115  | 115  | 115  | 32                                                                       | 1,19  | 0,11 | 0,01 | 0,49 |
| 32                                                 | 7     | -197 | -181 | -199 | -197 | -191 | 32                                                                       | 8,24  | 0,87 | 0,01 | 3,36 |
| 34                                                 | 0     | -187 | -170 | -188 | -186 | -180 | 34                                                                       | 8,81  | 0,83 | 0,10 | 3,62 |
| 34                                                 | 3,5   | 115  | 116  | 114  | 115  | 115  | 34                                                                       | 1,18  | 0,12 | 0,00 | 0,48 |
| 34                                                 | 7     | -174 | -187 | -172 | -174 | -179 | 34                                                                       | 7,92  | 0,73 | 0,11 | 3,26 |
| Máximos                                            |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 12,70 | 2,01 | 1,57 | 5,39 |
| Mínimos                                            |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 0,36  | 0,01 | 0,00 | 0,06 |
| Média                                              |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 5,82  | 0,60 | 0,28 | 2,59 |

Fonte: do Autor

Figura 51 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos





Fonte: do Autor

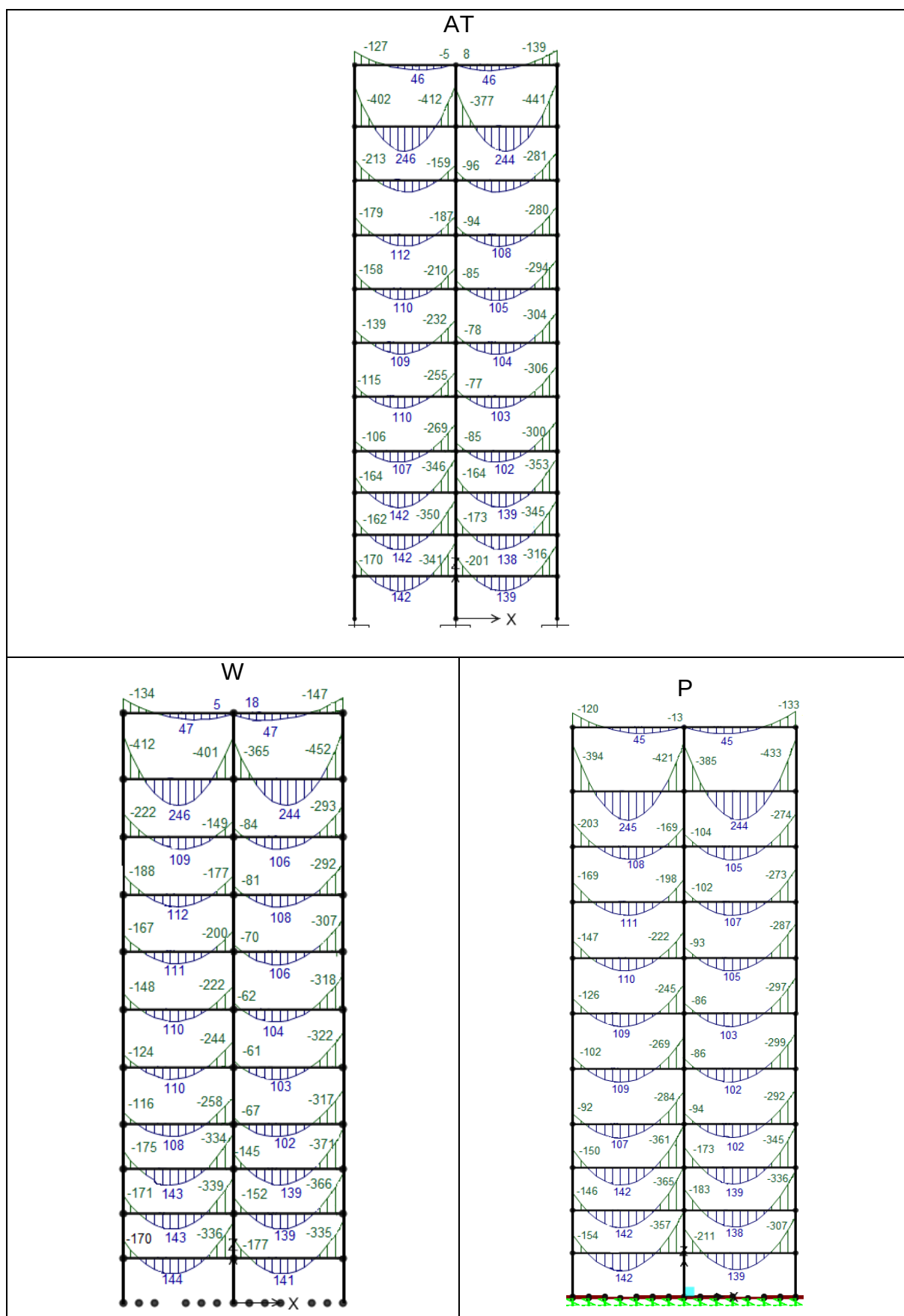
Tabela 37 - Momento Fletor nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos

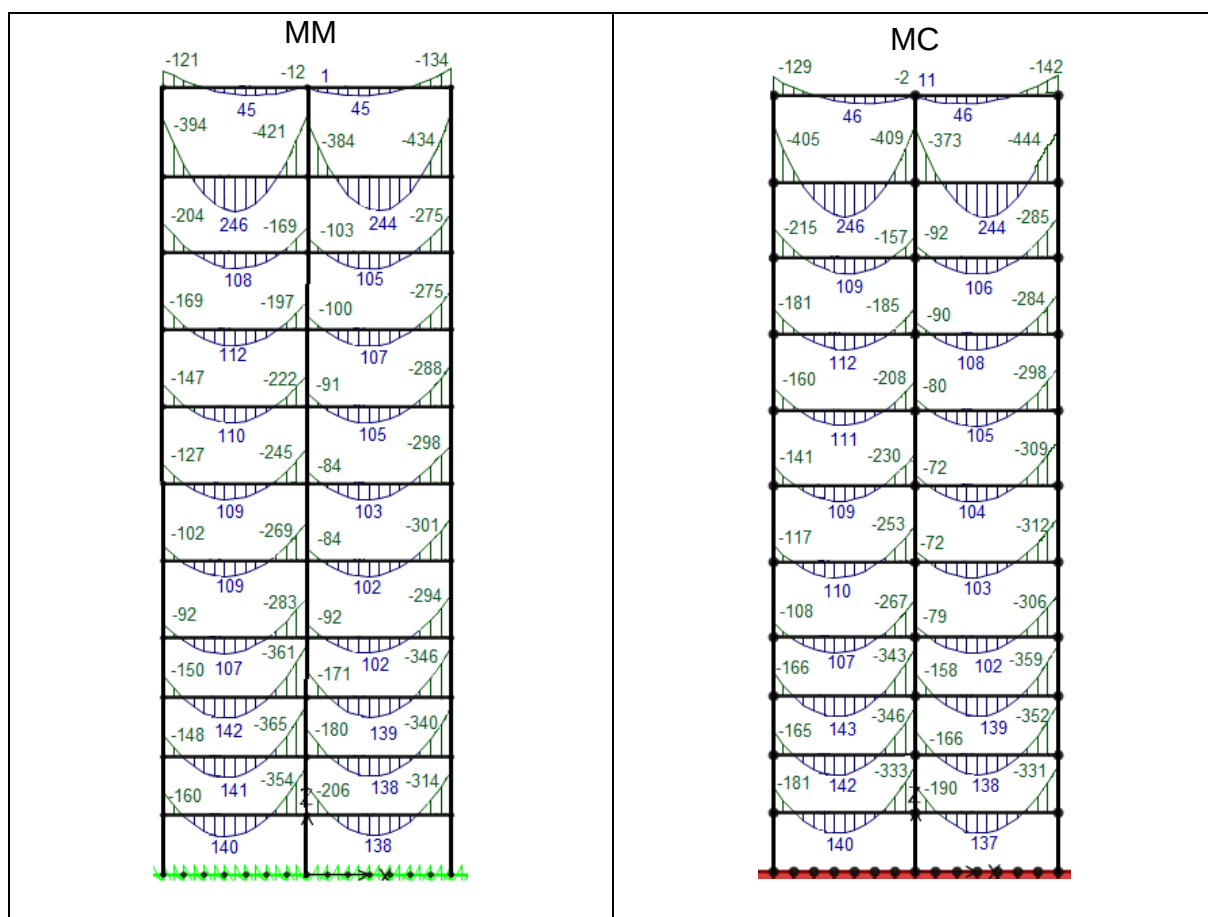
| Momento Fletor nas Vigas - Pórtico de 11 Pavimentos |         |           |          |          |           |           | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |       |       |       |      |
|-----------------------------------------------------|---------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|------|
| Vigas Nº                                            | Coord m | M-AT kNxm | M-W kNxm | M-P kNxm | M-MM kNxm | M-MC kNxm | Vigas Nº                                                                 | M-W   | M-P   | M-MM  | M-MC |
| 2                                                   | 0       | -170      | -170     | -154     | -160      | -181      | 2                                                                        | 0,25  | 9,26  | 5,61  | 6,91 |
| 2                                                   | 3,5     | 142       | 144      | 142      | 140       | 140       | 2                                                                        | 1,42  | 0,25  | 1,37  | 1,48 |
| 2                                                   | 7       | -341      | -336     | -357     | -354      | -333      | 2                                                                        | 1,33  | 4,83  | 3,97  | 2,18 |
| 4                                                   | 0       | -201      | -177     | -211     | -206      | -190      | 4                                                                        | 11,67 | 5,04  | 2,48  | 5,52 |
| 4                                                   | 3,5     | 139       | 141      | 139      | 138       | 137       | 4                                                                        | 1,34  | 0,36  | 1,27  | 1,62 |
| 4                                                   | 7       | -316      | -335     | -307     | -314      | -331      | 4                                                                        | 6,22  | 2,89  | 0,44  | 4,96 |
| 7                                                   | 0       | -162      | -171     | -146     | -148      | -165      | 7                                                                        | 5,96  | 9,49  | 8,65  | 1,96 |
| 7                                                   | 3,5     | 142       | 143      | 142      | 141       | 142       | 7                                                                        | 0,36  | 0,21  | 0,37  | 0,03 |
| 7                                                   | 7       | -350      | -339     | -365     | -365      | -346      | 7                                                                        | 3,05  | 4,56  | 4,29  | 0,88 |
| 9                                                   | 0       | -173      | -152     | -183     | -180      | -166      | 9                                                                        | 12,27 | 5,53  | 4,05  | 4,05 |
| 9                                                   | 3,5     | 138       | 139      | 138      | 138       | 138       | 9                                                                        | 0,27  | 0,31  | 0,49  | 0,07 |
| 9                                                   | 7       | -345      | -366     | -336     | -340      | -352      | 9                                                                        | 5,93  | 2,52  | 1,64  | 2,09 |
| 12                                                  | 0       | -164      | -175     | -150     | -150      | -166      | 12                                                                       | 6,48  | 8,90  | 8,79  | 1,29 |
| 12                                                  | 3,5     | 142       | 143      | 142      | 142       | 143       | 12                                                                       | 0,33  | 0,20  | 0,14  | 0,15 |
| 12                                                  | 7       | -346      | -334     | -361     | -361      | -343      | 12                                                                       | 3,35  | 4,39  | 4,29  | 0,74 |
| 14                                                  | 0       | -164      | -145     | -173     | -171      | -158      | 14                                                                       | 11,60 | 5,61  | 4,48  | 3,78 |
| 14                                                  | 3,5     | 139       | 139      | 139      | 139       | 139       | 14                                                                       | 0,24  | 0,29  | 0,25  | 0,10 |
| 14                                                  | 7       | -353      | -371     | -345     | -346      | -359      | 14                                                                       | 5,20  | 2,38  | 1,88  | 1,67 |
| 17                                                  | 0       | -106      | -116     | -92      | -92       | -108      | 17                                                                       | 9,72  | 13,21 | 12,96 | 2,02 |
| 17                                                  | 3,5     | 107       | 108      | 107      | 107       | 107       | 17                                                                       | 0,51  | 0,27  | 0,22  | 0,17 |
| 17                                                  | 7       | -269      | -258     | -284     | -283      | -267      | 17                                                                       | 4,22  | 5,40  | 5,26  | 0,93 |

|         |     |      |      |      |      |      |    |        |        |        |       |
|---------|-----|------|------|------|------|------|----|--------|--------|--------|-------|
| 19      | 0   | -85  | -67  | -94  | -92  | -79  | 19 | 20,95  | 10,33  | 8,16   | 7,10  |
| 19      | 3,5 | 102  | 102  | 102  | 102  | 102  | 19 | 0,37   | 0,44   | 0,42   | 0,09  |
| 19      | 7   | -300 | -317 | -292 | -294 | -306 | 19 | 5,66   | 2,62   | 2,02   | 1,94  |
| 22      | 0   | -115 | -124 | -102 | -102 | -117 | 22 | 8,37   | 11,39  | 11,18  | 1,69  |
| 22      | 3,5 | 110  | 110  | 109  | 109  | 110  | 22 | 0,54   | 0,26   | 0,20   | 0,18  |
| 22      | 7   | -255 | -244 | -269 | -269 | -253 | 22 | 4,22   | 5,34   | 5,20   | 0,92  |
| 24      | 0   | -77  | -61  | -86  | -84  | -72  | 24 | 21,33  | 10,58  | 8,33   | 7,32  |
| 24      | 3,5 | 103  | 103  | 102  | 102  | 103  | 24 | 0,37   | 0,48   | 0,47   | 0,08  |
| 24      | 7   | -306 | -322 | -299 | -301 | -312 | 24 | 5,15   | 2,35   | 1,79   | 1,80  |
| 27      | 0   | -139 | -148 | -126 | -127 | -141 | 27 | 6,83   | 8,77   | 8,56   | 1,44  |
| 27      | 3,5 | 109  | 110  | 109  | 109  | 109  | 27 | 0,49   | 0,26   | 0,21   | 0,17  |
| 27      | 7   | -232 | -222 | -245 | -245 | -230 | 27 | 4,53   | 5,47   | 5,30   | 1,01  |
| 29      | 0   | -78  | -62  | -86  | -84  | -72  | 29 | 19,79  | 10,32  | 8,27   | 6,75  |
| 29      | 3,5 | 104  | 104  | 103  | 103  | 104  | 29 | 0,35   | 0,43   | 0,41   | 0,08  |
| 29      | 7   | -304 | -318 | -297 | -298 | -309 | 29 | 4,82   | 2,35   | 1,83   | 1,67  |
| 32      | 0   | -158 | -167 | -147 | -147 | -160 | 32 | 5,83   | 7,03   | 6,81   | 1,29  |
| 32      | 3,5 | 110  | 111  | 110  | 110  | 111  | 32 | 0,51   | 0,28   | 0,23   | 0,17  |
| 32      | 7   | -210 | -200 | -222 | -222 | -208 | 32 | 4,91   | 5,57   | 5,35   | 1,15  |
| 34      | 0   | -85  | -70  | -93  | -91  | -80  | 34 | 16,83  | 9,37   | 7,68   | 5,66  |
| 34      | 3,5 | 105  | 106  | 105  | 105  | 105  | 34 | 0,39   | 0,44   | 0,42   | 0,09  |
| 34      | 7   | -294 | -307 | -287 | -288 | -298 | 34 | 4,57   | 2,38   | 1,91   | 1,57  |
| 37      | 0   | -179 | -188 | -169 | -169 | -181 | 37 | 5,03   | 5,61   | 5,38   | 1,19  |
| 37      | 3,5 | 112  | 112  | 111  | 112  | 112  | 37 | 0,52   | 0,31   | 0,26   | 0,17  |
| 37      | 7   | -187 | -177 | -198 | -197 | -185 | 37 | 5,43   | 5,73   | 5,45   | 1,34  |
| 39      | 0   | -94  | -81  | -102 | -100 | -90  | 39 | 13,95  | 8,39   | 7,04   | 4,60  |
| 39      | 3,5 | 108  | 108  | 107  | 107  | 108  | 39 | 0,42   | 0,45   | 0,42   | 0,10  |
| 39      | 7   | -280 | -292 | -273 | -275 | -284 | 39 | 4,35   | 2,47   | 2,03   | 1,46  |
| 42      | 0   | -213 | -222 | -203 | -204 | -215 | 42 | 4,29   | 4,36   | 4,12   | 1,08  |
| 42      | 3,5 | 109  | 109  | 108  | 108  | 109  | 42 | 0,50   | 0,33   | 0,28   | 0,16  |
| 42      | 7   | -159 | -149 | -169 | -169 | -157 | 42 | 6,41   | 6,26   | 5,88   | 1,67  |
| 44      | 0   | -96  | -84  | -104 | -103 | -92  | 44 | 12,75  | 8,31   | 7,14   | 4,09  |
| 44      | 3,5 | 106  | 106  | 105  | 105  | 106  | 44 | 0,43   | 0,42   | 0,39   | 0,11  |
| 44      | 7   | -281 | -293 | -274 | -275 | -285 | 44 | 4,03   | 2,53   | 2,14   | 1,32  |
| 47      | 0   | -402 | -412 | -394 | -394 | -405 | 47 | 2,39   | 2,17   | 2,01   | 0,65  |
| 47      | 3,5 | 246  | 246  | 245  | 246  | 246  | 47 | 0,18   | 0,13   | 0,12   | 0,06  |
| 47      | 7   | -412 | -401 | -421 | -421 | -409 | 47 | 2,56   | 2,27   | 2,10   | 0,71  |
| 49      | 0   | -377 | -365 | -385 | -384 | -373 | 49 | 3,08   | 2,21   | 1,95   | 0,95  |
| 49      | 3,5 | 244  | 244  | 244  | 244  | 244  | 49 | 0,17   | 0,15   | 0,14   | 0,05  |
| 49      | 7   | -441 | -452 | -433 | -434 | -444 | 49 | 2,44   | 1,72   | 1,51   | 0,76  |
| 52      | 0   | -127 | -134 | -120 | -121 | -129 | 52 | 5,99   | 5,03   | 4,59   | 1,71  |
| 52      | 3,5 | 46   | 47   | 45   | 45   | 46   | 52 | 2,27   | 1,77   | 1,60   | 0,67  |
| 52      | 7   | -5   | 5    | -13  | -12  | -2   | 52 | 203,19 | 168,21 | 153,11 | 58,52 |
| 54      | 0   | 8    | 18   | 0    | 1    | 11   | 54 | 127,01 | 98,15  | 87,99  | 37,93 |
| 54      | 3,5 | 46   | 47   | 45   | 45   | 46   | 54 | 2,23   | 1,83   | 1,66   | 0,65  |
| 54      | 7   | -139 | -147 | -133 | -134 | -142 | 54 | 5,68   | 4,33   | 3,87   | 1,71  |
| Máximos |     |      |      |      |      |      |    | 203,19 | 168,21 | 153,11 | 58,52 |
| Mínimos |     |      |      |      |      |      |    | 0,17   | 0,13   | 0,12   | 0,03  |
| Média   |     |      |      |      |      |      |    | 9,76   | 7,81   | 6,95   | 3,13  |

Fonte: do Autor

Figura 52 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos





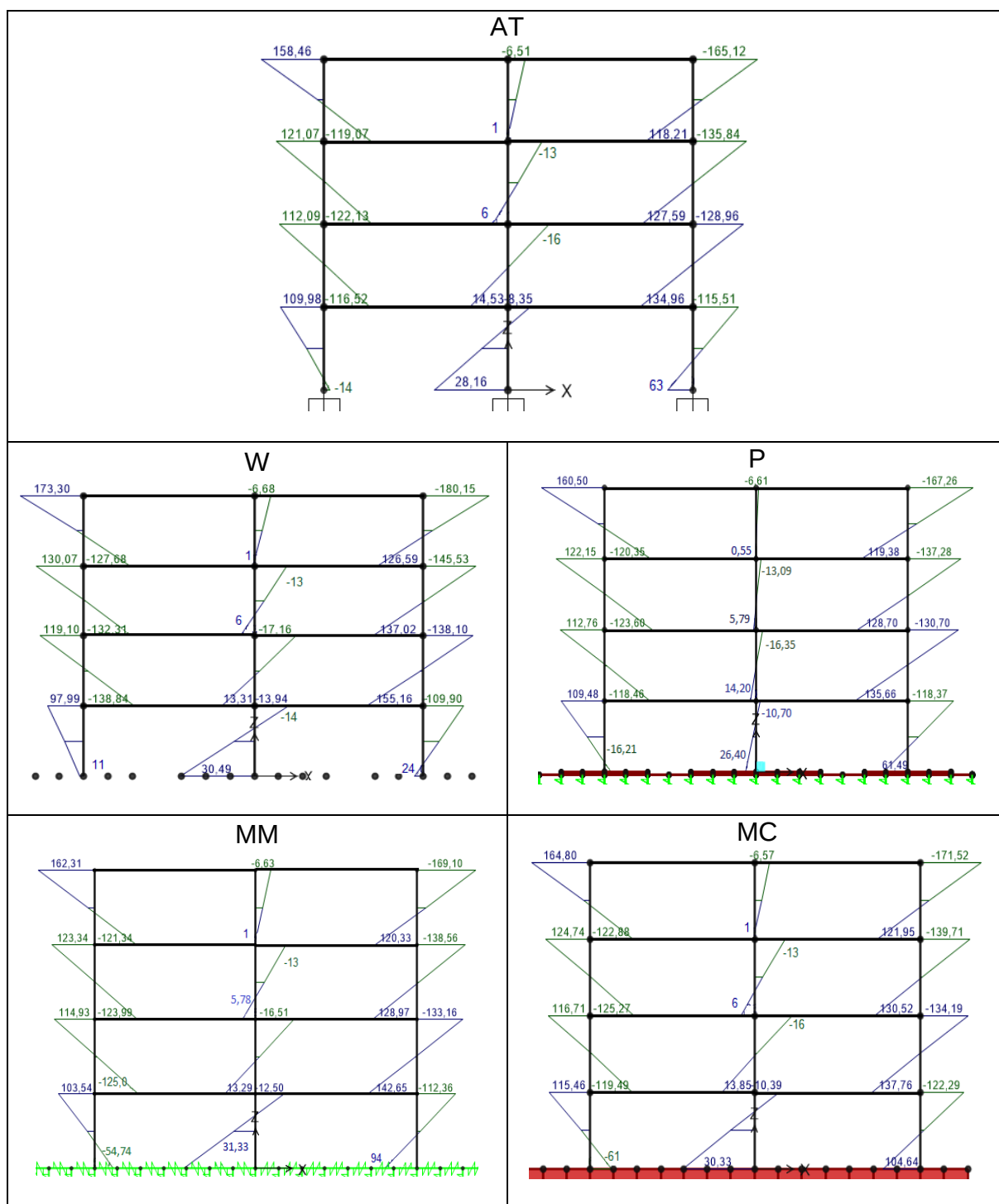
Fonte: do Autor

Tabela 38 - Momento Fletor nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos

| Momento Fletor nos Pilares - Pórtico de 4 Pavimentos |       |      |      |      |      |      | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |        |       |        |        |
|------------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|--------------------------------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|
| Pilares                                              | Coord | M-AT | M-W  | M-P  | M-MM | M-MC | Pilares                                                                  | M-W    | M-P   | M-MM   | M-MC   |
| Nº                                                   | m     | kNxm | kNxm | kNxm | kNxm | kNxm | Nº                                                                       |        |       |        |        |
| 1                                                    | 0     | -14  | 11   | -16  | -55  | -61  | 1                                                                        | 179,58 | 14,42 | 286,45 | 332,03 |
| 1                                                    | 2,9   | 110  | 98   | 109  | 104  | 115  | 1                                                                        | 10,91  | 0,45  | 5,86   | 4,98   |
| 3                                                    | 0     | 28   | 30   | 26   | 31   | 30   | 3                                                                        | 8,26   | 6,26  | 11,25  | 7,68   |
| 3                                                    | 2,9   | -8   | -14  | -11  | -13  | -10  | 3                                                                        | 67,01  | 28,13 | 49,76  | 24,49  |
| 5                                                    | 0     | 63   | 24   | 61   | 94   | 105  | 5                                                                        | 61,57  | 1,91  | 49,17  | 66,92  |
| 5                                                    | 2,9   | -116 | -110 | -118 | -112 | -122 | 5                                                                        | 4,86   | 2,48  | 2,73   | 5,87   |
| 6                                                    | 0     | -117 | -139 | -118 | -125 | -119 | 6                                                                        | 19,16  | 1,67  | 7,22   | 2,55   |
| 6                                                    | 2,9   | 112  | 119  | 113  | 115  | 117  | 6                                                                        | 6,26   | 0,61  | 2,53   | 4,12   |
| 8                                                    | 0     | 15   | 13   | 14   | 13   | 14   | 8                                                                        | 8,44   | 2,28  | 8,52   | 4,69   |
| 8                                                    | 2,9   | -16  | -17  | -16  | -17  | -16  | 8                                                                        | 10,38  | 5,15  | 6,16   | 2,71   |
| 10                                                   | 0     | 135  | 155  | 136  | 143  | 138  | 10                                                                       | 14,97  | 0,52  | 5,70   | 2,08   |
| 10                                                   | 2,9   | -129 | -138 | -131 | -133 | -134 | 10                                                                       | 7,09   | 1,35  | 3,26   | 4,06   |
| 11                                                   | 0     | -122 | -132 | -124 | -124 | -125 | 11                                                                       | 8,34   | 1,20  | 1,52   | 2,57   |
| 11                                                   | 2,9   | 121  | 130  | 122  | 123  | 125  | 11                                                                       | 7,44   | 0,89  | 1,87   | 3,03   |
| 13                                                   | 0     | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 13                                                                       | 4,76   | 2,02  | 2,13   | 0,79   |
| 13                                                   | 2,9   | -13  | -13  | -13  | -13  | -13  | 13                                                                       | 3,95   | 2,10  | 2,57   | 1,17   |
| 15                                                   | 0     | 128  | 137  | 129  | 129  | 131  | 15                                                                       | 7,39   | 0,87  | 1,08   | 2,29   |
| 15                                                   | 2,9   | -136 | -146 | -137 | -139 | -140 | 15                                                                       | 7,14   | 1,06  | 2,00   | 2,85   |
| 16                                                   | 0     | -119 | -128 | -120 | -121 | -123 | 16                                                                       | 7,24   | 1,08  | 1,91   | 3,20   |
| 16                                                   | 2,9   | 158  | 173  | 160  | 162  | 165  | 16                                                                       | 9,37   | 1,29  | 2,43   | 4,00   |
| 18                                                   | 0     | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 18                                                                       | 11,17  | 5,21  | 5,71   | 2,22   |
| 18                                                   | 2,9   | -7   | -7   | -7   | -7   | -7   | 18                                                                       | 2,67   | 1,50  | 1,87   | 0,89   |
| 20                                                   | 0     | 118  | 127  | 119  | 120  | 122  | 20                                                                       | 7,09   | 0,99  | 1,80   | 3,17   |
| 20                                                   | 2,9   | -165 | -180 | -167 | -169 | -172 | 20                                                                       | 9,10   | 1,30  | 2,41   | 3,88   |
| Máximos                                              |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 179,58 | 28,13 | 286,45 | 332,03 |
| Mínimos                                              |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 2,67   | 0,45  | 1,08   | 0,79   |
| Média                                                |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 20,17  | 3,53  | 19,41  | 20,51  |

Fonte: do Autor

*Figura 53 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos*



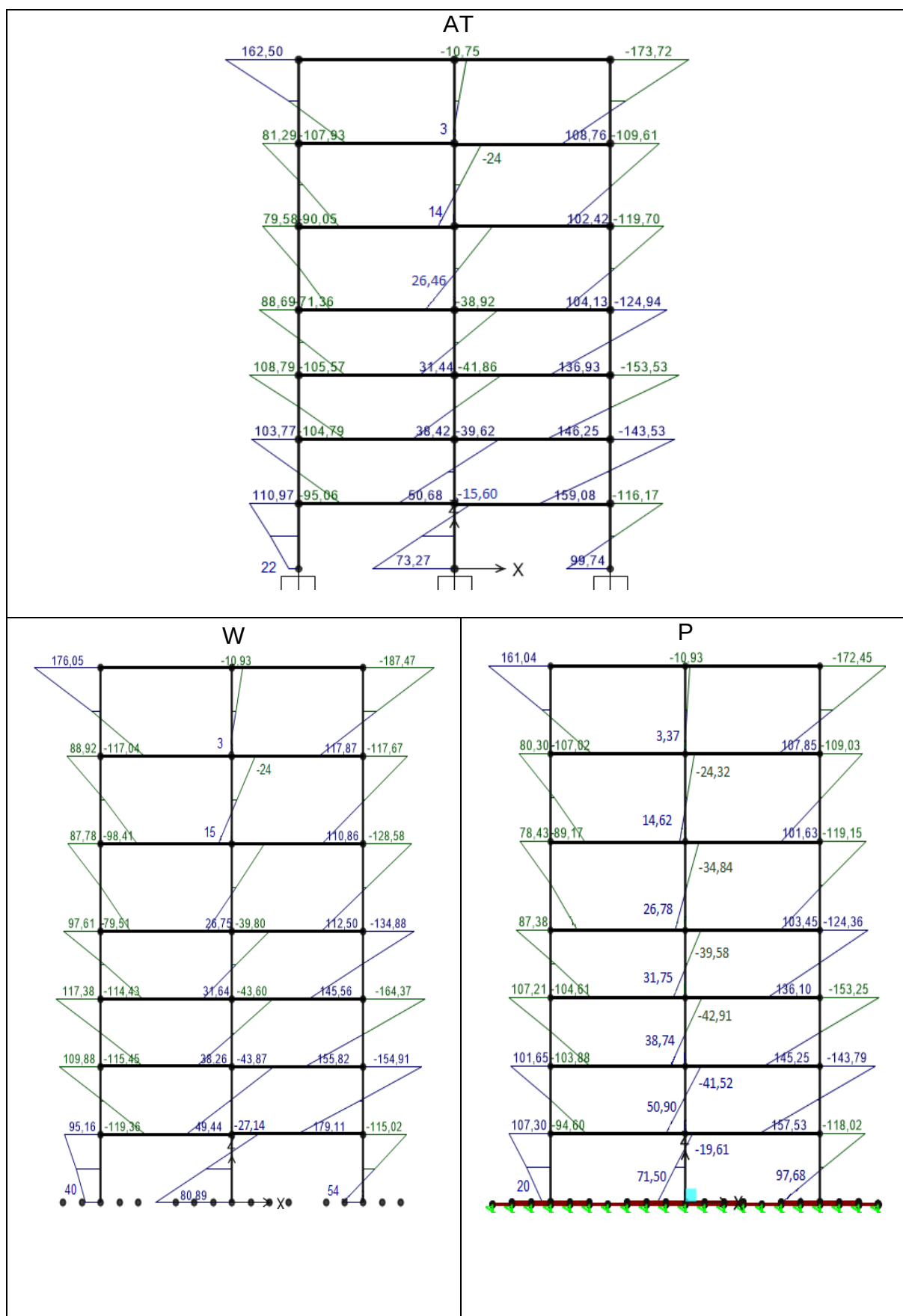
Fonte: do Autor

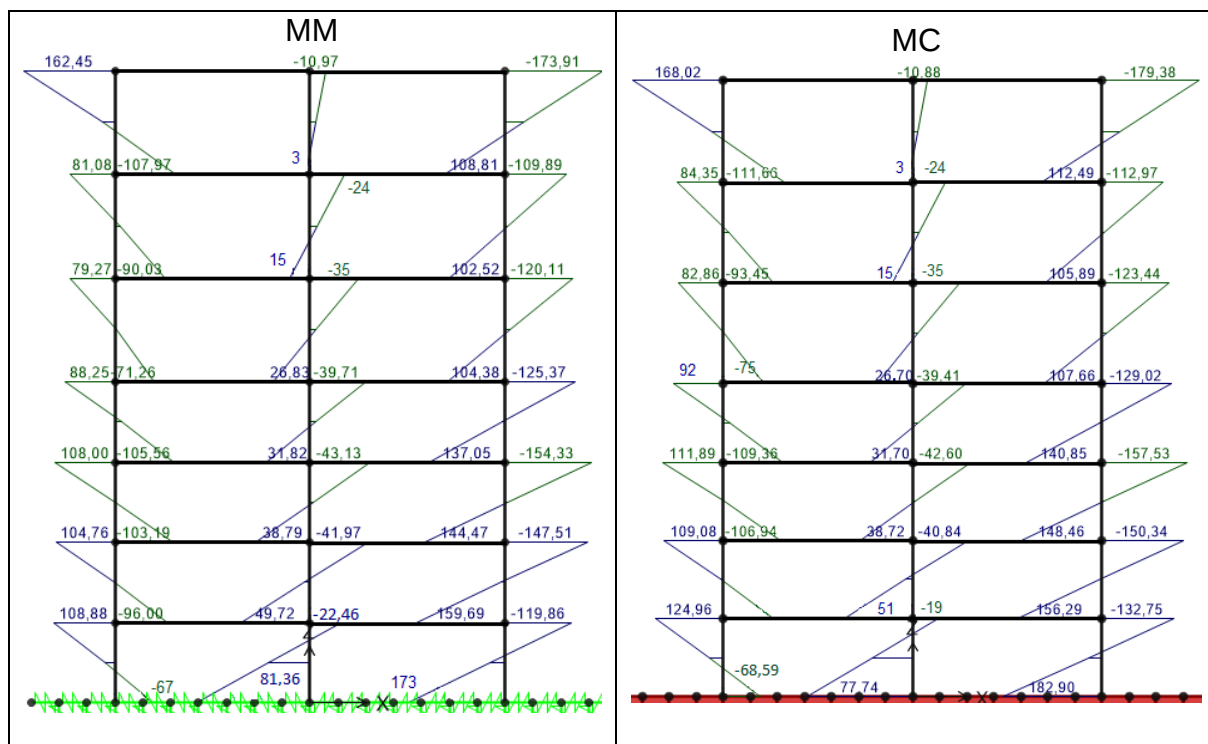
Tabela 39 - Momento Fletor nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos

| Momento Fletor nos Pilares - Pórtico de 7 Pavimentos |       |      |      |      |      |      | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |       |       |        |        |
|------------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| Pilares                                              | Coord | M-AT | M-W  | M-P  | M-MM | M-MC | Pilares                                                                  | M-W   | M-P   | M-MM   | M-MC   |
| Nº                                                   | m     | kNxm | kNxm | kNxm | kNxm | kNxm | Nº                                                                       |       |       |        |        |
| 1                                                    | 0     | 22   | 40   | 20   | -67  | -69  | 1                                                                        | 86,40 | 6,54  | 410,95 | 416,40 |
| 1                                                    | 2,9   | 111  | 95   | 107  | 109  | 125  | 1                                                                        | 14,24 | 3,30  | 1,88   | 12,61  |
| 3                                                    | 0     | 73   | 81   | 72   | 81   | 78   | 3                                                                        | 10,40 | 2,40  | 11,04  | 6,10   |
| 3                                                    | 2,9   | -16  | -27  | -20  | -22  | -19  | 3                                                                        | 73,93 | 25,70 | 43,93  | 19,39  |
| 5                                                    | 0     | 100  | 54   | 98   | 173  | 183  | 5                                                                        | 46,27 | 2,07  | 73,75  | 83,38  |
| 5                                                    | 2,9   | -116 | -115 | -118 | -120 | -133 | 5                                                                        | 0,99  | 1,59  | 3,18   | 14,27  |
| 6                                                    | 0     | -95  | -119 | -95  | -96  | -92  | 6                                                                        | 25,56 | 0,49  | 0,99   | 3,02   |
| 6                                                    | 2,9   | 104  | 110  | 102  | 105  | 109  | 6                                                                        | 5,89  | 2,04  | 0,95   | 5,12   |
| 8                                                    | 0     | 51   | 49   | 51   | 50   | 51   | 8                                                                        | 2,46  | 0,42  | 1,90   | 0,36   |
| 8                                                    | 2,9   | -40  | -44  | -42  | -42  | -41  | 8                                                                        | 10,73 | 4,79  | 5,92   | 3,07   |
| 10                                                   | 0     | 159  | 179  | 158  | 160  | 156  | 10                                                                       | 12,59 | 0,98  | 0,38   | 1,75   |
| 10                                                   | 2,9   | -144 | -155 | -144 | -148 | -150 | 10                                                                       | 7,93  | 0,18  | 2,77   | 4,74   |
| 11                                                   | 0     | -105 | -115 | -104 | -103 | -107 | 11                                                                       | 10,18 | 0,87  | 1,52   | 2,05   |
| 11                                                   | 2,9   | 109  | 117  | 107  | 108  | 112  | 11                                                                       | 7,89  | 1,45  | 0,73   | 2,84   |
| 13                                                   | 0     | 38   | 38   | 39   | 39   | 39   | 13                                                                       | 0,42  | 0,83  | 0,94   | 0,76   |
| 13                                                   | 2,9   | -42  | -44  | -43  | -43  | -43  | 13                                                                       | 4,17  | 2,52  | 3,03   | 1,76   |
| 15                                                   | 0     | 146  | 156  | 145  | 144  | 148  | 15                                                                       | 6,55  | 0,68  | 1,21   | 1,51   |
| 15                                                   | 2,9   | -154 | -164 | -153 | -154 | -158 | 15                                                                       | 7,06  | 0,18  | 0,52   | 2,61   |
| 16                                                   | 0     | -106 | -114 | -105 | -106 | -109 | 16                                                                       | 8,39  | 0,91  | 0,01   | 3,59   |
| 16                                                   | 2,9   | 89   | 98   | 87   | 88   | 92   | 16                                                                       | 10,06 | 1,47  | 0,49   | 4,01   |
| 18                                                   | 0     | 31   | 32   | 32   | 32   | 32   | 18                                                                       | 0,67  | 1,01  | 1,21   | 0,83   |
| 18                                                   | 2,9   | -39  | -40  | -40  | -40  | -39  | 18                                                                       | 2,28  | 1,71  | 2,04   | 1,26   |
| 20                                                   | 0     | 137  | 146  | 136  | 137  | 141  | 20                                                                       | 6,30  | 0,61  | 0,09   | 2,86   |
| 20                                                   | 2,9   | -125 | -135 | -124 | -125 | -129 | 20                                                                       | 7,96  | 0,46  | 0,35   | 3,27   |
| 21                                                   | 0     | -71  | -80  | -70  | -71  | -75  | 21                                                                       | 11,43 | 1,36  | 0,14   | 4,62   |
| 21                                                   | 3,75  | 80   | 88   | 78   | 79   | 83   | 21                                                                       | 10,30 | 1,45  | 0,39   | 4,12   |
| 23                                                   | 0     | 26   | 27   | 27   | 27   | 27   | 23                                                                       | 1,11  | 1,19  | 1,41   | 0,90   |
| 23                                                   | 3,75  | -34  | -35  | -35  | -35  | -35  | 23                                                                       | 1,52  | 1,37  | 1,63   | 1,04   |
| 25                                                   | 0     | 104  | 113  | 103  | 104  | 108  | 25                                                                       | 8,04  | 0,65  | 0,24   | 3,39   |
| 25                                                   | 3,75  | -120 | -129 | -119 | -120 | -123 | 25                                                                       | 7,42  | 0,46  | 0,34   | 3,12   |
| 26                                                   | 0     | -90  | -98  | -89  | -90  | -93  | 26                                                                       | 9,29  | 0,98  | 0,02   | 3,78   |
| 26                                                   | 3,75  | 81   | 89   | 80   | 81   | 84   | 26                                                                       | 9,39  | 1,21  | 0,25   | 3,76   |
| 28                                                   | 0     | 14   | 15   | 15   | 15   | 15   | 28                                                                       | 1,26  | 1,28  | 1,56   | 0,93   |
| 28                                                   | 3,75  | -24  | -24  | -24  | -24  | -24  | 28                                                                       | 1,33  | 1,27  | 1,53   | 0,95   |
| 30                                                   | 0     | 102  | 111  | 102  | 103  | 106  | 30                                                                       | 8,24  | 0,77  | 0,10   | 3,38   |
| 30                                                   | 3,75  | -110 | -118 | -109 | -110 | -113 | 30                                                                       | 7,35  | 0,53  | 0,26   | 3,07   |
| 31                                                   | 0     | -108 | -117 | -107 | -108 | -112 | 31                                                                       | 8,44  | 0,84  | 0,04   | 3,46   |
| 31                                                   | 3,75  | 162  | 176  | 161  | 162  | 168  | 31                                                                       | 8,34  | 0,90  | 0,03   | 3,40   |
| 33                                                   | 0     | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 33                                                                       | 2,26  | 2,28  | 2,83   | 1,59   |
| 33                                                   | 3,75  | -11  | -11  | -11  | -11  | -11  | 33                                                                       | 1,66  | 1,62  | 1,98   | 1,17   |
| 35                                                   | 0     | 109  | 118  | 108  | 109  | 112  | 35                                                                       | 8,37  | 0,84  | 0,04   | 3,43   |
| 35                                                   | 3,75  | -174 | -187 | -172 | -174 | -179 | 35                                                                       | 7,92  | 0,73  | 0,11   | 3,26   |
| Máximos                                              |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 86,40 | 25,70 | 410,95 | 416,40 |
| Mínimos                                              |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 0,42  | 0,18  | 0,01   | 0,36   |
| Média                                                |       |      |      |      |      |      |                                                                          | 11,50 | 1,98  | 13,87  | 15,40  |

Fonte: do Autor

Figura 54 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos





Fonte: do Autor

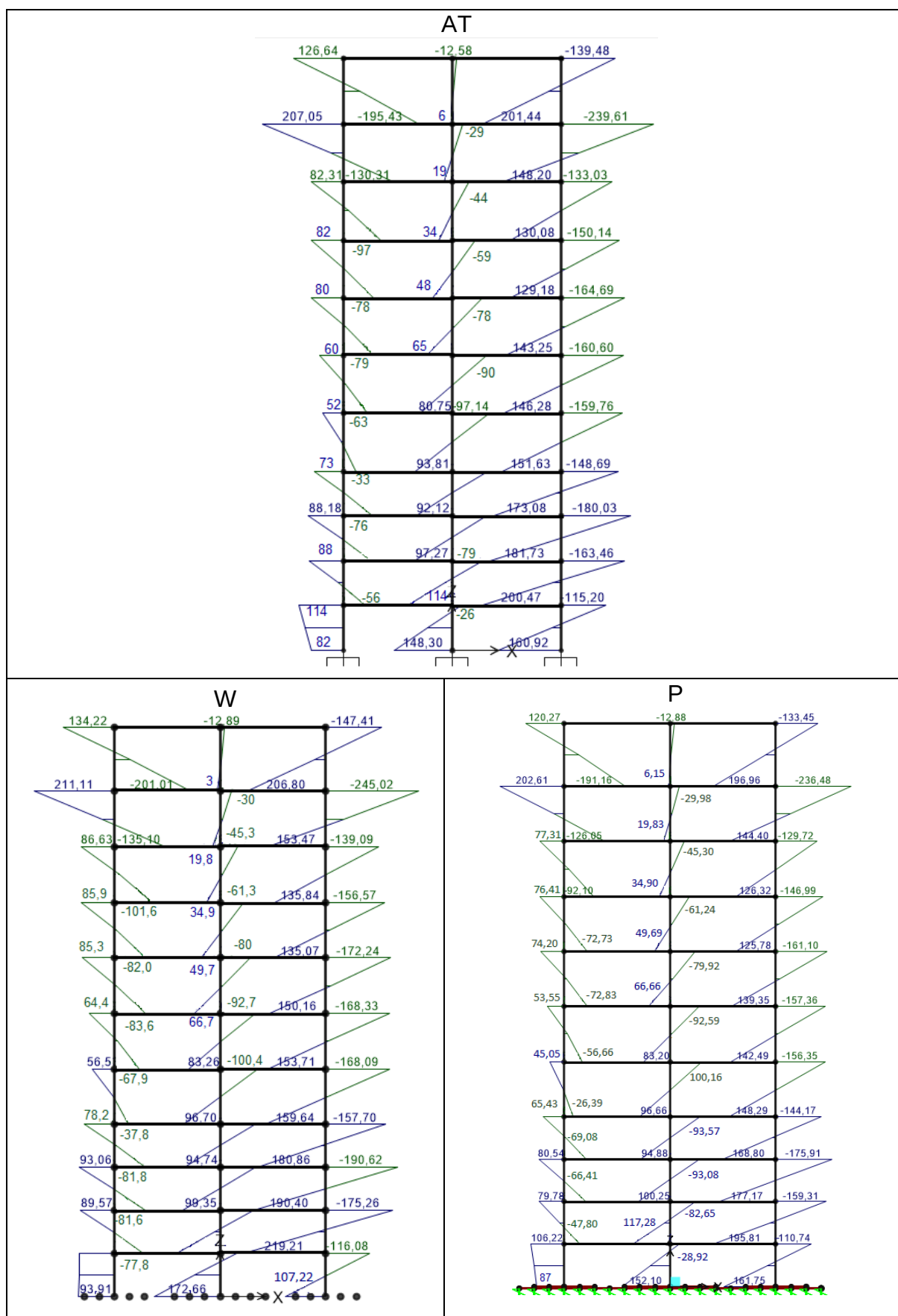
Tabela 40 - Momento fletor nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos

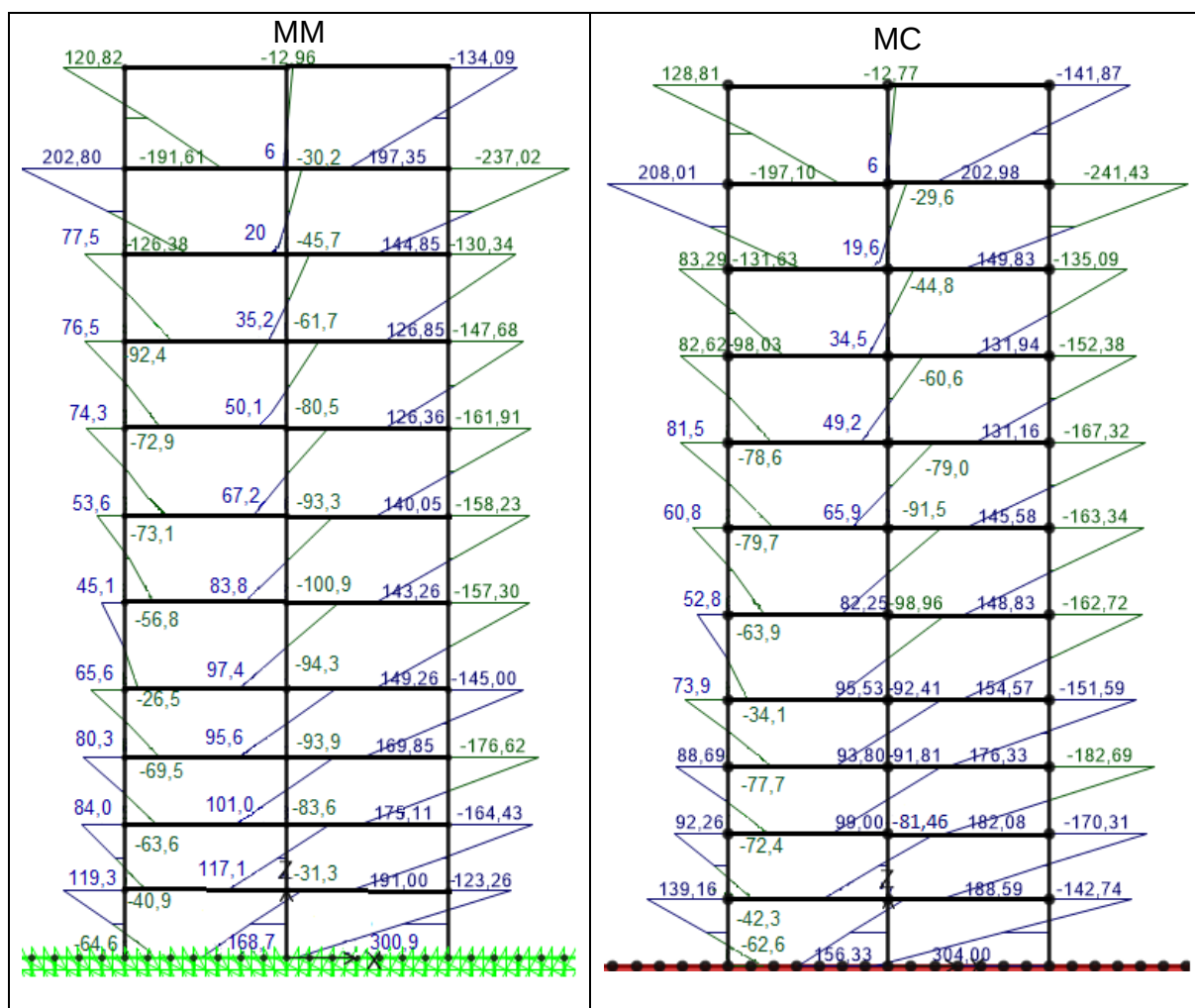
| Momento Fletor nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos |       |      |      |      |      |      | Diferença Percentual dos Modelos de Cálculo com ISE em relação ao AT (%) |       |       |        |        |
|-------------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| Pilares                                               | Coord | M-AT | M-W  | M-P  | M-MM | M-MC | Pilares                                                                  | M-W   | M-P   | M-MM   | M-MC   |
| Nº                                                    | m     | kNxm | kNxm | kNxm | kNxm | kNxm | Nº                                                                       |       |       |        |        |
| 1                                                     | 0     | 82   | 94   | 87   | -67  | -63  | 1                                                                        | 14,80 | 6,20  | 181,82 | 176,53 |
| 1                                                     | 2,9   | 114  | 92   | 106  | 119  | 139  | 1                                                                        | 18,60 | 6,42  | 5,11   | 22,59  |
| 3                                                     | 0     | 148  | 173  | 152  | 169  | 156  | 3                                                                        | 16,42 | 2,56  | 13,75  | 5,41   |
| 3                                                     | 2,9   | -26  | -44  | -29  | -31  | -27  | 3                                                                        | 67,48 | 10,67 | 19,92  | 4,30   |
| 5                                                     | 0     | 161  | 107  | 162  | 301  | 304  | 5                                                                        | 33,37 | 0,52  | 87,01  | 88,92  |
| 5                                                     | 2,9   | -115 | -116 | -111 | -123 | -143 | 5                                                                        | 0,76  | 3,87  | 7,00   | 23,90  |
| 6                                                     | 0     | -56  | -78  | -48  | -41  | -42  | 6                                                                        | 38,32 | 14,99 | 27,27  | 24,75  |
| 6                                                     | 2,9   | 88   | 90   | 80   | 84   | 92   | 6                                                                        | 2,31  | 8,87  | 4,09   | 5,38   |
| 8                                                     | 0     | 114  | 115  | 117  | 117  | 116  | 8                                                                        | 1,11  | 3,10  | 2,92   | 2,23   |
| 8                                                     | 2,9   | -79  | -88  | -83  | -84  | -81  | 8                                                                        | 10,71 | 4,26  | 5,44   | 2,76   |
| 10                                                    | 0     | 200  | 219  | 196  | 191  | 189  | 10                                                                       | 9,35  | 2,32  | 4,72   | 5,92   |
| 10                                                    | 2,9   | -163 | -175 | -159 | -164 | -170 | 10                                                                       | 7,22  | 2,54  | 0,59   | 4,19   |
| 11                                                    | 0     | -74  | -82  | -66  | -64  | -72  | 11                                                                       | 10,29 | 10,21 | 14,04  | 2,09   |
| 11                                                    | 2,9   | 88   | 93   | 81   | 80   | 89   | 11                                                                       | 5,53  | 8,67  | 8,91   | 0,57   |
| 13                                                    | 0     | 97   | 99   | 100  | 101  | 99   | 13                                                                       | 2,15  | 3,07  | 3,80   | 1,79   |
| 13                                                    | 2,9   | -90  | -95  | -93  | -94  | -92  | 13                                                                       | 5,37  | 3,60  | 4,50   | 2,19   |
| 15                                                    | 0     | 182  | 190  | 177  | 175  | 182  | 15                                                                       | 4,77  | 2,51  | 3,64   | 0,19   |
| 15                                                    | 2,9   | -180 | -191 | -176 | -177 | -183 | 15                                                                       | 5,88  | 2,29  | 1,90   | 1,48   |
| 16                                                    | 0     | -76  | -82  | -69  | -69  | -78  | 16                                                                       | 7,58  | 9,18  | 8,66   | 2,13   |
| 16                                                    | 2,9   | 73   | 78   | 65   | 66   | 74   | 16                                                                       | 7,75  | 9,89  | 9,68   | 1,75   |
| 18                                                    | 0     | 92   | 95   | 95   | 96   | 94   | 18                                                                       | 2,84  | 3,00  | 3,76   | 1,82   |
| 18                                                    | 2,9   | -91  | -94  | -94  | -94  | -92  | 18                                                                       | 3,89  | 3,25  | 4,08   | 1,98   |

|         |      |      |      |      |      |      |    |       |       |        |        |
|---------|------|------|------|------|------|------|----|-------|-------|--------|--------|
| 20      | 0    | 173  | 181  | 169  | 170  | 176  | 20 | 4,50  | 2,47  | 1,86   | 1,88   |
| 20      | 2,9  | -149 | -158 | -144 | -145 | -152 | 20 | 6,06  | 3,04  | 2,48   | 1,95   |
| 21      | 0    | -33  | -38  | -26  | -26  | -34  | 21 | 14,02 | 20,47 | 20,13  | 2,62   |
| 21      | 3,75 | 52   | 57   | 45   | 45   | 53   | 21 | 8,79  | 13,30 | 13,16  | 1,65   |
| 23      | 0    | 94   | 97   | 97   | 97   | 96   | 23 | 3,08  | 3,04  | 3,79   | 1,83   |
| 23      | 3,75 | -97  | -100 | -100 | -101 | -99  | 23 | 3,31  | 3,10  | 3,88   | 1,87   |
| 25      | 0    | 152  | 160  | 148  | 149  | 155  | 25 | 5,28  | 2,21  | 1,57   | 1,94   |
| 25      | 3,75 | -160 | -168 | -156 | -157 | -163 | 25 | 5,21  | 2,13  | 1,54   | 1,85   |
| 26      | 0    | -63  | -68  | -57  | -57  | -64  | 26 | 8,02  | 9,82  | 9,54   | 1,73   |
| 26      | 3,75 | 60   | 64   | 54   | 54   | 61   | 26 | 7,31  | 10,76 | 10,65  | 1,34   |
| 28      | 0    | 81   | 83   | 83   | 84   | 82   | 28 | 3,10  | 3,03  | 3,80   | 1,86   |
| 28      | 3,75 | -90  | -93  | -93  | -93  | -92  | 28 | 3,18  | 3,06  | 3,83   | 1,86   |
| 30      | 0    | 146  | 154  | 142  | 143  | 149  | 30 | 5,08  | 2,60  | 2,07   | 1,74   |
| 30      | 3,75 | -161 | -168 | -157 | -158 | -163 | 30 | 4,81  | 2,01  | 1,47   | 1,71   |
| 31      | 0    | -79  | -84  | -73  | -73  | -80  | 31 | 6,46  | 7,25  | 6,96   | 1,51   |
| 31      | 3,75 | 80   | 85   | 74   | 74   | 81   | 31 | 5,96  | 7,79  | 7,62   | 1,23   |
| 33      | 0    | 65   | 67   | 67   | 67   | 66   | 33 | 3,08  | 3,00  | 3,78   | 1,88   |
| 33      | 3,75 | -78  | -80  | -80  | -81  | -79  | 33 | 3,11  | 3,01  | 3,78   | 1,86   |
| 35      | 0    | 143  | 150  | 139  | 140  | 146  | 35 | 4,83  | 2,72  | 2,23   | 1,63   |
| 35      | 3,75 | -165 | -172 | -161 | -162 | -167 | 35 | 4,58  | 2,19  | 1,69   | 1,60   |
| 36      | 0    | -78  | -82  | -73  | -73  | -79  | 36 | 5,70  | 6,24  | 5,97   | 1,35   |
| 36      | 3,75 | 82   | 86   | 76   | 77   | 83   | 36 | 5,12  | 6,53  | 6,37   | 1,07   |
| 38      | 0    | 48   | 50   | 50   | 50   | 49   | 38 | 3,11  | 3,04  | 3,83   | 1,93   |
| 38      | 3,75 | -59  | -61  | -61  | -62  | -61  | 38 | 3,10  | 3,01  | 3,78   | 1,89   |
| 40      | 0    | 129  | 135  | 126  | 126  | 131  | 40 | 4,56  | 2,64  | 2,18   | 1,53   |
| 40      | 3,75 | -150 | -157 | -147 | -148 | -152 | 40 | 4,28  | 2,10  | 1,64   | 1,49   |
| 41      | 0    | -97  | -102 | -92  | -92  | -98  | 41 | 4,96  | 4,84  | 4,55   | 1,28   |
| 41      | 3,75 | 82   | 87   | 77   | 77   | 83   | 41 | 5,25  | 6,08  | 5,86   | 1,19   |
| 43      | 0    | 34   | 35   | 35   | 35   | 35   | 43 | 3,24  | 3,16  | 3,99   | 2,04   |
| 43      | 3,75 | -44  | -45  | -45  | -46  | -45  | 43 | 3,19  | 3,09  | 3,90   | 1,98   |
| 45      | 0    | 130  | 136  | 126  | 127  | 132  | 45 | 4,43  | 2,89  | 2,48   | 1,43   |
| 45      | 3,75 | -133 | -139 | -130 | -130 | -135 | 45 | 4,56  | 2,49  | 2,02   | 1,55   |
| 46      | 0    | -130 | -135 | -126 | -126 | -132 | 46 | 3,68  | 3,27  | 3,02   | 1,01   |
| 46      | 3,75 | 207  | 211  | 203  | 203  | 208  | 46 | 1,96  | 2,15  | 2,06   | 0,46   |
| 48      | 0    | 19   | 20   | 20   | 20   | 20   | 48 | 3,35  | 3,26  | 4,13   | 2,14   |
| 48      | 3,75 | -29  | -30  | -30  | -30  | -30  | 48 | 3,39  | 3,29  | 4,16   | 2,14   |
| 50      | 0    | 148  | 153  | 144  | 145  | 150  | 50 | 3,56  | 2,56  | 2,26   | 1,10   |
| 50      | 3,75 | -240 | -245 | -236 | -237 | -241 | 50 | 2,26  | 1,30  | 1,08   | 0,76   |
| 51      | 0    | -195 | -201 | -191 | -192 | -197 | 51 | 2,85  | 2,19  | 1,96   | 0,86   |
| 51      | 4,3  | 127  | 134  | 120  | 121  | 129  | 51 | 5,99  | 5,03  | 4,59   | 1,71   |
| 53      | 0    | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 53 | 1,16  | 1,14  | 1,44   | 0,75   |
| 53      | 4,3  | -13  | -13  | -13  | -13  | -13  | 53 | 2,42  | 2,36  | 2,98   | 1,54   |
| 55      | 0    | 201  | 207  | 197  | 197  | 203  | 55 | 2,66  | 2,22  | 2,03   | 0,76   |
| 55      | 4,3  | -139 | -147 | -133 | -134 | -142 | 55 | 5,68  | 4,33  | 3,87   | 1,71   |
| Máximos |      |      |      |      |      |      |    | 67,48 | 20,47 | 181,82 | 176,53 |
| Mínimos |      |      |      |      |      |      |    | 0,76  | 0,52  | 0,59   | 0,19   |
| Média   |      |      |      |      |      |      |    | 7,22  | 4,67  | 9,22   | 6,85   |

Fonte: do Autor

Figura 55 – Diagramas de Momento Fletor (kNxm) nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos





Fonte: do Autor