CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

CAMILA ALINE AGUIAR ALMEIDA

ANÁLISE DO EFEITO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM PÓRTICOS ESPACIAIS DE AÇO SOBRE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS DO TIPO SAPATA

BELO HORIZONTE
2022

ANÁLISE DO EFEITO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM PÓRTICOS ESPACIAIS DE AÇO SOBRE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS DO TIPO SAPATA

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

Orientadora: Profa. Dra. Renata Gomes Lanna da Silva

BELO HORIZONTE

2022

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

CAMILA ALINE AGUIAR ALMEIDA

ANÁLISE DO EFEITO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM PÓRTICOS ESPACIAIS DE AÇO SOBRE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS DO TIPO SAPATA

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

Aprovado em 30/05/2022

BANCA EXAMINADORA

_____

Profa. Dra. Renata Lanna Gomes da Silva (CEFET-MG)

_____

Prof. Dr. Péter Ludvig (CEFET-MG)

_____

Prof. Dr. Alex Sander Clemente de Souza (UFSCar)

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por me proporcionar uma carreira abençoada, repleta de desafios, conquistas, sonhos e oportunidades.

Aos meus pais, Evani e Sérgio, e irmão, Gustavo, pelo incentivo e carinho.

Às minhas tias Márcia e Bernarda, por acreditarem nos meus sonhos e estarem sempre ao meu lado.

Ao meu noivo Henrique, por todo companheirismo e amor.

À minha vó Lia, minha maior saudade e motivação para nunca desistir.

Aos meus amigos pelo apoio e amizade durante a pós-graduação.

À minha orientadora Dr. Renata Lanna pela orientação e compreensão durante a execução deste trabalho.

À Dayene, pela contribuição com o tema que originou esta pesquisa.

Aos professores do CEFET-MG pelos ensinamentos, disciplinas e conselhos ministrados durante o curso.

Ao CEFET-MG, responsável por toda minha formação acadêmica, desde o ensino médio, curso técnico e graduação.

À CAPES, pelo incentivo ao Programa de Pós-Graduação.

À Banca examinadora, por aceitarem o convite.

E a todos os que participaram de alguma maneira desta jornada e contribuíram para minha formação. Muito obrigada!

RESUMO

Em projetos estruturais, a hipótese de apoios teóricos é comumente empregada devido a sua simplicidade. Entretanto, desconsiderar a flexibilidade da fundação pode conduzir a esforços solicitantes e deslocamentos da estrutura que não representam a resposta real do sistema. Com o auxílio de softwares, é possível realizar análises mais complexas, que levam em consideração a interação solo-estrutura (ISE). Nesse contexto, o presente estudo objetivou investigar a influência de diversos tipos de modelagem de ISE no comportamento de pórticos de aço espaciais de múltiplos andares com fundações superficiais do tipo sapata, em comparação com a utilização de apoios teóricos, considerando a análise de segunda ordem. Para isso, foi analisada a influência da deformabilidade do solo no comportamento estrutural dos pórticos de aço, considerando uma análise elástica em teoria de 2ª ordem por meio do método P-Δ, no software SAP 2000. Foram analisados modelos de pórticos de aço espaciais, considerando apoios convencionais e a ISE. Fundações superficiais do tipo sapata foram consideradas. O solo, considerado como material elástico, foi modelado empregando-se elementos de mola baseados nas teorias de Winkler, Pasternak e Malha de Molas contínuas, e elementos sólidos que representam o Meio Contínuo. Foram analisados três pórticos com as mesmas características, mas com número de pavimentos diferente, 4, 7 e 11 pavimentos. Concluiu-se que a consideração dos efeitos da ISE na análise estrutural de edifícios pode ter uma influência significativa nos resultados de deslocamentos e esforços solicitantes dos elementos. O modelo ISE que mais se aproximou dos resultados obtidos pelo método convencional foi o modelo de Pasternak e o que mais se distanciou foi o modelo de Meio Contínuo. Com relação à comparação dos pórticos com alturas diferentes, as maiores diferenças percentuais dos esforços solicitantes ocorreram no primeiro pavimento. Foi observada uma uniformidade entre os deslocamentos horizontais dos nós de um mesmo pavimento devido ao efeito de diafragma rígido. Os resultados obtidos na análise tridimensional estão coerentes com os resultados obtidos na análise realizada no plano.

Palavras-chave: Interação solo-estrutura (ISE), recalque, fundação tipo sapata, mola, meio contínuo, pórtico de aço tridimensional

ABSTRACT

In structural designs, the hypothesis of theoretical supports is commonly used due to its simplicity. However, disregarding the flexibility of the foundation can lead to internal forces and structure displacements that do not represent the actual system response. With the aid of software, it is possible to perform more complex analyzes, which take into account the soil-structure interaction (SSI). In this context, the present study investigated the influence of several types of soil-structure interaction modeling on the behavior of multi-storey three-dimensional steel frames with surface foundations of the footing type, in comparison with the use of theoretical supports. For this, the influence of soil deformability on the structural behavior of steel frames was analyzed, considering an elastic analysis in 2nd order theory using the P-Δ method, in the SAP 2000 software. Three-dimensional steel frames were analyzed, considering conventional supports and the SSI. Shallow footing foundations were considered. The soil, considered as an elastic material, was modeled using spring elements based on the theories of Winkler, Pasternak and Continuous Spring Mesh, and solid elements that represent the Medium Continuous. Three frames with the same characteristics, but with a different number of floors, 4, 7 and 11 floors, were analyzed. It was concluded that the consideration of the effects of SSI in the structural analysis of buildings can have a significant influence on the results of displacements and forces requesting the elements. The SSI model that came closest to the results obtained by the conventional method was the Pasternak model and the one that most distanced itself was the Continuous Medium model. Regarding the comparison of steel frames with different heights, the highest percentage differences in the requesting efforts occurred on the first floor. A uniformity was observed between the horizontal displacements of the nodes of the same floor due to the rigid diaphragm effect. The results obtained in the three-dimensional analysis are consistent with the results obtained in the analysis performed in the plane.

Keywords: Soil-structure interaction (SSI), Settlement, Shallow footing foundation, Spring, Medium Continuous, Three-dimensional steel frame

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de Winkler 26
Figura 2 - Modelo de Filonenko-Borodich 29
Figura 3 - Modelo de Hetenyi 29
Figura 4 - Modelo de Pasternak 30
Figura 5 - Modelo de Kerr.....30
Figura 6 - Modelo de Analogia Viga-Coluna.....31
Figura 7 - Modelo de Malha de Molas 32
Figura 8 - Superfície de deslocamentos para carregamento no semi-espaço. 33
Figura 9 - Bulbo de tensões 34
Figura 10 - Sistema de forças laterais e verticais aplicadas nos nós. 40
Figura 11 – Planta baixa do edifício em estudo (medidas em cm). 47
Figura 12 – Modelo 3D do edifício.....48
Figura 13 - Sistema de coordenadas locais dos elementos de barra no SAP 2000..49
Figura 14 – Numeração das barras e nós do pórtico plano analisado por Siqueira (2019).....50
Figura 15 - Sistema de coordenadas locais dos elementos de placa no SAP 2000..51
Figura 16 - Sistema de coordenadas locais dos elementos sólidos do SAP 2000 51
Figura 17 - Direção do vento analisada (medidas em cm) 53
Figura 18 – Dimensões das sapatas (cm).....55
Figura 19 - Bulbo de Tensões - Pórtico de 11 pavimentos.....59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de k_{s1} em kgf/cm³ 27
Tabela 2 – Fatores de influência para cálculo de recalques 28
Tabela 3 - Coeficiente α 35
Tabela 4 - Coeficiente K 35
Tabela 5 - Coeficiente de Poisson 36
Tabela 6 - Parâmetros do solo 54
Tabela 7 - Valores de coeficiente de reação vertical kh e kv 56
Tabela 8 – Recalques diferenciais na fundação para os modelos de ISE 63
Tabela 9 - Deslocamentos Horizontais nos nós (Dx) em mm 79
Tabela 10 - Deslocamentos Horizontais nos nós (Dx) - Pórticos de 4 Pavimentos 86
Tabela 11 - Deslocamentos Horizontais nos nós (Dx) - Pórticos de 7 Pavimentos 87
Tabela 12 - Deslocamentos Horizontais nos nós (Dx) - Pórticos de 11 Pavimentos 88
Tabela 13 - Deslocamentos Verticais nos nós (Dz) - Pórticos de 4 Pavimentos 89
Tabela 14 - Deslocamentos Verticais nos nós (Dz) - Pórticos de 7 Pavimentos 90
Tabela 15 - Deslocamentos Verticais nos nós (Dz) - Pórticos de 11 Pavimentos 91
Tabela 16 - Força Normal nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos 92
Tabela 17 - Força Normal nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos 92
Tabela 18 - Força Normal nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos 93
Tabela 19 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos 94
Tabela 20 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos 95
Tabela 21 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos 96
Tabela 22 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos 97
Tabela 23 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos 98
Tabela 24 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos 99
Tabela 25 - Força Cortante nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos 100
Tabela 26 - Força Cortante nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos 101
Tabela 27 - Força Cortante nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos 102
Tabela 28 - Momento Fletor nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos 104
Tabela 29 - Momento Fletor nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos 105
Tabela 30 - Momento Fletor nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos 106
Tabela 31 - Momento Fletor nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos 108

Tabela 32 - Momento Fletor nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos.....109
Tabela 33 - Momento Fletor nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos.....110

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação dos deslocamentos horizontais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 4 Pavimentos 60
Gráfico 2 - Comparação dos deslocamentos horizontais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 7 Pavimentos 60
Gráfico 3 - Comparação dos deslocamentos horizontais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 11 Pavimentos 61
Gráfico 4 - Comparação dos deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 4 Pavimentos 62
Gráfico 5 - Comparação dos deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 7 Pavimentos 62
Gráfico 6 - Comparação dos deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 11 Pavimentos 63
Gráfico 7 - Força Normal nas Vigas do Pórtico de 4 Pavimentos.....64
Gráfico 8 - Força Normal nas Vigas do Pórtico de 7 Pavimentos.....65
Gráfico 9 - Força Normal nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos.....65
Gráfico 10 - Força Normal nos Pilares do Pórtico de 4 Pavimentos.....66
Gráfico 11 - Força Normal nos Pilares do Pórtico de 7 Pavimentos.....66
Gráfico 12 - Força Normal nos Pilares do Pórtico de 11 Pavimentos.....67
Gráfico 13 - Força Cortante nas Vigas do Pórtico de 4 Pavimentos 68
Gráfico 14 - Força Cortante nas Vigas do Pórtico de 7 Pavimentos 68
Gráfico 15 - Força Cortante nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos 69
Gráfico 16 - Força Cortante nos Pilares do Pórtico de 4 Pavimentos 69
Gráfico 17 - Força Cortante nos Pilares do Pórtico de 7 Pavimentos 70
Gráfico 18 - Força Cortante nos Pilares do Pórtico de 11 Pavimentos 70
Gráfico 19 - Força Cortante no Pilar A2 - Pórtico de 11 Pavimentos 71
Gráfico 20 - Força Cortante no Pilar B2 - Pórtico de 11 Pavimentos 71
Gráfico 21 - Força Cortante no Pilar C2 - Pórtico de 11 Pavimentos 72
Gráfico 22 - Momento fletor nas Vigas do Pórtico de 4 Pavimentos 72
Gráfico 23 - Momento fletor nas Vigas do Pórtico de 7 Pavimentos 73
Gráfico 24 - Momento fletor nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos 73
Gráfico 25 – Momento Fletor nos Pilares do Pórtico de 4 Pavimentos 74

Gráfico 26 – Momento Fletor nos Pilares do Pórtico de 7 Pavimentos 74
Gráfico 27 – Momento Fletor nos Pilares do Pórtico de 11 Pavimentos 75
Gráfico 28 - Momento Fletor nos Pilares do Primeiro Pavimento - Pórtico de 4 Pavimentos.....76
Gráfico 29 - Momento Fletor nos Pilares do Primeiro Pavimento - Pórtico de 7 Pavimentos.....76
Gráfico 30 - Momento Fletor nos Pilares do Primeiro Pavimento - Pórtico de 11 Pavimentos.....77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas e Técnicas

AT – Modelo de Apoios Teóricos

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

CPT – Ensaio de Penetração do Cone (*Cone Penetration Test*)

ISE – Interação Solo-Estrutura

MEF – Método dos Elementos Finitos

MC – Modelo de Meio Contínuo

MM – Modelo de Malha de Molas Contínuas

NBR – Norma Brasileira

P – Modelo de Pasternak

SPT – Ensaio Padronizado de Penetração (*Standard Penetration Test*)

W – Modelo de Winkler

LISTA DE SÍMBOLOS

α – Coeficiente em função do tipo de solo

B – Largura ou diâmetro

D – Rigidez à flexão

∇^2 – Operador de Laplace

E – Módulo de Elasticidade Longitudinal ou Módulo de Young

EI – Rigidez à flexão

ε_x – Deformação longitudinal (em X)

ε_y – Deformação transversal (em Y)

ε_z – Deformação transversal (em Z)

G – Módulo de cisalhamento ou Módulo de elasticidade transversal

γ_{al} – Peso específico da alvenaria

γ_c – Peso específico do concreto

γ_{xy} – Deformação Angular

H'i – Força lateral fictícia

h - Altura

I – Fator de influência

N_{SPT} – Índice de resistência à penetração do solo

K – Coeficiente em função do tipo de solo

k – Coeficiente de reação vertical ou coeficiente de mola

L – Comprimento inicial

ΔL – Variação de comprimento

P-Δ – Efeito Global de Segunda Ordem

P-δ – Efeito Local de Segunda Ordem

p – Pressão aplicada

T – Força de Tração

σ_z – Tensão normal vertical

σ_r – Tensão normal radial horizontal

σ_t– Tensão normal horizontal circunferencial

σ_{adm} –Tensão admissível

τ_{xy} – Tensão de cisalhamento

V'i – Cortante Fictícia

υ - Coeficiente de Poisson

w - Deslocamento vertical (recalque)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO 18

1.2 PERGUNTA DE PESQUISA 20

1.3 OBJETIVOS 20

1.3.1 Objetivo Geral 20

1.3.2 Objetivos Específicos 20

1.4 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA 20

1.5 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA 21

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO 21

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 23

2.1 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA 23

2.1.1 Conceituação 23

2.1.2 Prescrições normativas 23

2.1.3 Recalques na Fundação de Edificações 24

2.1.4 Modelos elásticos do solo 25

2.1.4.1 Modelo de Winkler – 1867 25

2.1.4.2 Modelo de Filonenko-Borodich – 1940 28

2.1.4.3 Modelo de Hetenyi – 1946 29

2.1.4.4 Modelo de Pasternak – 1954 29

2.1.4.5 Modelo de Kerr – 1965 30

2.1.4.6 Modelo de Analogia Viga-Coluna – 1993 30

2.1.4.7 Modelo de Malha de Molas (Novo modelo contínuo de Winkler) - 2001 31

2.1.4.8 Meio contínuo 32

2.1.5 Parâmetros do solo 34

2.1.6 Fatores influentes na ISE 36

2.1.6.1 Rigidez relativa estrutura-solo 36

2.1.6.2 Número de pavimentos 37
2.1.6.3 Sequência executiva 37
2.1.6.4 Edificações vizinhas 37
2.1.6.5 Efeito tridimensional de pórtico 38
2.1.6.6 Forma em planta da edificação 38
2.2 ANÁLISE EM TEORIA DE SEGUNDA ORDEM ELASTICA 38
2.3 REVISÃO DA LITERATURA 40
2.4 DISCUSSÃO E CONTRIBUIÇÃO DO ESTADO DA ARTE PARA A PESQUISA 45
3 MODELO ESTRUTURAL COM ISE 47
3.1 MODELAGEM DOS PÓRTICOS ESPACIAIS 48
3.1.1 Elementos de barra (frame) 49
3.1.2 Elementos de placa (shell) 50
3.1.3 Elementos sólidos (solid) 51
3.2 DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS 52
3.2.1 Cargas Verticais 52
3.2.2 Cargas Horizontais 52
3.2.3 Combinação de ações 53
3.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO 53
3.4 DIMENSIONAMENTO DAS SAPATAS 54
3.5 DEFINIÇÃO DO COEFICIENTE DE MOLA (K) 55
4 RESULTADOS E ANÁLISES COMPARATIVAS 58
4.1 BULBO DE TENSÕES NO MODELO DE MEIO CONTÍNUO 58
4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA OS PÓRTICOS ESTUDADOS 59
4.2.1 Análise dos deslocamentos 59
4.2.2 Análise dos esforços solicitantes 64
4.2.2.1 Força Normal 64

4.2.2.2 Força Cortante.....67
4.2.2.3 Momento Fletor 72
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....78
6 CONCLUSÃO 81
REFERÊNCIAS 84
APÊNDICE 86

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Um dos problemas fundamentais na engenharia de fundações consiste em determinar os recalques de uma construção. Um recalque quando não ponderado em cálculos estruturais, pode comprometer a integridade da estrutura. Do ponto de vista arquitetônico, pode causar um desconforto visual, principalmente nas situações onde ocorre o desaprumo da edificação. Um exemplo clássico de obra que sofreu grande adensamento do solo sob suas fundações, gerando um elevado nível de recalque diferencial é a Torre de Pisa, na Itália. Ao longo dos anos, foram realizadas intervenções geotécnicas a fim de manter a torre de pé (CAPUTO, 1987).

No Brasil, um exemplo conhecido de recalque diferencial são os edifícios na orla de Santos. O solo nessa região é composto por uma camada superficial de areia seguido por uma camada de argila mole. Levando em conta a compactação média da camada de areia, diversos construtores, entre 1940 e 1970, optaram por executar edifícios apoiados em fundações diretas. Porém, com o passar dos anos, as tensões na camada de argila aumentaram significativamente devido à construção de novos edifícios, seja pelo incremento de carga ou pela sobreposição dos bulbos de tensões de edifícios vizinhos, fazendo com que ocorressem desaprumos excessivos nessas estruturas. Esses edifícios precisaram passar por intervenções de alto custo a fim de garantir estabilidade estrutural. Além das questões estrutural e estética, esse fenômeno causa inconvenientes aos moradores quanto à funcionalidade das edificações, como pisos desnivelados, portas e janelas emperradas, fissuras nos revestimentos e alvenarias, desaprumo nos poços dos elevadores e, consequentemente, ocorre a desvalorização dos edifícios (DIAS, 2010; CABRAL, 2018).

No desenvolvimento de um projeto estrutural, primeiramente é feito o dimensionamento da superestrutura, considerando apoios teóricos, no qual se obtêm os esforços atuantes nos elementos estruturais e as cargas na fundação. A partir dessas cargas, são calculadas e projetadas as fundações. Percebe-se que os sistemas são calculados separadamente, sem considerar a Interação Solo-Estrutura (ISE).

A ISE pode ser definida como um conjunto de fenômenos resultantes da interação entre os elementos estruturais e o solo. Um sistema completo solo-fundação-estrutura

é constituído por uma superestrutura, sua fundação e o solo sobre a qual ela se apoia. Devido à deformação do solo, as fundações alteram as condições de vínculo e, consequentemente, a distribuição de esforços e deslocamentos.

Os estudos sobre ISE iniciaram-se no final do século XIX, estendendo-se até a primeira metade do século XX. Na segunda metade do século XX, a crescente demanda das indústrias de energia nuclear e offshore, bem como as necessidades de melhorias na segurança sísmica, incentivaram as pesquisas sobre o tema, que evoluíram rapidamente graças ao avanço dos computadores e ferramentas de simulação. (KAUSEL, 2010)

Atualmente, a importância dos estudos de interação solo-estrutura é evidenciada com o desenvolvimento dos grandes centros urbanos e a verticalização das construções, além da necessidade crescente de estruturas mais esbeltas e com grandes vãos, que implica no aumento das cargas na fundação e tornam essas estruturas mais sensíveis a recalques e deformações. Contudo, a ISE geralmente é desconsiderada na prática devido à complexidade da simulação numérica em comparação com o método tradicional, atrelada aos curtos prazos para elaboração dos projetos (RITTER *et al.*, 2020).

Extensas revisões de literatura apresentaram os conceitos básicos de interações solo-estrutura e reuniram diversos métodos para modelagem, indicando seus pontos fortes e limitações, bem como os programas de computador disponíveis para esse estudo, a citar os trabalhos de Dutta e Roy (2002), Garg e Hora (2012), Yesane *et al.* (2016) e Kia Darbandsari e Horjat Kashani (2018).

Nesse contexto, o objetivo do trabalho é avaliar, por meio de simulações numéricas de pórticos espaciais, as influências da consideração da interação solo-estrutura sobre os elementos estruturais de aço, analisando a redistribuição de esforços e comparando os deslocamentos verticais e horizontais obtidos para os diferentes modelos. Este trabalho apresenta-se como contribuição aos estudos sobre ISE, bem como à aplicação de metodologias para a consideração da ISE em projetos estruturais de edifícios de múltiplos andares com fundações superficiais do tipo sapata.

1.2 PERGUNTA DE PESQUISA

Quais as influências dos diversos tipos de modelagem de interação solo-estrutura no comportamento de pórticos de aço espaciais, em comparação com a utilização de apoios teóricos?

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos são divididos em objetivo geral e específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

Investigar a influência de diversos tipos de modelagem de interação solo-estrutura no comportamento de pórticos de aço espaciais de múltiplos andares com fundações superficiais do tipo sapata, em comparação com a utilização de apoios teóricos, considerando a análise de segunda ordem.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para cumprir o objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

a) Avaliar a influência dos modelos de ISE no comportamento dos pórticos (esforços solicitantes e deslocamentos) em comparação com a utilização de apoios teóricos.
b) Avaliar o efeito da altura do edifício nos modelos ISE.
c) Comparar os resultados obtidos nos modelos ISE considerando a análise tridimensional com os resultados obtidos por Siqueira (2019), considerando a análise no plano.

1.4 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Não é objetivo deste trabalho, apresentar um estudo detalhado sobre os métodos e processos de modelagem utilizados, limitando-se apenas à apresentação dos resultados obtidos com o auxílio desses.

Ainda, vale salientar que os resultados alcançados neste trabalho estão limitados a esse estudo, uma vez que pórticos com dimensões diferentes e solos com propriedades diferentes podem acarretar em grande variabilidade dos resultados.

1.5 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Em projetos estruturais, a hipótese de apoios teóricos é comumente empregada devido a sua simplicidade. No entanto, desconsiderar a flexibilidade da fundação pode conduzir a valores de esforços solicitantes e deslocamentos da estrutura que não representam a resposta real do sistema, podendo esses serem a favor ou contra a segurança. Geralmente, espera-se que as diferenças nesses valores sejam absorvidas pelos coeficientes de segurança adotados no cálculo, porém, caso isso não aconteça, a estabilidade da estrutura poderá ser comprometida.

A consideração da ISE gera uma redistribuição dos esforços ao longo da estrutura, podendo promover mudanças significativas no dimensionamento dos elementos estruturais, seja em prol da segurança, por possibilitar a previsão de possíveis acidentes, ou pelo fator econômico, por viabilizar dimensionamentos menos onerosos. Sendo assim, a influência mútua entre a superestrutura e o sistema de fundação não deve ser negligenciada. Todavia, por ser uma tarefa complexa e que exige tempo hábil para realização das simulações numéricas, geralmente é ignorada na prática.

Atualmente, com o avanço da tecnologia e o uso de microcomputadores, é possível realizar análises estruturais complexas e prever o comportamento de diversos tipos de estruturas sob consideração da ISE, variando os fatores influentes como porte, tipo de fundação e metodologias para análise. Portanto, é importante que sejam desenvolvidas pesquisas para avaliar os métodos de modelagem computacional, possibilitando uma previsão mais próxima do comportamento real, o que favorece a segurança e/ou economia no dimensionamento dos elementos estruturais.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos: Introdução, Fundamentação Teórica, Modelo Estrutural com ISE, Resultados, Discussão dos Resultados e Conclusão.

O primeiro capítulo é composto pela Introdução, que aborda a contextualização do tema, a pergunta de pesquisa, os objetivos, as restrições e limitações, bem como a justificativa e relevância da pesquisa.

O segundo capítulo, intitulado Fundamentação Teórica, aborda os principais conceitos que serviram como embasamento teórico para a realização deste trabalho,

além de apresentar uma revisão da literatura com estudos recentes e relevantes relacionados ao tema em estudo.

O terceiro capítulo, denominado Modelo Estrutural com ISE, apresenta a modelagem dos pórticos espaciais, a definição dos carregamentos e dos parâmetros do solo, o dimensionamento das sapatas, bem como os valores dos coeficientes horizontal e de recalque vertical da mola para análise dos modelos ISE.

O quarto capítulo apresenta os Resultados e Análises Comparativas. Os valores dos deslocamentos dos nós, dos recalques diferenciais e dos esforços solicitantes nos elementos para todos os modelos com ISE são apresentados e comparados com o modelo com bases rígidas (sem ISE).

O quinto capítulo apresenta a Discussão de Resultados da pesquisa.

O sexto capítulo apresenta a Conclusão do presente estudo e sugestões para trabalhos futuros.

Posteriormente, as Referências que embasaram esse trabalho são apresentadas. E, finalmente, o Apêndice, com as bases de dados que geraram os gráficos de resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico será abordada a revisão bibliográfica do tema em estudo, que serviu como embasamento teórico para a pesquisa realizada.

2.1 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

2.1.1 Conceituação

A interação solo-estrutura é um campo de atuação que se encontra na interseção de diversas disciplinas técnicas, como mecânicas do solo e estrutural, dinâmicas do solo e estrutural, engenharia de terremotos, geofísica, geomecânica e ciências dos materiais (KAUSEL, 2010).

A ABNT NBR 6122 (2019) define a interação solo-estrutura como o mecanismo de análise estrutural que considera a deformabilidade das fundações juntamente com a superestrutura. A interação solo-estrutura procura avaliar os efeitos na superestrutura por meio dos esforços e no sistema de fundação por meio dos recalques.

Essa interação tem início na fase de construção e continua até que as tensões e deformações do solo e da estrutura se estabilizem, ou seja, até que seja atingido um estado de equilíbrio (HOLANDA JUNIOR, 1998).

2.1.2 Prescrições normativas

A seguir, são apresentadas algumas normas brasileiras e as suas indicações no que tange o estudo da interação solo-estrutura.

Na ABNT NBR 6118 (2014), que estabelece os procedimentos de cálculo de estruturas de concreto, é indicado na seção 14.2.2 que “em casos mais complexos” a interação solo-estrutura deve ser contemplada, mas sem especificar quais seriam esses casos.

Na ABNT NBR 8800 (2008), que estabelece o procedimento de cálculo para estruturas de aço e mistas de aço-concreto, recomenda-se, na seção 4.9.1, a consideração da interação solo-estrutura “onde necessário”, também deixando em aberto quais são os casos em que há necessidade da consideração ISE.

Na ABNT NBR 16055 (2012), que trata sobre paredes de concreto, indica obrigatoriedade na consideração da interação solo-estrutura para edifícios com mais de cinco pavimentos e para os casos de fundação em níveis diferentes.

Na ABNT NBR 6122 (2010), que trata dos critérios que regem o projeto e a execução de fundações, estabelece-se a realização do estudo da ISE em estruturas nas quais a deformabilidade das fundações pode causar uma redistribuição de esforços, sem especificar os tipos de estrutura. Na nova versão da ABNT NBR 6122 (2019), foram discriminados, no item 5.5, os casos onde existe a obrigatoriedade de se realizar esse estudo, sendo eles:

> a) estruturas nas quais a carga variável é significativa em relação à carga total, tais como silos e reservatórios;
> b) estruturas com mais de 55,0 m de altura, medida do térreo até a laje de cobertura do último piso habitável;
> c) relação altura/largura (menor dimensão) superior a quatro;
> d) fundações ou estruturas não convencionais. (ABNT NBR 6122, 2019, p. 14-15)

Devido à omissão de diretrizes para cálculo de flexibilidade do sistema solo-fundação e da não obrigatoriedade, na maioria das vezes, de se considerar a interação solo-estrutura, essa vem sendo ignorada na prática e os modelos simplificados continuam sendo utilizados e dados como válidos.

2.1.3 Recalques na Fundação de Edificações

Recalque é o termo utilizado na engenharia civil para designar o rebaixamento de uma edificação devido à deformação do solo sob sua fundação. Denomina-se recalque absoluto, o deslocamento vertical descendente em um determinado ponto da estrutura. A diferença entre os recalques absolutos de dois pontos da estrutura é denominada recalque diferencial. O recalque diferencial gera distorções bem como esforços estruturais não previstos, podendo causar danos às edificações e até mesmo levá-las à ruína. Sendo assim, é necessário estabelecer os recalques admissíveis nas estruturas. (IWAMOTO, 2000)

Segundo Colares (2006), os recalques admissíveis nas estruturas geralmente são estabelecidos por especialistas em função da distorção angular, levando em consideração diversos fatores, tais como o tipo e as características do solo, o tipo de fundação, propriedades dos materiais utilizados, o tipo da superestrutura, bem como o porte, a função e a rigidez da mesma. A distorção angular, também conhecida como recalque diferencial específico, é a razão entre o recalque diferencial entre dois pontos da estrutura e a distância entre os mesmos.

Os danos às edificações causados por recalques podem ser classificados em arquitetônicos, funcionais e estruturais. Os danos arquitetônicos estão relacionados à aparência visual da construção, como as fissuras em alvenarias de vedação e o desaprumo. Os danos funcionais estão relacionados ao uso da construção, comprometendo o bom funcionamento de elevadores, esquadrias e ralos, por exemplo. Os danos estruturais comprometem a estabilidade da própria estrutura, podendo levá-la ao colapso. Como exemplo desse tipo de dano, têm-se as trincas em vigas, lajes, pilares e alvenarias estruturais (TEIXEIRA E GODOY,1998).

Os recalques também podem ser classificados quanto a variação no tempo. Denomina-se recalque imediato ou elástico aquele que ocorre logo após a aplicação da carga. Já o recalque por adensamento é em função do tempo e resulta da drenagem gradual da água dos vazios do solo até a dissipação do excesso de pressão neutra (REIS, 2000). No presente estudo, são abordados apenas os recalques imediatos.

Os recalques imediatos, geralmente, são previstos a partir de métodos conhecidos na literatura, como a teoria da elasticidade, o método da camada finita, o método de Schmertmann, o método de Aoki-Lopes, o método de propagação de tensões, entre outros, ou ainda por meio de métodos experimentais. Assim, em projetos estruturais é comum a imposição de recalques estimados para considerar a ISE (ANTONIAZZI, 2011).

Os modelos elásticos mais conhecidos para a consideração da ISE em projetos estruturais são aqueles em que a rigidez do solo é representada por meio de molas elásticas na interface entre a estrutura e o solo. A seguir, são apresentados alguns modelos utilizados para a consideração da ISE.

2.1.4 Modelos elásticos do solo

2.1.4.1 Modelo de Winkler – 1867

O modelo de Winkler consiste na representação do comportamento do solo como um sistema de molas idênticas, independentes entre si, pouco espaçadas, discretas e linearmente elásticas, conforme Figura 1. (KIA DARBANDSARI E HOJAT KASHANI, 2018)

As propriedades do solo no modelo de Winkler são descritas por meio de um único parâmetro, a rigidez, portanto, esse modelo de fundação é denominado modelo de um

parâmetro. Admite-se que a relação entre a pressão aplicada e o deslocamento vertical é linear e dada pela Equação 1.

$$p = kw \tag{1}$$

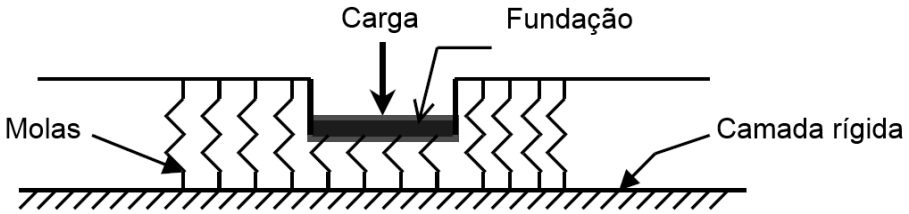
Onde:

p é a pressão aplicada;

k é o coeficiente de reação vertical ou coeficiente de mola, o qual representa a rigidez do solo;

w é o deslocamento vertical.

Figura 1 - Modelo de Winkler



Fonte: Adaptado de Dutta e Roy (2002).

A obtenção do coeficiente de mola (k) pode ser feita das seguintes formas:

a) Ensaio de placa:

Segundo a ABNT NBR 6489 (1984), o ensaio de placa consiste em aplicar uma carga incremental sobre uma placa com área de 0,5 m² apoiada no solo e realizar leituras dos deslocamentos verticais até a estabilização.

Como resultado, obtém-se uma curva pressão-recalque. A inclinação do trecho inicial da curva, que corresponde à faixa de pressões previstas, é o coeficiente de mola. Esse valor necessita de correção quanto à dimensão e à forma da fundação (HOLANDA JUNIOR, 1998).

b) Tabelas de valores típicos ou correlações:

A tabela de valores típicos fornecida na literatura apresenta as tensões admissíveis para cada tipo de solo, os quais podem ser associados a recalques que geralmente são aceitos em estruturas. Os valores de coeficiente de reação vertical de

uma placa quadrada de 1 pé (k_{s1}), fornecidos por Terzaghi (1955), são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de k_{s1} em kgf/cm³

Argilas	**Rija**	**Muito Rija**	**Dura**
q_u (kgf/cm²)	1 - 2	2 - 4	> 4
faixa de valores	1,6 - 3,2	3,2 - 6,4	> 6,4
valor proposto	2,4	4,8	9,6
Areias	**Fofa**	**Med. Compacta**	**Compacta**
faixa de valores	0,6 - 1,9	1,9 - 9,6	9,6 - 32
areia acima N. A.	1,3	4,2	16
areia submersa	0,8	2,6	9,6

Fonte: Terzaghi (1955).

Ainda, é possível estimar o coeficiente de mola por meio de correlações com o módulo de elasticidade, que por sua vez, pode ser determinado por ensaios triaxiais de penetração estática (CPT) ou de penetração dinâmica (SPT) (ANTONIAZZI, 2011).

c) Cálculo do recalque de fundações reais Holanda

O cálculo direto dos recalques pode ser feito por solução da Teoria da Elasticidade. A fórmula de Schleicher, expressa na Equação 2, pode ser aplicada na estimativa do recalque de fundações rígidas (sapatas de concreto) ou flexíveis (aterros) (CAPUTO, 1987).

$$k = \frac{pB(1-\upsilon^2)}{E} I \tag{2}$$

Onde:

p é a pressão uniformemente distribuída na superfície;

E e υ são parâmetros do solo;

B é a largura (ou o diâmetro) da área carregada;

I é um fator de influência que depende da forma da área carregada e da posição do ponto em que se calcula o recalque (centro ou vértice). Os valores de I são apresentados na Tabela 2 para camada de espessura infinita.

Tabela 2 – Fatores de influência para cálculo de recalques

Tipo de placa		Rígida	Flexível		
			Centro	Vértice	Valor médio
Circular		0,79	1,00	0,64	0,85
Quadrada		0,88	1,12	0,56	0,95
Retangular	L/B=2	1,22	1,52	0,76	1,30
	L/B=5	1,72	2,10	1,05	1,83
	L/B=10	2,12	2,54	1,27	2,20

Fonte: Adaptado de Caputo (1987).

O modelo de Winkler é geralmente utilizado nos estudos sobre interação solo-estrutura, pois apresenta análise simples e de fácil implementação. Entretanto, o modelo possui algumas limitações como, admitir que as cargas aplicadas no solo provocam deslocamentos apenas no ponto de aplicação das mesmas. Além disso, considera o comportamento tensão-deformação do solo como linear. Outra restrição está relacionada à independência das molas, que só seria possível se não existisse ligação coesiva entre as partículas que constituem o solo (DUTTA E ROY, 2002; ANTONIAZZI, 2011).

No entanto, existem outros modelos mais complexos que utilizam mais parâmetros na sua formulação e levam em consideração a interação entre as molas adjacentes, os quais estão relatados a seguir.

2.1.4.2 Modelo de Filonenko-Borodich – 1940

Esse modelo garante a interação das molas individuais de Winkler por meio de uma membrana elástica fina no topo das molas, sujeita a uma tração constante T, conforme Figura 2. A relação entre a pressão aplicada e o deslocamento vertical é dada pela Equação 3 para fundações circulares ou retangulares.

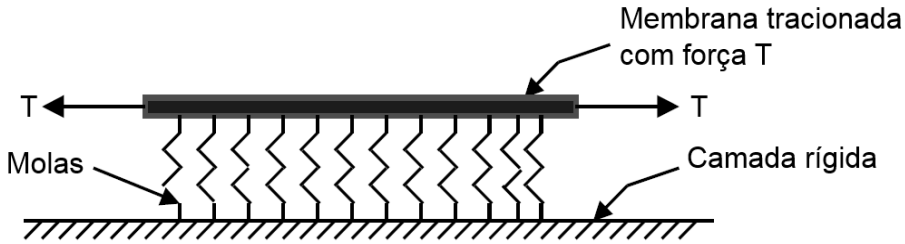
$$p = kw - T\nabla^2 w \tag{3}$$

Onde:

∇^2 é o operador de Laplace, dado por $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$;

T é a força de tração.

Figura 2 - Modelo de Filonenko-Borodich



Fonte: Adaptado de Dutta e Roy (2002).

2.1.4.3 Modelo de Hetenyi – 1946

Nesse modelo, a interação entre as molas é caracterizada por meio da rigidez de uma viga ou placa elástica, a qual sofre apenas deformação por flexão, conforme Figura 3. A resposta do modelo é expressa pela Equação 4.

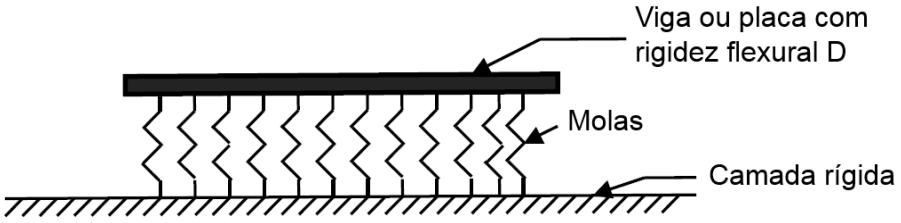
$$p = kw - D\nabla^4 w \tag{4}$$

Onde:

$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$;

D é a rigidez à flexão da viga ou placa elástica, dada por $(Eh^3)/(12(1-\nu)^2)$, sendo E o módulo de elasticidade, ν o coeficiente de Poisson e h a espessura da viga.

Figura 3 - Modelo de Hetenyi



Fonte: Adaptado de Dutta e Roy (2002).

2.1.4.4 Modelo de Pasternak – 1954

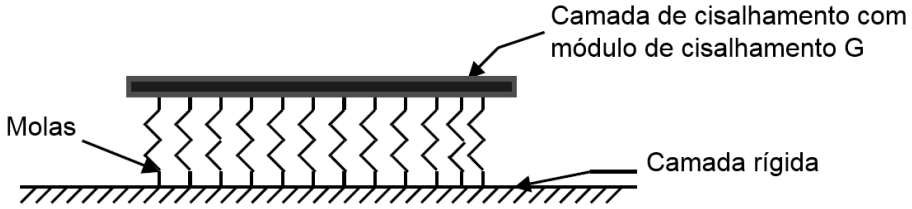
Esse modelo considera a interação entre as molas por meio de uma viga ou placa elástica que sofre apenas deformação transversal de cisalhamento, conforme Figura 4. A relação entre a pressão aplicada e o deslocamento vertical é dada pela Equação 5.

$$p = kw - G\nabla^2 w \tag{5}$$

Onde:

G é o módulo de cisalhamento.

Figura 4 - Modelo de Pasternak



Fonte: Adaptado de Dutta e Roy (2002).

2.1.4.5 Modelo de Kerr – 1965

Assim como no modelo de Pasternak, a continuidade é caracterizada pela consideração de uma camada de cisalhamento. Porém, neste modelo, assume-se que as constantes de mola acima e abaixo da camada de cisalhamento são diferentes, conforme Figura 5. A Equação 6 expressa o modelo de Kerr.

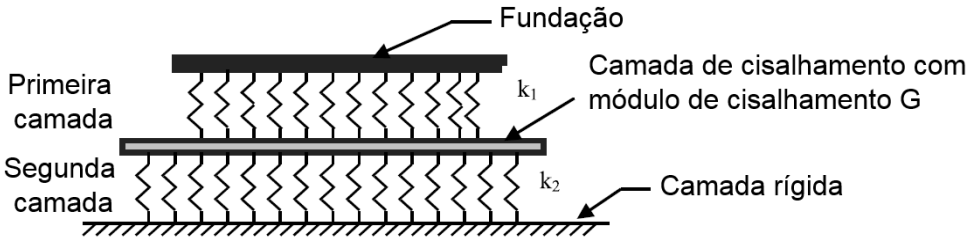
$$\left(1+\frac{k_2}{k_1}\right)p = \frac{G}{k_1}\nabla^2 p + k_2 w - G\nabla^2 w \tag{6}$$

Onde:

k_1 é a constante da mola acima da camada de cisalhamento;

k_2 é a constante da mola abaixo da camada de cisalhamento camada.

Figura 5 - Modelo de Kerr



Fonte: Adaptado de Dutta e Roy (2002).

2.1.4.6 Modelo de Analogia Viga-Coluna – 1993

Um novo modelo de subleito, governado pela Equação 7, é análogo a uma viga-coluna sob tensão axial constante de magnitude C_{p2}, que é apoiada em molas transversais de rigidez C_{p1}. Assim, a continuidade entre as molas individuais é

alcançada pelo parâmetro C_{p2}, sendo essa uma melhoria significativa à hipótese de Winkler. Na Figura 6, está apresentado o modelo em questão.

$$E_b I_b \frac{d^4 w(x)}{dx^4} - C_{p2} \frac{d^2 w(x)}{dx^2} + C_{p1} w(x) = q(x) \quad (7)$$

Onde:

$E_b I_b$ é a rigidez à flexão da viga (assumida constante);

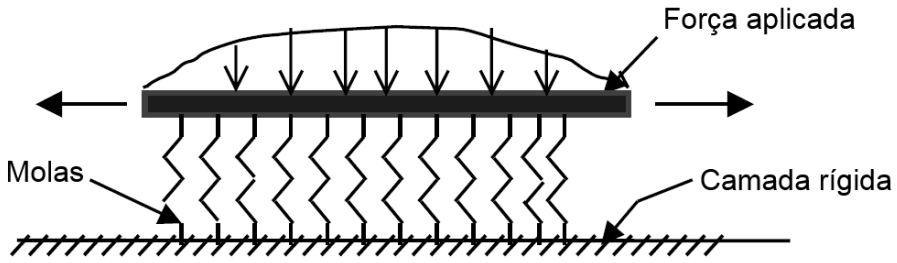
w(x) é o recalque da viga;

q(x) é a carga aplicada; e

C_{p1} e C_{p2} são constantes.

Para uma camada isotrópica homogênea sustentada por uma camada rígida, os valores das constantes podem ser escolhidos como C_{p1}=E/H e C_{p2}=GH/2, sendo E o módulo de elasticidade do solo, G o módulo de cisalhamento do solo e H a profundidade da camada rígida (DUTTA E ROY, 2002).

Figura 6 - Modelo de Analogia Viga-Coluna

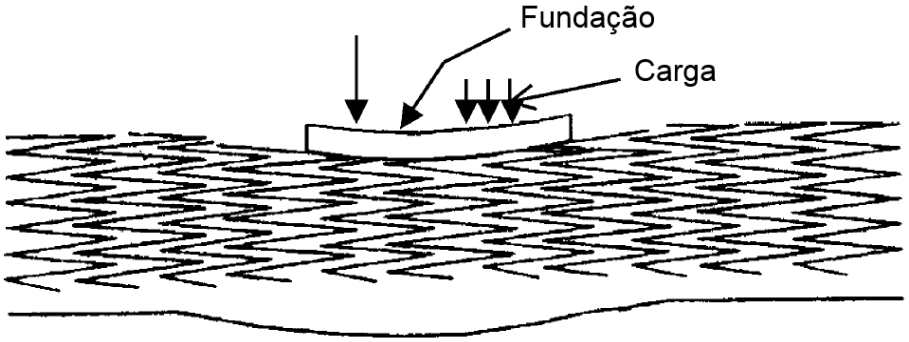


Fonte: Adaptado de Dutta e Roy (2002).

2.1.4.7 Modelo de Malha de Molas (Novo modelo contínuo de Winkler) - 2001

O modelo de Malha de Molas, proposto por Kurian e Manojkumar (2001) apud Silva (2006), trata-se de uma melhoria do modelo de Winkler, onde, ao invés de utilizar molas discretas, as molas estão interconectadas, conforme é apresentado na Figura 7. Dessa forma, é possível simular a continuidade do solo sem a introdução de outros elementos estruturais e considerar efeitos do solo fora dos limites da estrutura.

Figura 7 - Modelo de Malha de Molas



Fonte: Adaptado de Dutta e Roy (2002).

2.1.4.8 Meio contínuo

O modelo do meio contínuo representa a continuidade do maciço de solo, bem como suas diversas camadas, levando em conta a dispersão da carga para além da área carregada. O solo pode ser representado como um meio contínuo elástico, utilizando solução analítica baseada na Teoria da Elasticidade, ou elastoplástico, utilizando solução numérica pelo método dos elementos finitos (MEF) (COLARES, 2006; VELLOSO; LOPES, 2011).

A partir de Teoria da Elasticidade, Boussinesq deduziu, em 1885, as equações de tensões provocadas por uma carga concentrada sobre a superfície de um semi-espaço infinito, elástico, linear, isotrópico e homogêneo (Equações 8 a 11), as quais foram apresentadas por Terzaghi, em 1943 (PORTO, 2010). Na Figura 8 é apresentada a superfície de deslocamentos para carregamento no semi-espaço.

$$\sigma_z = \frac{3Qz^3}{2\pi R^5} \tag{8}$$

$$\sigma_r = -\frac{Q}{2\pi R^2}\left[-\frac{3r^2 z}{R^3} + \frac{(1-2v)R}{R+z}\right] \tag{9}$$

$$\sigma_t = -\frac{Q(1-2v)}{2\pi R^2}\left[\frac{z}{R} + \frac{R}{R+z}\right] \tag{10}$$

$$\tau_{rz} = \frac{3Qrz^2}{2\pi R^5} \tag{11}$$

Onde:

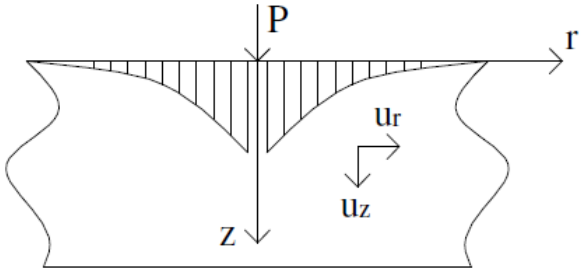
$\sigma_z,, \sigma_r, \sigma_t$ são tensões normais vertical, radial horizontal e horizontal circunferencial, respectivamente.

τ_{rz} é a tensão tangencial nas direções r e z; e

υ é o coeficiente de Poisson.

R=$\sqrt{z^2 + r^2}$

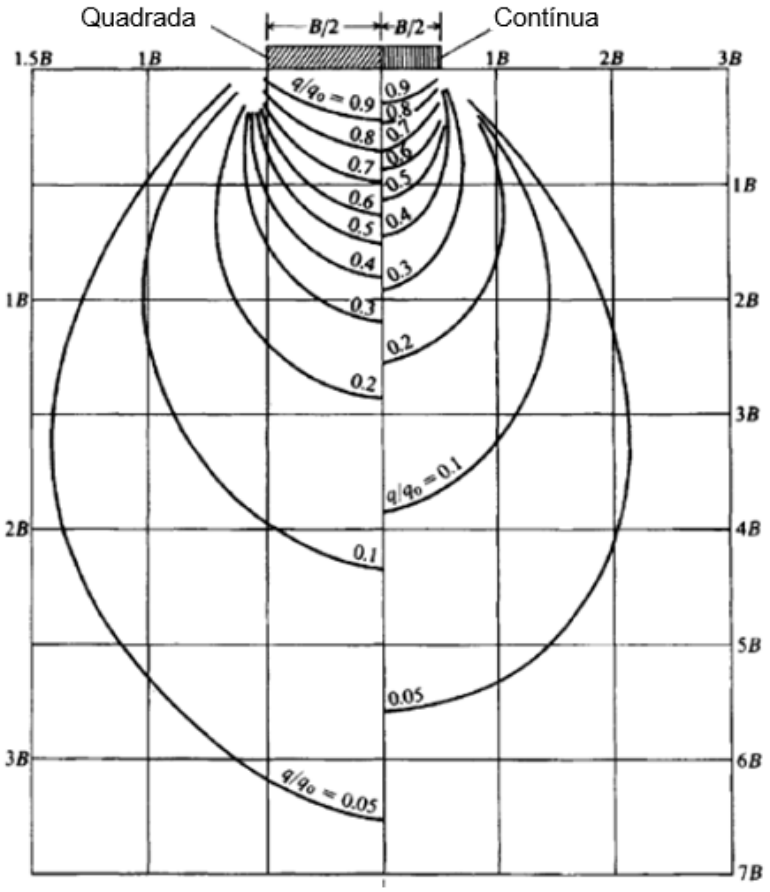
Figura 8 - Superfície de deslocamentos para carregamento no semi-espaço.



Fonte: Colares (2006).

Com base nessas equações, Bowles (1988) apresentou soluções para tensões induzidas considerando diversos tipos de carregamento utilizando um bulbo de tensões. O bulbo de tensões apresenta os coeficientes de influência que, multiplicados pela tensão aplicada na superfície, fornecem as tensões atuantes no ponto. Na Figura 9 é apresentado o bulbo de tensões para o cálculo das tensões verticais no interior do solo devidas a carregamento distribuído numa área quadrada ou retangular (contínua).

Figura 9 - Bulbo de tensões



Fonte: Bowles (1988).

Em suma, existem diversos modelos para consideração da ISE no projeto estrutural, alguns mais simples com a utilização de molas elásticas, outros mais complexos e que representam a continuidade do solo, sendo que todos eles visam uma representação mais adequada do comportamento da estrutura e maior confiabilidade na análise estrutural.

2.1.5 Parâmetros do solo

O comportamento do solo é previsto com base no alinhamento de sua superfície, no seu perfil vertical e nos seus principais parâmetros (KAVITHA; BEENA; NARAYANAN, 2016). A seguir, estão apresentados os principais parâmetros do solo, sendo eles: Módulo de Elasticidade (E), Coeficiente de Poisson (ν) e Módulo de Cisalhamento (G).

De acordo com Silva (2006), o Módulo de Elasticidade Longitudinal (E) do solo pode ser obtido por meio de um ensaio de compressão não-confinado do solo. Aplica-

se uma tensão normal (σ_x) em um corpo de prova e a razão entre o encurtamento (ΔL) e o comprimento inicial (L) do corpo de prova é a deformação longitudinal (ε_x), conforme Equação 12.

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L}{L} \tag{12}$$

Sendo o material elástico, o módulo de elasticidade longitudinal (E) é definido pela relação de proporcionalidade entre tensão normal (σ_x) e deformação longitudinal (ε_x), conforme a Lei de Hooke expressa na Equação 13.

$$\sigma_x = E.\varepsilon_x \tag{13}$$

Conforme Teixeira e Godoy (1996), o módulo de elasticidade também pode ser determinado a partir de correlações com o índice de resistência à penetração do solo (N_{SPT}), conforme Equação 14, que utiliza os coeficientes α e K apresentados nas Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente, para cada tipo de solo.

$$E = \alpha K N_{spt} \tag{14}$$

Tabela 3 - Coeficiente α

Solo	**A**
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Fonte: Teixeira e Godoy (1996).

Tabela 4 - Coeficiente K

Solo	**K (MPa)**
Areia com pedregulhos	1,10
Areia	0,90
Areia siltosa	0,70
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,30
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,20

Fonte: Teixeira e Godoy (1996).

Conforme Silva (2006), ao encurtar o corpo de prova na direção normal, surgem alongamentos nas direções y e z. Sendo o material isotrópico, o coeficiente de Poisson (ν) é definido pela relação entre a deformação lateral (ε_y ou ε_z) e a deformação longitudinal (ε_x), conforme Equação 15. Para cada tipo de solo, existem valores típicos publicados na literatura, conforme Tabela 5.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \tag{15}$$

Tabela 5 - Coeficiente de Poisson

Solo	$\boldsymbol{\nu}$
Argila saturada	0,4 - 0,5
Argila não saturada	0,1 - 0,3
Argila Arenosa	0,2 - 0,3
Silte	0,3 - 0,35

Fonte: Bowles (1988).

O Módulo de Elasticidade Transversal ou Módulo de Cisalhamento (G) é expresso pela relação entre a tensão de cisalhamento (τ_{xy}) atuante em um material e sua deformação angular (γ_{xy}), conforme Equação 16.

$$\tau_{xy} = G.\gamma_{xy} \tag{16}$$

Para materiais isotrópicos, ele pode ser relacionado com o módulo de elasticidade e com o coeficiente de Poisson, conforme Equação 17.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{17}$$

2.1.6 Fatores influentes na ISE

2.1.6.1 Rigidez relativa estrutura-solo

No processo convencional, a estimativa de recalques depende apenas do carregamento das fundações. Todavia, ao considerar a interação solo-estrutura, a rigidez da vinculação física entre lajes, vigas e pilares contribui para a redução dos valores dos recalques totais e, principalmente, diferenciais (ANTONIAZZI, 2011).

A redistribuição de esforços alivia os pilares mais carregados, transferindo os esforços para os pilares menos carregados. Como o procedimento de dimensionamento convencional não contempla essa redistribuição, os pilares podem não suportar os novos esforços solicitantes (COLARES, 2006).

Da mesma forma, a interação solo-estrutura confere uma deformada de recalques mais suave, ou seja, existe uma tendência de uniformização dos recalques com a redistribuição de cargas nos apoios. Em outras palavras, os apoios mais carregados recalcam menos do que o previsto, e os apoios menos carregados recalcam mais do que o previsto pelo processo convencional de estimativas de recalque (GUSMÃO, 1990).

2.1.6.2 Número de pavimentos

Quanto maior o número de pavimentos de uma estrutura, maior a sua rigidez e menor o efeito da interação solo estrutura, podendo esse tornar-se desprezível. Com o aumento do número de pavimentos, a rigidez da estrutura tende a um valor limite a partir do qual os recalques tornam-se dependentes apenas do carregamento. Esse aumento de rigidez não é linear ao longo da altura da edificação, haja vista que os primeiros pavimentos exercem maior influência do que os últimos (GUSMÃO, 1990, 1994).

2.1.6.3 Sequência executiva

Convencionalmente, a sequência executiva não é considerada em análises estruturais, adotando-se a simplificação de que os carregamentos atuarão somente após o fim da construção (ANTONIAZZI, 2011).

No entanto, durante o processo construtivo, com o aumento do número de andares, a estrutura vai se tornando cada vez mais rígida, havendo uma redistribuição de esforços a cada pavimento e uma tendência à uniformização dos recalques (GUSMÃO, 1990).

Portanto, para uma análise mais realista, considera-se um aumento gradativo das cargas na estrutura, com o devido acréscimo de rigidez a cada etapa construtiva do edifício, até que ele atinja o seu topo (ANTONIAZZI, 2011). A análise que leva em consideração a sequência evolutiva chama-se cálculo evolutivo.

2.1.6.4 Edificações vizinhas

Na ISE, os recalques não estão condicionados apenas às cargas na fundação, mas sim pelo estado de tensões ao qual o maciço está submetido. Esse estado de tensão depende das cargas de todos os pilares, inclusive dos pilares das edificações vizinhas. Na região de encontro entre edificações, ocorre uma concentração de

tensões, denominada efeito de grupo. Esse efeito causa recalques maiores que os previstos nos pilares periféricos adjacentes às edificações vizinhas (REIS, 2000).

2.1.6.5 Efeito tridimensional de pórtico

Gusmão (1990) comparou os efeitos da interação solo-estrutura em um pórtico plano e um pórtico espacial com as mesmas características geométricas, propriedades de deformação e relação entre carga atuante e número de apoios. Como resultado, a tendência à uniformização dos recalques foi maior no pórtico tridimensional, devido à contribuição de rigidez das cintas e vigas transversais.

Segundo Reis (2000), devido ao efeito tridimensional, a carga de um pilar central não se distribui de maneira proporcional entre os pilares periféricos, sendo que a diminuição dos recalques nos pilares centrais é mais perceptível do que o aumento nos pilares periféricos. Essa transferência de cargas produz, nos pilares periféricos, recalques maiores do que os previstos em análises convencionais e, nos pilares centrais, provoca recalques menores que os calculados sem ISE.

2.1.6.6 Forma em planta da edificação

Gusmão (1990) analisou pórticos espaciais variando a relação entre a largura e o comprimento em planta da edificação. Observou-se que os recalques diferenciais máximos tendem a diminuir à medida que a razão entre as duas dimensões tende ao valor unitário. Ou seja, em edificações com forma em planta mais próxima de um quadrado, existe uma tendência à uniformização dos recalques. Esse efeito é maior em estruturas mais flexíveis.

2.2 ANÁLISE EM TEORIA DE SEGUNDA ORDEM ELASTICA

Uma análise é chamada de primeira ordem ou linear geométrica, quando essa é realizada com base na geometria indeformada da estrutura. Já a análise de segunda ordem ou não linear geométrica ocorre quando a formulação do equilíbrio é feita em relação à sua configuração deformada. As análises também são classificadas como elásticas ou elastoplásticas, dependendo do tipo de modelagem do material. Na análise elástica, o material é modelado como elástico linear. Neste caso, a análise é linear física. Na análise elastoplástica são considerados os efeitos de plastificação das barras. Trata-se de uma análise não linear física (SILVA, 2004).

Portanto, a análise elástica em teoria de segunda ordem, considera o equilíbrio da estrutura formulado na sua posição deslocada e o material é elástico linear. A análise considera os efeitos da estabilidade elástica, mas não fornece nenhuma informação sobre a resistência do pórtico.

Os pilares de pórticos são barras submetidas às ações combinadas de momentos fletores e força normal. Devido a essa força normal, momentos e deslocamentos de segunda ordem surgem na estrutura e são adicionados aos momentos e deslocamentos de primeira ordem. Em geral, dois tipos de efeitos de segunda ordem são definidos: o efeito global (P-Δ) e o efeito local (P-δ). O efeito global P-Δ é caracterizado pelas respostas decorrentes dos deslocamentos horizontais relativos das extremidades das barras, submetidas às cargas verticais atuantes na estrutura. O efeito local P-δ é caracterizado pelas respostas decorrentes dos deslocamentos da configuração deformada de cada barra da estrutura submetida à sua própria força axial.

O método da Força Lateral Equivalente ou Fictícia, também conhecido como Método P-Δ, considera o efeito global de segunda ordem no equilíbrio da estrutura. O processo é iterativo no qual buscam-se novas condições de equilíbrio para uma estrutura sujeita a forças laterais e verticais aplicadas nos nós. A partir do cálculo em teoria de primeira ordem, obtém-se os deslocamentos laterais relativos entre os pavimentos. Considerando-se a estrutura deformada, as forças verticais aplicadas nos nós provocam o surgimento de novos esforços que, por sua vez, geram novos deslocamentos. Como resultado do efeito P-Δ no andar i, a cortante fictícia (V'_i) e a força lateral fictícia (H'_i), são calculadas pelas Equações 18 e 19, respectivamente.

$$V'_i = \frac{\Sigma P_i}{h_i}(\Delta_{i+1} - \Delta_i) \tag{18}$$

$$H'_i = V'_{i-1} - V'_i \tag{19}$$

Onde:

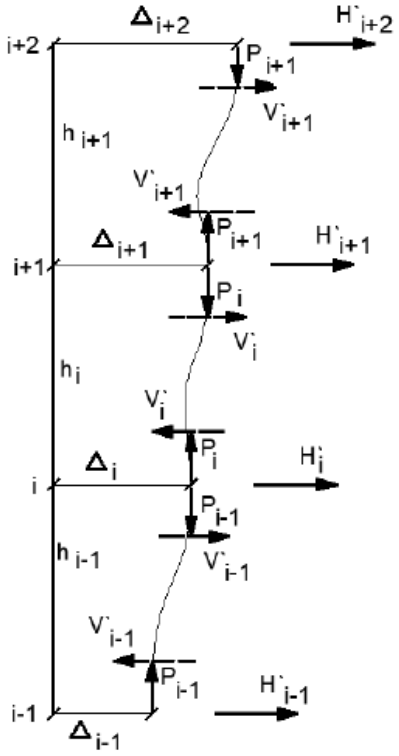
ΣP_i é o somatório das forças normais nos pilares do andar i, inclusive nos pilares que não pertençam ao sistema resistente a cargas horizontais;

h_i é a altura do andar i;

Δ_{i+1} e Δ_i são os deslocamentos horizontais dos níveis i+1 e i, respectivamente.

A força lateral fictícia deve ser somada à carga lateral inicial, caso essa exista no mesmo nível. Assim, são calculados novos deslocamentos horizontais e novas forças fictícias. Quando o valor do deslocamento Δ_i apresentar uma variação inferior a 5% com relação à iteração anterior, o método converge e o efeito de segunda ordem P-Δ estará incluído nos valores de forças e momentos resultantes nas barras. A Figura 10 apresenta o sistema de forças laterais e verticais aplicadas nos nós (SILVA, 2004).

Figura 10 - Sistema de forças laterais e verticais aplicadas nos nós.



Fonte: Adaptado de Silva (2004).

No presente estudo, foi realizada análise elástica de segunda ordem com o auxílio do software SAP 2000, a fim de avaliar a influência dos modelos de ISE no comportamento dos pórticos espaciais. O software considera a análise elástica de segunda ordem por meio do método P-Δ.

2.3 REVISÃO DA LITERATURA

O objetivo principal desta revisão da literatura foi investigar os modelos de interação solo-estrutura e sua influência no comportamento de pórticos de aço.

Esta seção é constituída por pesquisas recentes e relevantes acerca do tema em estudo, as quais demonstraram que os esforços calculados considerando bases fixas são diferentes daqueles encontrados ao se adotar bases elásticas por meio da interação solo-estrutura.

Krystosik (2018) analisou a influência da flexibilidade de uma sapata retangular em solo argilo-arenoso e no comportamento de um pórtico plano de aço de um andar. Os cálculos estáticos foram realizados por meio da análise elástica de segunda ordem, enquanto os cálculos de estabilidade foram realizados com o uso do método de valores próprios da rigidez da matriz. Os dois tipos de análise foram realizados no software Sofistik. No sistema de estrutura adotado, a análise foi realizada em três diferentes casos, obtendo a distribuição de momentos fletores e valores de deslocamento da estrutura para cada caso. No caso 1, foi feita a suposição de que todos os apoios são rígidos. No caso 2, foram determinadas as rigidezes da base do pilar e do sistema solo-fundação e a influência dessas foram analisadas separadamente. No caso 3, foi considerada a rigidez equivalente do apoio. Levar em consideração a flexibilidade do sistema solo-fundação na análise estrutural resultou na obtenção de valores mais realistas de forças internas e deslocamentos na estrutura. Os valores dos momentos diminuíram consideravelmente nos pilares do pórtico. No pilar direito, o mais carregado, os valores dos momentos fletores diminuíram em aproximadamente 39%. Os deslocamentos horizontais da viga do pórtico aumentaram 60%. Com base nesses novos valores, foi feito um novo dimensionamento da sapata, o que reduziu suas dimensões e, consequentemente, reduziu os valores de rigidez. Ainda, foi feita a análise estática considerando os valores de rigidez atualizados (caso 4), causando uma redistribuição de esforços e deslocamentos. Uma redução subsequente das dimensões da sapata não teve influência significativa nos resultados. Também foi feita uma análise de estabilidade, na qual foram determinadas as cargas críticas nos pilares. O valor de carga crítica calculada para o caso 4 foi 39% menor do que a carga crítica para o caso 1. Concluiu-se que, ao levar em conta a flexibilidade dos apoios, obtém-se uma melhor representação da resposta da estrutura e, assim, é possível realizar um dimensionamento mais econômico de estruturas de aço e fundações.

Tapia-Hernandez *et al.* (2017) estudaram as respostas inelásticas de estruturas de aço de edifícios regulares de 8 e 12 andares em solo mole. Os modelos foram

analisados sobre três condições de contorno: a) base fixa (sem ISE); b) fundação de radier; c) fundação de estacas. As análises estáticas não lineares foram realizadas usando o software Drain-2DX. Os elementos foram modelados considerando-se a plastificação nas barras e os efeitos P-Δ. De acordo com os resultados para o edifício de 12 andares, os deslocamentos dos modelos com fundação flexível foram significativamente maiores que os de base fixa. Por outro lado, a resposta dos pórticos de 8 andares com fundação de estacas foi semelhante à desenvolvida pelo modelo de base fixa. Apesar de o modelo de 8 andares ter menos estacas do que o de 12 andares, o efeito do grupo de estacas também modifica a rigidez do sistema de fundação no solo, podendo tornar os modelos de base flexível tão rígidos quanto os de base fixa. Verificou-se que o modelo de base fixa pode não ser uma representação conservadora da resposta de edifícios com fundações flexíveis, principalmente quando se considera um sistema de fundação por estacas.

Mitropoulou *et al.* (2016) analisaram a influência da ISE nas estruturas 3D de aço e de concreto armado com 2, 4 e 8 andares, considerando três sistemas de fundação. O primeiro sistema foi definido considerando o modelo de base fixa. O segundo sistema consistiu na modelagem com molas de Winkler de nó único, com o objetivo de simular a ISE de fundações rasas retangulares em argila. O terceiro sistema foi composto por um maciço de solo argiloso, discretizado com elementos finitos de quatro nós, e fundação de estacas, simuladas com elementos de viga. Elementos de mola foram implementados para modelar a interação entre estacas e o solo. Foi utilizado o software SCADA Pro para a análise estática não linear. Concluiu-se que, no caso das estruturas de 2 e 4 andares, para estruturas de concreto armado e estruturas de aço, o desempenho estrutural não foi afetado significativamente pelo sistema de fundação. No entanto, no caso das estruturas de 8 andares, o sistema de fundação influenciou o desempenho estrutural da superestrutura, apresentando maiores variações nas curvas de capacidade de carga.

Nikolaou *et al.* (2016) analisaram duas estruturas de aço, sendo a primeira um pórtico plano referente a um telhado de duas águas e a segunda uma construção assimétrica de 4 andares e vários compartimentos. As análises foram feitas considerando base fixa e também considerando a interação solo-estrutura de uma fundação retangular rasa na areia. Os resultados indicaram que a carga de ruptura

diminuiu significativamente quando o comportamento da fundação foi levado em consideração. Os mecanismos de colapso também diferiram significativamente.

Daloglu *et al.* (2016) investigaram o efeito da ISE nos projetos ideais de estruturas de aço espaciais de 2, 4 e 20 andares em fundação rasa retangular, utilizando os softwares MATLAB e SAP 2000. Foram considerados os modelos de base fixa e base elástica de três parâmetros. As análises foram realizadas para três tipos de solos: solto, denso médio e rígido. Como resultado, foram obtidas seções transversais maiores, principalmente para os pilares, ou seja, os pesos mínimos de aço dos projetos ideais aumentaram quando se considerou a flexibilidade dos solos.

Vários estudos têm abordado a análise dinâmica levando-se em conta a ISE, principalmente no que diz respeito à resposta sísmica das estruturas. A interação dinâmica solo-estrutura desempenha um papel considerável no comportamento sísmico de pórticos, incluindo aumento dos deslocamentos laterais e entre pavimentos, bem como mudanças no nível de desempenho das estruturas.

Far (2019) realizou uma análise espectral dinâmica para obter a resposta sísmica de pórticos de aço sob influência da ISE, com auxílio do software de diferenças finitas FLAC2D. Três registros diferentes de aceleração de terremoto foram aplicados para duas condições de contorno: base fixa e base flexível. Os resultados foram obtidos em termos dos esforços solicitantes e dos deslocamentos laterais. As estruturas modeladas com base flexível tiveram cisalhamento da base menor do que as estruturas de base fixa. Além disso, os deslocamentos laterais do modelo de base flexível aumentaram significativamente em comparação com o modelo de base fixa. Ao considerar os efeitos da ISE, o aumento do período natural pode alterar a resposta sísmica da estrutura e aumentar o risco quanto a segurança estrutural.

Vivek *et al.* (2017) realizaram uma análise dinâmica da interação solo-estrutura no período e no amortecimento de estruturas de aço de 3 e 6 andares, suportadas por fundações rasas em depósitos de areia densa e areia solta. O autor realizou ensaios experimentais com martelo de impacto, bem como desenvolveu uma análise numérica do sistema 2D em condições de base fixa e base flexível, com o auxílio do software OpenSees. A interação entre a fundação e o solo foi modelada com uma variedade de molas elásticas verticais e horizontais de Winkler. Como resultado, as amplificações de período e amortecimento foram mais perceptíveis no caso de um edifício de 3 andares do que no edifício de 6 andares. Ainda, para o edifício de 3

andares, observou-se um aumento médio de 3,3 vezes do amortecimento na estrutura de base fixa para a estrutura suportada pela fundação rasa em areia solta. Para o edifício de 6 andares, esse aumento foi de 2,1 vezes.

Guimarães (2018) realizou um estudo comparativo entre diferentes edifícios estruturados em aço sobre fundação superficial em sapatas e fundação profunda em estacas com o objetivo de analisar os efeitos da consideração da ISE na análise estrutural. Cinco edifícios de múltiplos pavimentos estruturados em aço em suas respectivas fundações rasas e profundas foram avaliados. Para a consideração da ISE foi utilizada a Hipótese de Winkler. A análise estrutural foi desenvolvida utilizando o software SAP 2000 e de acordo com as recomendações da NBR 8800 (ABNT, 2008). As vigas e pilares da estrutura foram modelados tridimensionalmente através de elementos de barra e a laje de concreto foi modelada com elementos de placa. Foi considerado o efeito de diafragma rígido da laje nos modelos estruturais. Para os elementos espaciais de fundação, os blocos e as sapatas foram modelados utilizando elementos sólidos, as estacas foram modeladas com elementos finitos de barras. Os resultados da força solicitante de compressão axial, dos momentos fletores e dos recalques apresentaram variações pouco significativas em relação aos resultados considerando apoios indeslocáveis, justificada pela leveza das estruturas metálicas. Os deslocamentos laterais apresentaram grandes alterações, devido à retirada da restrição à rotação do apoio e a consideração da rigidez de rotação real da ligação pilar-sapata. Os coeficientes de estabilidade global apresentaram variações significativas, resultando na alteração da classificação quanto à sensibilidade aos deslocamentos da estrutura.

Siqueira (2019) investigou três pórticos planos de aço de diferentes alturas mediante quatro tipos de modelos de cálculo que levam em consideração os efeitos da ISE, e comparou com a mesma estrutura utilizando-se bases fixas. Os modelos de mola adotados foram baseados na teoria de Winkler, teoria de Pasternak, considerando-se uma malha de molas contínuas e uma modelagem do solo como meio contínuo pelo método dos elementos finitos. As análises foram realizadas com o auxílio do software comercial SAP 2000, levando-se em conta o efeito de segunda ordem por meio do método P-Δ. Concluiu-se que o comportamento do pórtico foi afetado pelo tipo de apoio adotado e pelo tipo de modelagem.

Em continuidade ao trabalho de Siqueira (2019), o presente trabalho visa analisar e comparar os efeitos da interação solo estrutura no comportamento dos três pórticos de aço, considerando-se o pórtico tridimensional, a fim de contemplar a contribuição de rigidez das lajes.

2.4 DISCUSSÃO E CONTRIBUIÇÃO DO ESTADO DA ARTE PARA A PESQUISA

Os estudos revelaram a existência de diversos modelos de ISE, sendo que o mais adotado pelos autores foi o modelo de molas de Winkler. Para obtenção de modelos satisfatórios, é importante conhecer bem os principais parâmetros do solo que influenciam na rigidez e as ações atuantes na fundação.

Observou-se que a maioria dos trabalhos envolveu fundações rasas e predominam análises de estruturas de concreto. Além disso, verificou-se que a rigidez do sistema de fundação no solo pode ser modificada pelo efeito do grupo de estacas.

A consideração da ISE gera uma redistribuição dos esforços ao longo da estrutura, que pode ser contra ou a favor da segurança. Essa redistribuição pode causar mudanças significativas no dimensionamento dos elementos estruturais, tornando os projetos mais seguros ou mais econômicos. Sendo assim, a influência mútua entre a superestrutura e o sistema de fundação não deve ser ignorada na prática.

A rigidez da superestrutura é de suma importância no equilíbrio do pórtico, visto que os edifícios mais baixos são mais sensíveis aos efeitos da interação solo-estrutura. Vale ressaltar que, dentre os trabalhos apresentados, Guimarães (2018) considerou a existência de lajes entre os pavimentos. A introdução de um diafragma rígido no modelo, como forma de contemplar a contribuição de rigidez das lajes, pode ter influência na rigidez global da estrutura.

Também foram abordadas análises dinâmicas incluindo ISE, principalmente com relação à resposta sísmica das estruturas, por se tratar de um assunto crítico em diversos países expostos à ação desses fenômenos.

Na literatura, grande parte das pesquisas envolvendo a ISE está focada na análise do deslocamento lateral máximo, dos deslocamentos entre pavimentos e dos esforços solicitantes sem incluir os efeitos de segunda ordem. Normalmente, os deslocamentos e deformações são considerados pequenos na análise estrutural. No entanto, grandes deslocamentos e deformações podem ocorrer quando os edifícios estão sob grandes

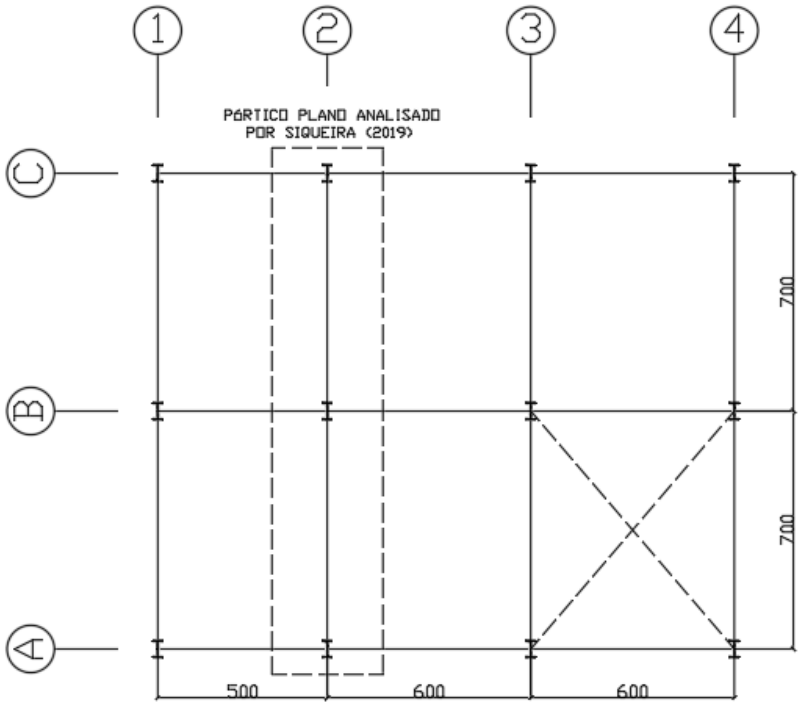
cargas de vento juntamente com os efeitos desfavoráveis da interações solo-estrutura. Nesse caso, os deslocamentos entre andares podem ser grandes e os efeitos de segunda ordem produzirão forças e momentos adicionais na estrutura.

Portanto, uma oportunidade de pesquisa está relacionada à análise elástica de segunda ordem de pórticos tridimensionais de aço, na qual será possível identificar os efeitos da ISE levando em consideração a contribuição da rigidez que as lajes proporcionam à estrutura.

3 MODELO ESTRUTURAL COM ISE

A proposta desta pesquisa consistiu em analisar o efeito da interação solo-estrutura de pórticos espaciais de aço sobre fundações superficiais do tipo sapata. O projeto estrutural utilizado como referência foi adaptado de um edifício real de 11 andares, que já foi objeto de estudo de outras pesquisas, realizadas por Silva (2004) e Siqueira (2019). Na Figura 11 e na Figura 12, estão representados a planta baixa e o modelo 3D do edifício em estudo, respectivamente. Em destaque, na Figura 11, é possível identificar o pórtico plano 2, analisado por Siqueira (2019).

Figura 11 – Planta baixa do edifício em estudo (medidas em cm).



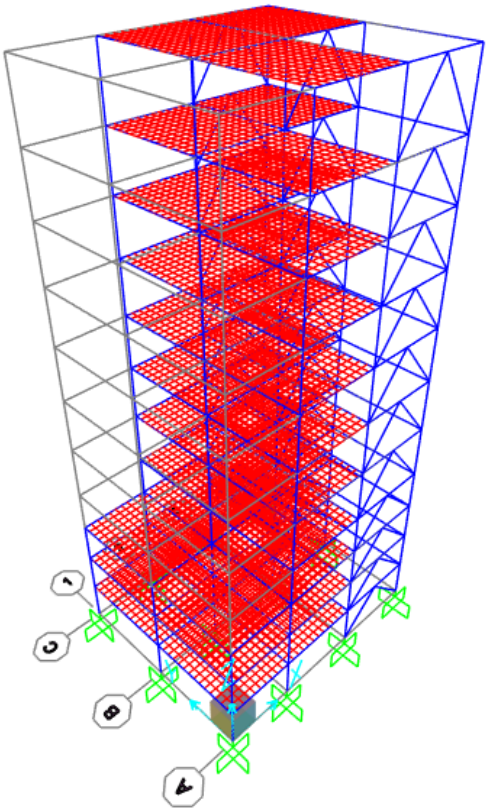
Fonte: Autora.

Os pórticos foram investigados considerando a análise elástica em teoria de segunda ordem por meio do método P-Δ, visando avaliar a influência dos recalques do solo nos esforços solicitantes e nos deslocamentos laterais. O edifício foi modelado com diferentes alturas, 4, 7 e 11 pavimentos, a fim de analisar também o efeito da altura na resposta dos edifícios.

Para cada pórtico, foram analisados cinco tipos de modelos estruturais: considerando apoios teóricos (AT) com vínculos do tipo engaste perfeitos e, os demais

considerando a ISE baseados na teoria de Winkler (W), na teoria de Pasternak (P), na teoria de malha de molas contínuas (MM) e considerando-se a modelagem do solo como um meio contínuo (MC). Para isso, foram realizados os procedimentos descritos a seguir.

Figura 12 – Modelo 3D do edifício.



Fonte: Autora.

3.1 MODELAGEM DOS PÓRTICOS ESPACIAIS

Os pilares externos e internos do 1º ao 4º andar foram constituídos, respectivamente, pelos perfis padrão americano PS 500 x 300 x 16 x 8 e PS 500 x 300 x 19 x 9,5, os pilares externos e internos do 5º ao 7º andar foram constituídos pelo perfil PS 500 x 300 x 12,5 x 8 e os pilares externos e internos do 8º ao 11º andar foram constituídos pelo perfil PS 500 x 300 x 9,5 x 6,5. As vigas dos eixos A, B e C foram constituídas pelo perfil W 310 x 23,8 e as vigas dos eixos 1, 2, 3 e 4, pelo perfil W 530 x 66. Todos os contraventamentos foram constituídos pelo perfil W 200 x 35,9.

A estrutura foi modelada no software SAP 2000, pelo método dos elementos finitos. Para a modelagem dos pilares e das vigas, foram utilizados elementos de barra em

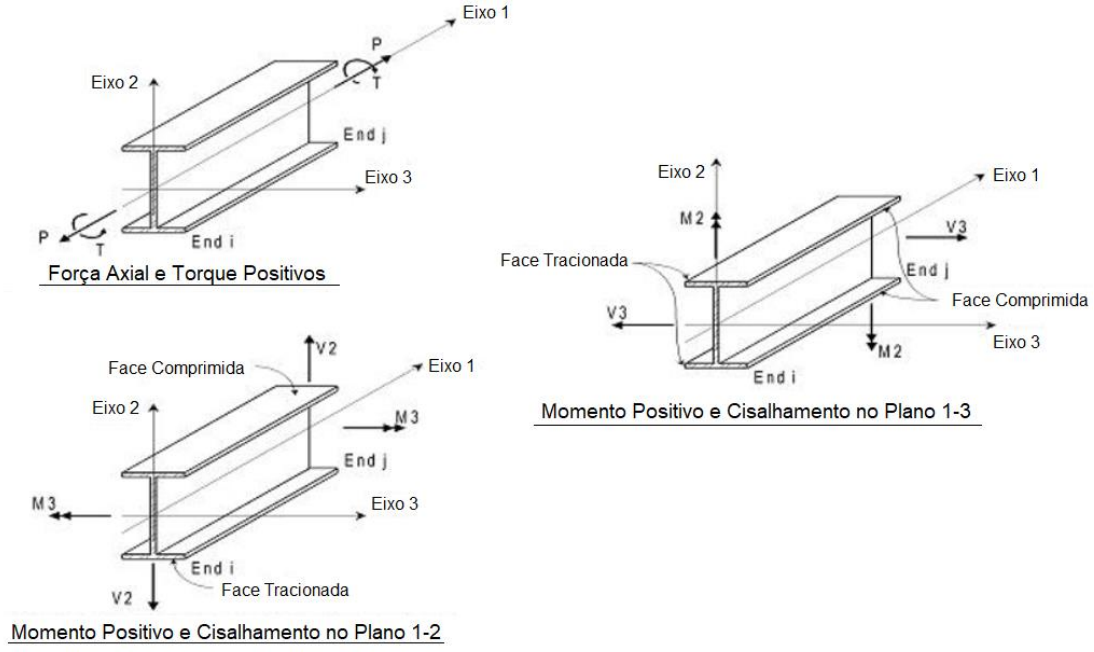
todos os modelos. As lajes foram consideradas como diafragmas infinitamente rígidos. Devido ao seu comportamento de placa, as lajes contribuem com sua rigidez transversal à flexão na análise global da estrutura. Os diafragmas rígidos são responsáveis pela manutenção da forma original em planta das lajes. Consequentemente, são também responsáveis pela compatibilização dos deslocamentos laterais de todos os pontos pertencentes ao plano médio da laje. Além disso, os diafragmas rígidos garantem a distribuição das ações horizontais entre os vários painéis de contraventamento da estrutura.

Sob o ponto de vista da resolução numérica, há expressiva redução do número de graus de liberdade envolvidos na análise, pois a hipótese adotada do diafragma rígido compatibiliza os deslocamentos u_x, u_y e θ_z no plano do diafragma através de relações cinemáticas de corpo rígido.

3.1.1 Elementos de barra (frame)

Os elementos de barra foram utilizados na modelagem dos pilares e das vigas dos pórticos espaciais de aço. Na Figura 13, é apresentado o sistema de coordenadas locais dos elementos de barra no software SAP 2000, onde é possível observar as direções positivas dos esforços internos nesse tipo de elemento.

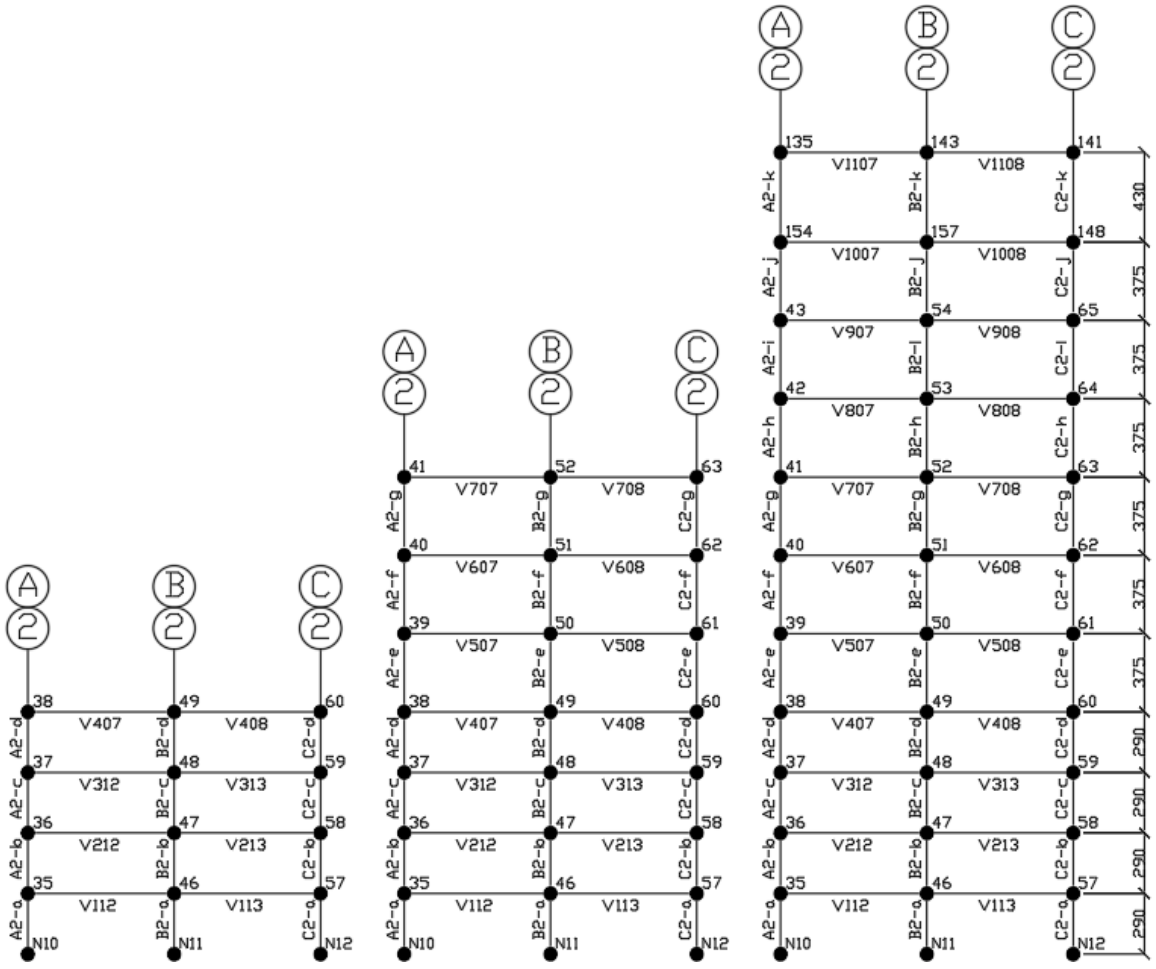
Figura 13 - Sistema de coordenadas locais dos elementos de barra no SAP 2000



Fonte: Siqueira (2019).

Na Figura 14, é possível verificar a altura de cada pavimento e a numeração das barras e dos nós do pórtico plano 2, objeto deste estudo, modelado com 4, 7 e 11 andares e não contraventados.

Figura 14 – Numeração das barras e nós do pórtico plano analisado por Siqueira (2019)
(a) 4 andares (b) 7 andares (c) 11 andares



(a) (b) (c)

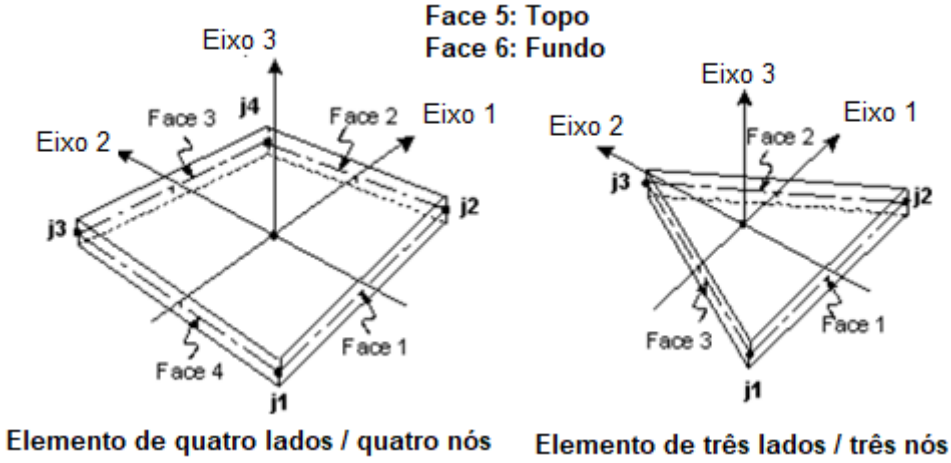
Fonte: Autora.

3.1.2 Elementos de placa (shell)

Os elementos de placa podem apresentar uma forma retangular, definida por 4 nós, ou triangular, definida por 3 nós, sendo que o eixo 3 é sempre normal ao plano formado por esses nós. Esse tipo de elemento foi utilizado na modelagem das sapatas e das lajes, bem como na modelagem da placa de cisalhamento no modelo de

Pasternak. O sistema de coordenadas locais dos elementos de placa no SAP 2000 pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 - Sistema de coordenadas locais dos elementos de placa no SAP 2000

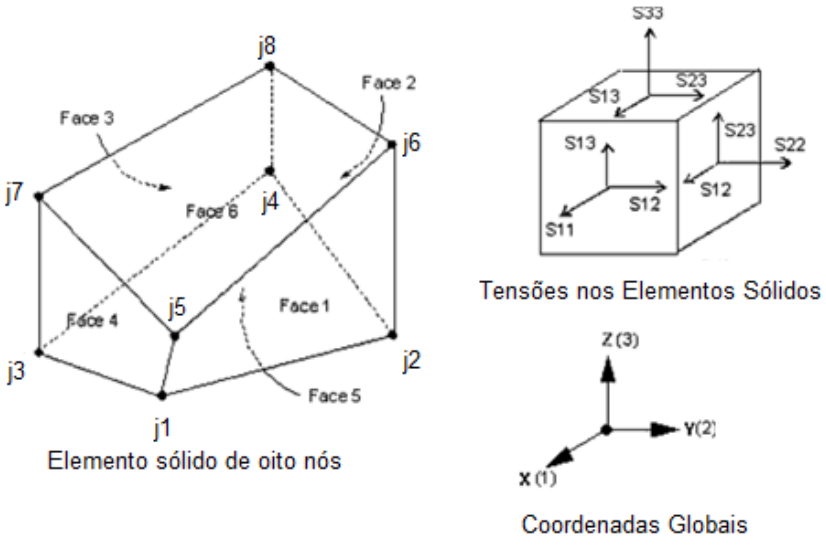


Fonte: Siqueira (2019).

3.1.3 Elementos sólidos (solid)

Os elementos sólidos possuem uma forma prismática, definida por 8 nós e 6 faces, e foram utilizados na modelagem do solo no modelo de meio contínuo. Na Figura 16, está representado o sistema de coordenadas locais dos elementos sólidos do SAP 2000, com a indicação das direções positivas dos esforços internos.

Figura 16 - Sistema de coordenadas locais dos elementos sólidos do SAP 2000



Fonte: Siqueira (2019).

3.2 DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS

As lajes de todos os pavimentos foram maciças de concreto armado, moldadas “in loco” e com espessura de 10 cm. O peso específico do concreto armado (γ_c) foi considerado igual a 25 kN/m³. As alvenarias externas e internas, em todos os andares, foram de blocos cerâmicos com espessura de 15 cm. Assim como Siqueira (2019), o peso específico da alvenaria (γ_{al}) foi considerado igual a 18 kN/m³. Na modelagem dos elementos de placa e barra no software SAP 2000, ao definir os materiais e as seções, fica definido o carregamento permanente referente ao peso próprio das lajes, vigas e pilares. As cargas de revestimento e sobrecargas foram distribuídas nas áreas das lajes. As cargas de alvenaria foram distribuídas linearmente sobre as vigas, e as cargas de vento distribuídas na fachada que incide o vento.

3.2.1 Cargas Verticais

a) Carga Permanente:

Laje = 25 kN/m³ x 0,10 m = 2,5 kN/m²

Alvenaria = 18 kN/m³ x 0,15 m = 2,7 kN/m²

Revestimento (estacionamento/pavimento tipo) = 1 kN/m²

Revestimento (cobertura) = 0,5 kN/m²

b) Sobrecarga:

Estacionamentos e Pavimentos Tipo = 3 kN/m²

Cobertura = 0,5 kN/m²

Região casa de máquinas = 15 kN/m²

3.2.2 Cargas Horizontais

A ação do vento na estrutura foi determinada de acordo com a NBR 6123:1988 considerando edificação para comércio com alto fator de ocupação na região de Belo Horizonte com velocidade básica de 31,5 m/s. Na Figura 17 é a apresentada a direção do vento analisada neste trabalho.

V_o = 31,5 m/s

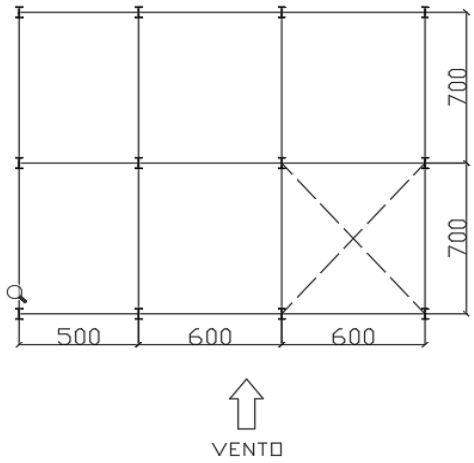
Categoria V; Classe B; Grupo 2 (edificação para comércio com alto fator de ocupação)

q_1=0,35kN/m² (até 11,60m);

q_2=0,44kN/m^2 (11,60m a 22,85m);

q_3=0,48kN/m^2 (22,85m a 38,40m)

Figura 17 - Direção do vento analisada (medidas em cm)



Fonte: Autora.

3.2.3 Combinação de ações

A combinação de ações utilizada na estrutura para Estado Limite Último baseada nas normas NBR 8681:2003 e NBR 8800:2008 é listada a seguir:

1,4*Carga Permanente + 1,5*Sobrecarga + 1,4*0,6*Vento

3.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO

Os parâmetros do solo foram obtidos por meio de correlações e tabelas de valores típicos para um boletim de sondagem escolhido por Siqueira (2019). A classificação do solo é silte argiloso, apresentando uma resistência crescente ao longo da profundidade. O nível d'água encontra-se em uma profundidade de 14 m. O módulo de elasticidade foi obtido pela Equação 14, que relaciona o índice de resistência à penetração do solo (N_{SPT}) com os coeficientes $\propto$ e K, respectivamente, iguais a 5 igual a 0,25 MPa para o tipo de solo adotado. A tensão admissível no solo foi determinada pelo N_{SPT} dividido por 5, em kgf/cm^2, e o coeficiente de Poisson foi considerado igual a 0,3. Na Tabela 6 estão apresentados os valores do módulo de elasticidade e da tensão admissível no solo.

Tabela 6 - Parâmetros do solo

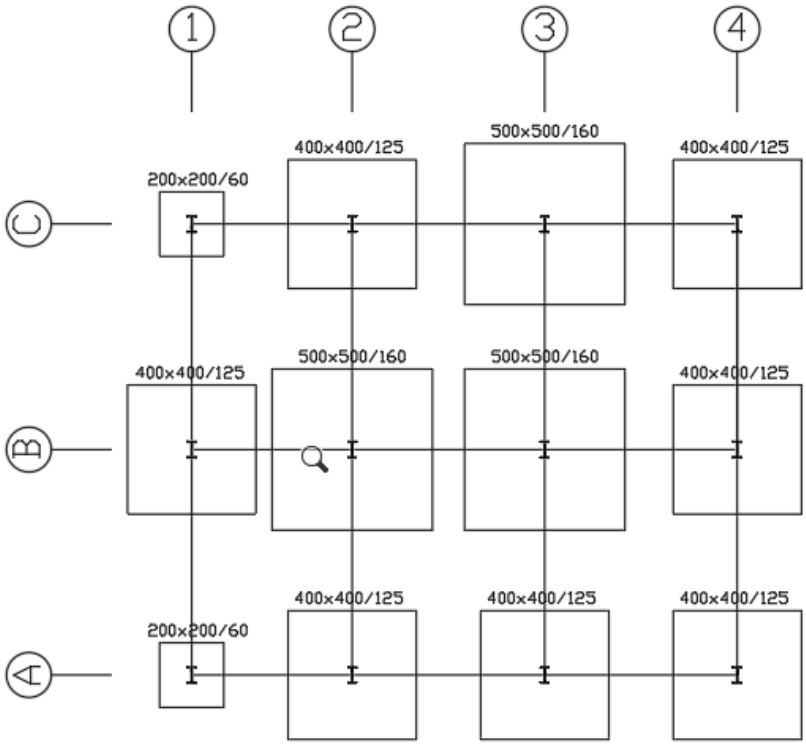
Profundidade (m)	N_{SPT}	E (MPa)	σ_{adm} (MPa)	Profundidade (m)	N_{SPT}	E (MPa)	σ_{adm} (MPa)
1	12	15	0,24	8	21	26,3	0,42
2	13	16,3	0,26	9	23	28,8	0,46
3	11	13,8	0,22	10	26	32,5	0,52
4	13	16,3	0,26	11	26	32,5	0,52
5	10	12,5	0,20	12	29	36,3	0,58
6	14	17,5	0,28	13	38	47,5	0,76
7	17	21,3	0,34	14	43	53,8	0,86

Fonte: Adaptado de Siqueira (2019).

3.4 DIMENSIONAMENTO DAS SAPATAS

As sapatas foram dimensionadas considerando concreto com f_{ck} igual a 30 MPa e totalmente solicitadas à compressão. O dimensionamento foi realizado utilizando as reações de apoio obtidas na modelagem da estrutura tridimensional de maior altura com apoio teórico e foi realizada a verificação da estabilidade das sapatas, conforme a NBR 6122:2019. Assim, foram definidos três tamanhos de sapatas quadradas: 200x200x60cm, 400x400x125cm e 500x500x160cm, conforme Figura 18. Para modelar as sapatas, os elementos de placa foram discretizados com dimensões de 0,50 m.

Figura 18 – Dimensões das sapatas (cm)



Fonte: Autora

3.5 DEFINIÇÃO DO COEFICIENTE DE MOLA (K)

Os coeficientes de mola horizontal (k_h) e vertical (k_v) do solo foram definidos utilizando correlações apresentadas nas Equações 20 e 21 a seguir. A rigidez das molas foi calculada por meio de uma média ponderada dos coeficientes de reação, considerando a área de influência do bulbo de tensões. Na Tabela 7 estão apresentados os coeficientes k_h e k_v calculados para os três tamanhos de sapatas, considerando os modelos de Winkler, e o k_v ajustado pelo modelo de Pasternak, com a inclusão de uma placa de cisalhamento que impede as deformações no plano da base. A placa de cisalhamento foi modelada com elementos de placa espessa tipo *shell* discretizados com dimensões de 0,50 m.

$$Kh = \frac{Kt.E}{\sqrt{A}.(1-\nu^2)} \tag{20}$$

$$Kv = \frac{E}{B.(1-\nu^2).Iw} \tag{21}$$

Sendo:

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

A: área em, em planta, da sapata (m²);

ν: coeficiente de Poisson igual a 0,3;

I_w: fator de influência que depende da forma e da rigidez da sapata, sendo igual a 0,82 para sapatas quadradas e rígidas;

E: módulo de elasticidade do solo (kN/m²);

K_t: fator que correlaciona a razão das dimensões da sapata (B/L), sendo igual a 0,868 para sapatas quadradas e Poisson igual a 0,3.

Tabela 7 - Valores de coeficiente de reação vertical kh e kv

Profundidade (m)	Sapata 200x200x60cm		Sapata 400x400x125cm		Sapatas 500x500x160cm		Ajuste
	k_h (kN/m³)	k_v (kN/m³)	k_h (kN/m³)	k_v (kN/m³)	k_h (kN/m³)	k_v (kN/m³)	k_v (kN/m³)
1	7154	10051	3577	5025	2862	4020	574
2	7750	10889	3875	5444	3100	4355	622
3	6558	9213	3279	4607	2623	3685	526
4	7750	10889	3875	5444	3100	4355	622
5	5962	8376	2981	4188	2385	3350	479
6	8346	11726	4173	5863	3338	4690	670
7	10135	14239	5067	7119	4054	5696	814
8	12519	17589	6260	8795	5008	7036	1005
9	13712	19264	6856	9632	5485	7706	1101
10	15500	21777	7750	10889	6200	8711	1244
11	15500	21777	7750	10889	6200	8711	1244
12	17288	24290	8644	12145	6915	9716	1388
13	22654	31828	11327	15914	9062	12731	1819
14	25635	36016	12817	18008	10254	14406	2058
Média ponderada	7254	10191	4179	5872	3640	5114	930

Fonte: Autora.

Para a modelagem da malha de molas foram utilizados elementos de mola com comprimentos de 1,0 m em todas as direções, sendo que os valores das constantes de mola na direção axial foram iguais ao Módulo de Elasticidade (E) de cada camada do solo, de acordo com a Tabela 6.

Para a direção transversal, a rigidez das molas foi ajustada por Siqueira (2019), sendo igual ao o Módulo de Elasticidade (E), multiplicado pelo coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,3, e dividido pelas 4 (quatro) molas que se deformam lateralmente devido ao carregamento de compressão axial no cubo de molas.

Para modelar o solo como meio contínuo, foram considerados elementos sólidos discretizados com tamanhos de 0,50 m em todas as direções e os valores atribuídos a cada camada de elementos ao longo da profundidade em função dos valores do Módulo de Elasticidade (E) conforme Tabela 6 e Coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,3. As dimensões adotadas para o maciço devem ser tais que, todos os efeitos de deformação devido às tensões aplicadas estejam compreendidos dentro desse elemento. Ou seja, que as condições de contorno não interfiram na resposta fornecida pelo programa.

Portanto, as modelagens da malha de molas e do meio contínuo foram feitas utilizando um processo iterativo, no qual o tamanho das malhas foi 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. O solo foi considerado como material elástico.

4 RESULTADOS E ANÁLISES COMPARATIVAS

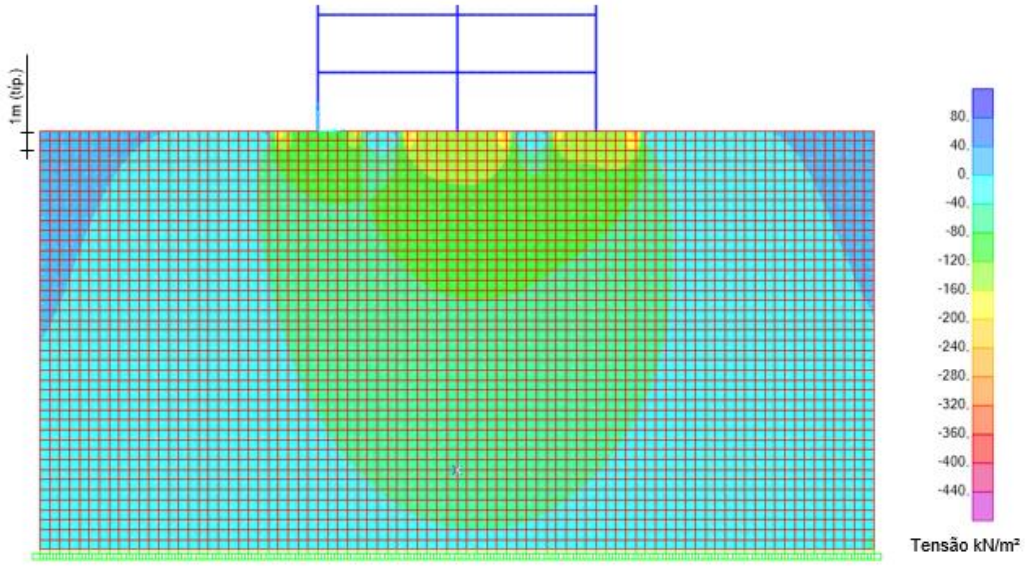
A distribuição das tensões no solo, os valores dos deslocamentos dos nós e dos esforços solicitantes nos elementos são apresentados neste capítulo. Os cinco modelos estruturais foram comparados entre si: Apoios Teóricos (AT), Winkler (W), Pasternak (P), Malha de Molas Contínuas (MM) e Meio Contínuo (MC). Também foi avaliado o efeito da altura para pórticos espaciais nos resultados obtidos.

Apesar de ter sido modelado o edifício como um todo, os resultados e análises aqui apresentados são relativos ao pórtico plano 2 (Figura 11), com o objetivo de comparar os resultados obtidos nos modelos ISE por meio na modelagem tridimensional com aqueles obtidos da modelagem bidimensional realizada por Siqueira (2019).

4.1 BULBO DE TENSÕES NO MODELO DE MEIO CONTÍNUO

Na Figura 19, está apresentado o diagrama de tensões nos elementos sólidos que representam o solo no modelo do Meio Contínuo, considerando o pórtico de maior altura. Observa-se que, a tensão máxima no contato da fundação com o solo é $q=462$ kN/m² e, próximo à profundidade de 17,5 m a tensão é $q_0=46$ kN/m², ou seja, o bulbo de tensões atinge o valor de $q/q_0=0,1$ na profundidade próxima a 3,5B, considerando B igual a 5 metros (largura da sapata central). A mesma constante foi obtida por Siqueira (2019) na análise do bulbo de tensões considerando a modelagem do pórtico plano, comportamento que condiz com o bulbo proposto por Bowles (1988). Vale ressaltar que, no caso da modelagem tridimensional, tem-se a influência do bulbo de tensões das sapatas vizinhas, o que não foi contemplado na modelagem do pórtico plano por Siqueira (2019), bem como a influência da assimetria da estrutura.

Figura 19 - Bulbo de Tensões - Pórtico de 11 pavimentos



Fonte: Autora.

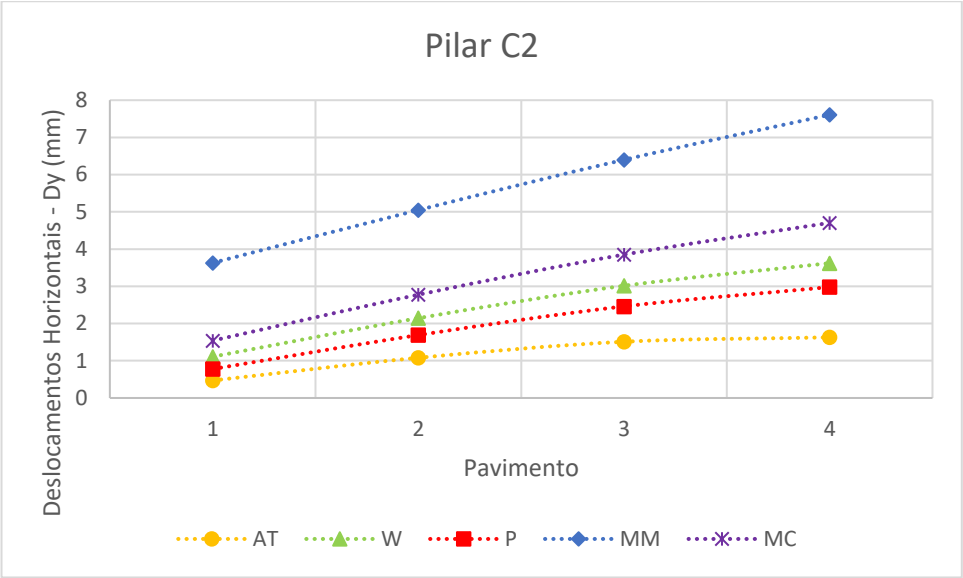
4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA OS PÓRTICOS ESTUDADOS

4.2.1 Análise dos deslocamentos

A fim de avaliar os deslocamentos e comparar os modelos, o pilar C2 foi utilizado como referência. No Apêndice, constam as tabelas com as bases de dados que geraram os gráficos desta seção. Nos Gráficos 1, 2 e 3 estão apresentados os deslocamentos horizontais no topo dos andares para todos os modelos analisados, para os pórticos de 4, 7 e 11 andares, respectivamente. Como esperado, observa-se que os deslocamentos horizontais nos três pórticos estudados aumentaram ao longo da altura do pórtico. O modelo que apresentou os menores valores de deslocamentos horizontais foi o modelo com apoios teóricos. Dentre os modelos com ISE, aquele que apresentou os menores valores de deslocamentos horizontais foi o modelo de Pasternak e aquele que apresentou os maiores valores foi o modelo de Malha de Molas, entretanto, na análise no plano, Siqueira (2019) obteve os menores valores de deslocamentos horizontais para o Modelo de Meio Contínuo.

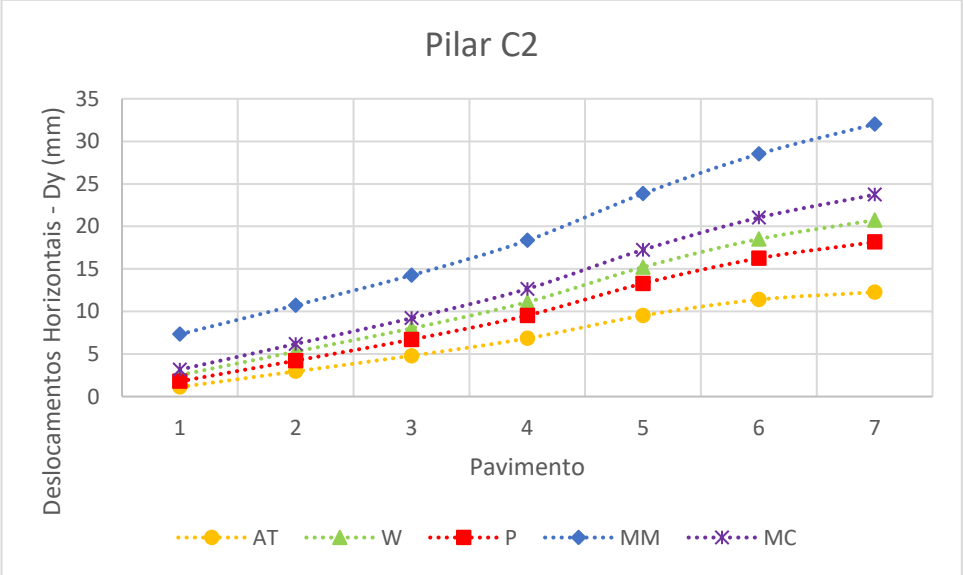
Considerando os primeiros pavimentos, os deslocamentos horizontais obtidos para todos os modelos são próximos. Já nos andares superiores, há uma diferença maior entre os valores dos deslocamentos horizontais obtidos, o que pode ser observado com o afastamento entre os pontos com o aumento do número de pavimentos. Isso demonstra que a altura do edifício possui influência no resultado dos deslocamentos horizontais de acordo com o modelo de interação solo-estrutura adotado.

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



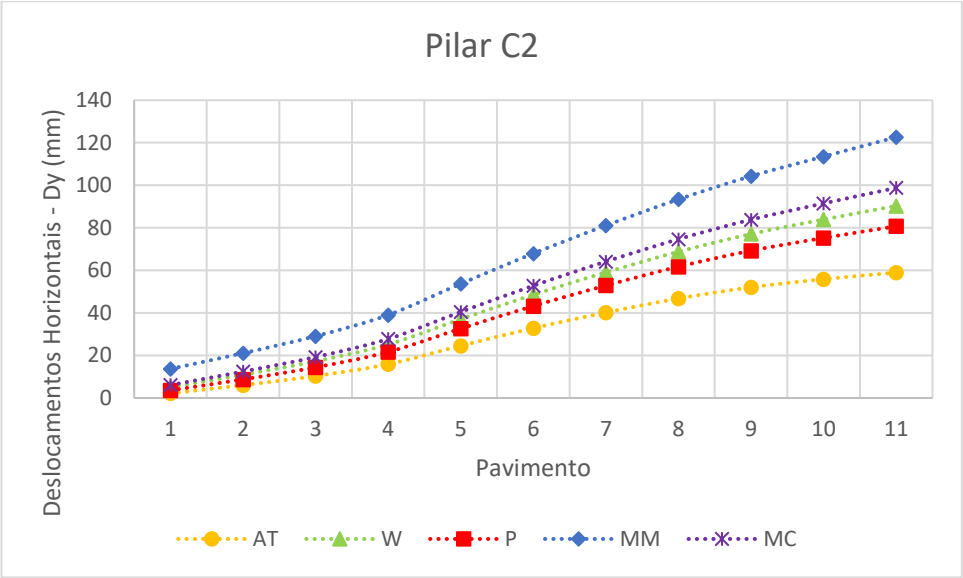
Fonte: Autora.

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



Fonte: Autora.

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



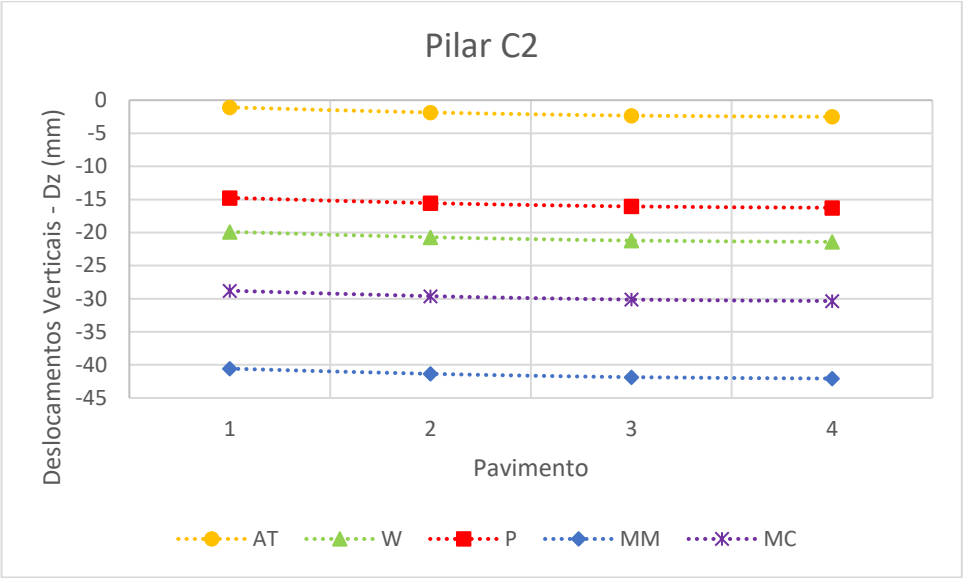
Fonte: Autora.

Nos Gráficos 4, 5 e 6 estão apresentados os deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados, para os pórticos de 4, 7 e 11 andares, respectivamente. Observa-se que o comportamento dos deslocamentos verticais nos três pórticos estudados é similar e, como era esperado, os menores deslocamentos foram obtidos para o modelo de apoios teóricos.

Comparando os modelos ISE, para todos os pórticos, o modelo que apresentou menores deslocamentos verticais foi o Pasternak e o que apresentou maiores deslocamentos verticais foi o Malha de Molas. Já para Siqueira (2019), o modelo ISE que apresentou menores deslocamentos verticais foi o Meio Contínuo e o que apresentou maiores deslocamentos verticais também foi o Malha de Molas.

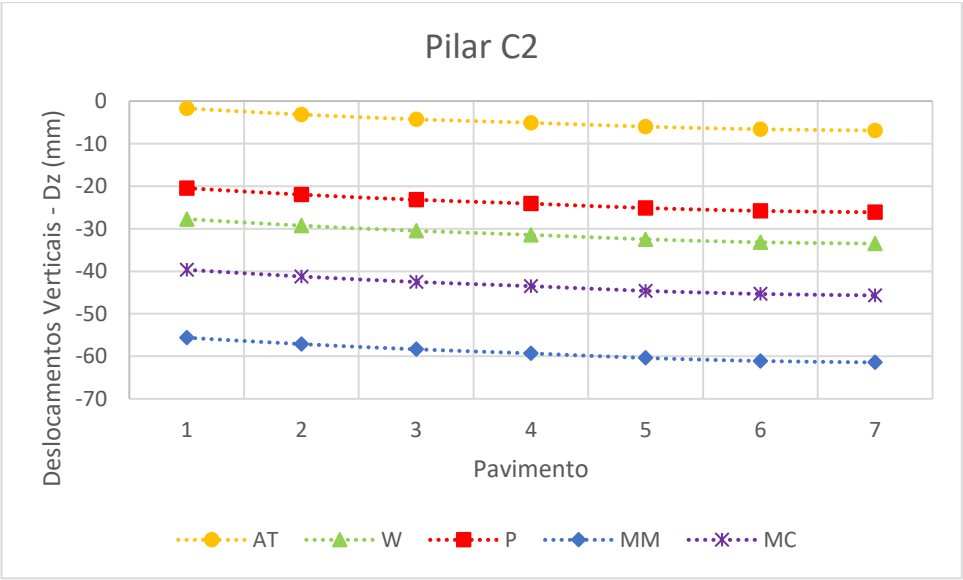
Diferente do que foi observado no caso dos deslocamentos horizontais, os valores dos deslocamentos verticais tornaram-se maiores com o aumento do número de pavimentos, mas a distância entre as linhas do gráfico se manteve constante, assim como já observado por Siqueira (2019). Isso demonstra que a altura do edifício não possui influência no resultado dos deslocamentos verticais de acordo com o modelo de interação solo-estrutura adotado.

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



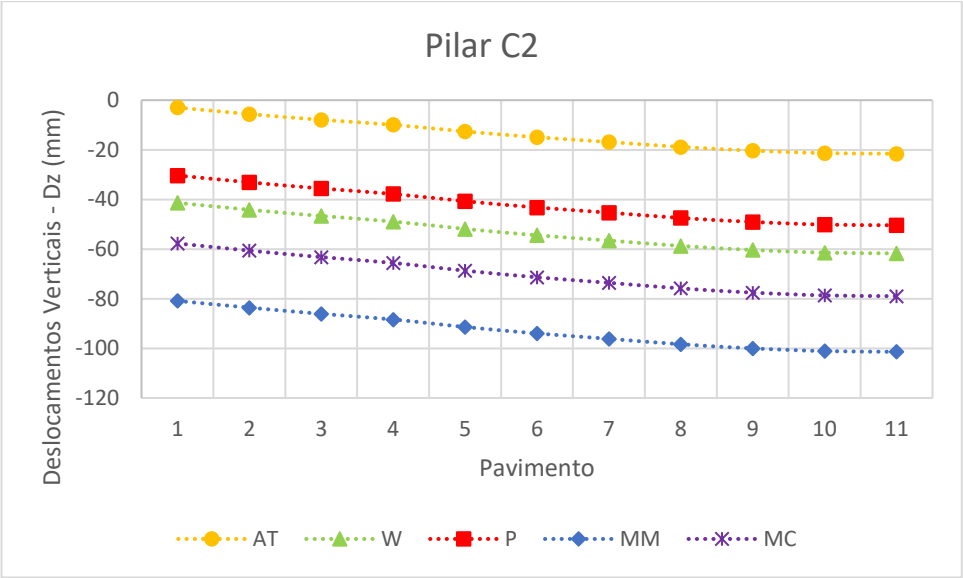
Fonte: Autora.

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



Fonte: Autora.

Gráfico 6 - Comparação dos deslocamentos verticais no topo dos andares para todos os modelos analisados - Pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: Autora.

A análise dos recalques diferenciais foi realizada nos nós de contato da fundação com o solo considerando os nós N10, N11 e N12 do pórtico 2. A Tabela 8, a seguir, apresenta os resultados dos deslocamentos verticais nesses nós e os recalques diferenciais para os quatro modelos com ISE.

Tabela 8 – 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
N10	-18,4	-12,9	-37,0	-25,7	-24,1	-16,9	-48,3	-33,8	-32,2	-22,6	-63,8	-45,2
N11	-24,9	-18,3	-47,6	-36,1	-31,9	-23,4	-60,7	-46,3	-42,4	-30,8	-80,2	-61,5
N12	-18,8	-13,6	-39,5	-27,7	-25,9	-18,7	-53,9	-37,8	-38,3	-27,3	-77,9	-54,6
N11-N10	-6,5	-5,4	-10,6	-10,4	-7,8	-6,5	-12,4	-12,5	-10,2	-8,2	-16,3	-16,3
N12-N11	6,1	4,7	8,1	8,4	6,0	4,7	6,8	8,5	4,1	3,5	2,2	6,9

Fonte: Autora.

Conforme os valores apresentados na Tabela 8, observa-se para todos os pórticos que os modelos que apresentaram maiores valores de recalques diferenciais foram os modelos de Malha de Molas e do Meio Contínuo. O nó central foi aquele que apresentou maior recalque absoluto em comparação com os outros dois nós da base para todos os modelos.

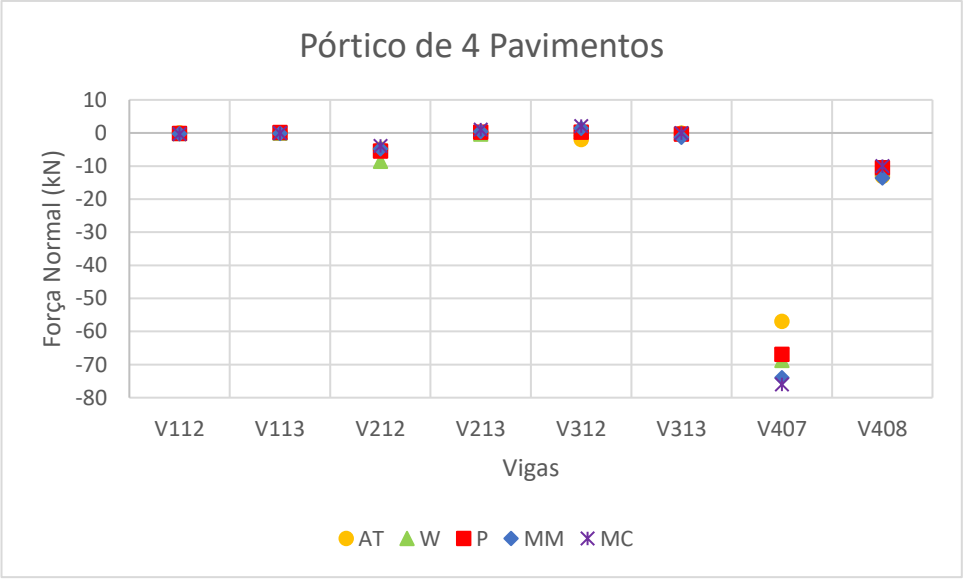
4.2.2 Análise dos esforços solicitantes

A seguir, são apresentados dos resultados dos esforços solicitantes (Força normal, Força Cortante e Momento fletor) para os modelos analisados. No Apêndice, constam as tabelas com as bases de dados que geraram os gráficos desta seção.

4.2.2.1 Força Normal

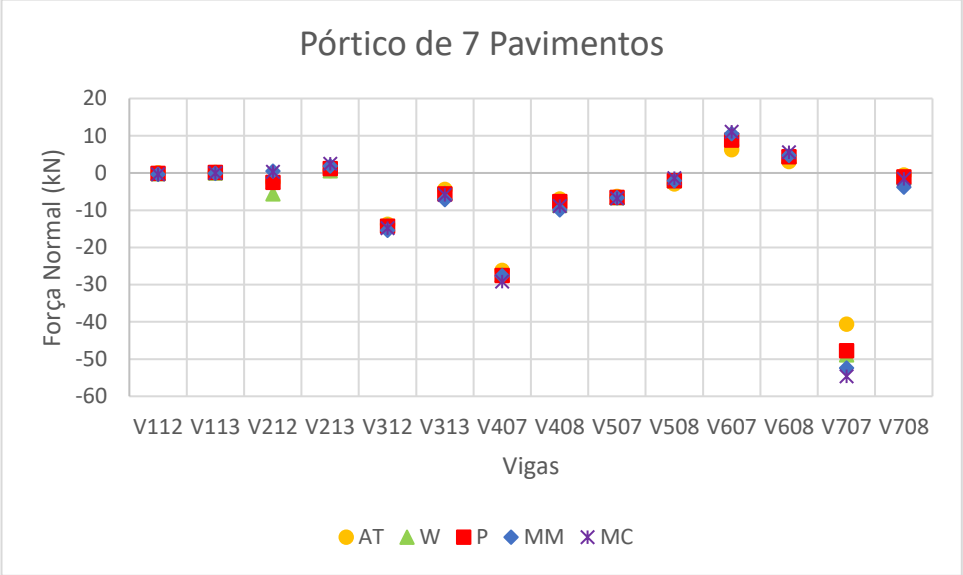
Nos Gráficos 7, 8 e 9 estão apresentadas as forças normais nas vigas dos pórticos de 4, 7 e 11 andares, respectivamente, para todos os modelos analisados. Observa-se que, na análise tridimensional, o tipo de modelo não influenciou no resultado da força normal nas vigas em geral, sendo que o modelo de Pasternak foi o que mais se aproximou do modelo de Apoios Teóricos, e o modelo do Meio Contínuo o que mais se distanciou. Esses resultados contrariam os encontrados por Siqueira (2019), que realizou a mesma análise no plano, e foi observado que o tipo de modelo influenciou no resultado da força normal nas vigas de forma mais significativa no primeiro pavimento, sendo que a maior diferença percentual foi obtida para o Modelo de Winkler, em comparação com o modelo de Apoios Teóricos. Na modelagem tridimensional não foi observada influência nos resultados de força normal nas vigas do primeiro pavimento.

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



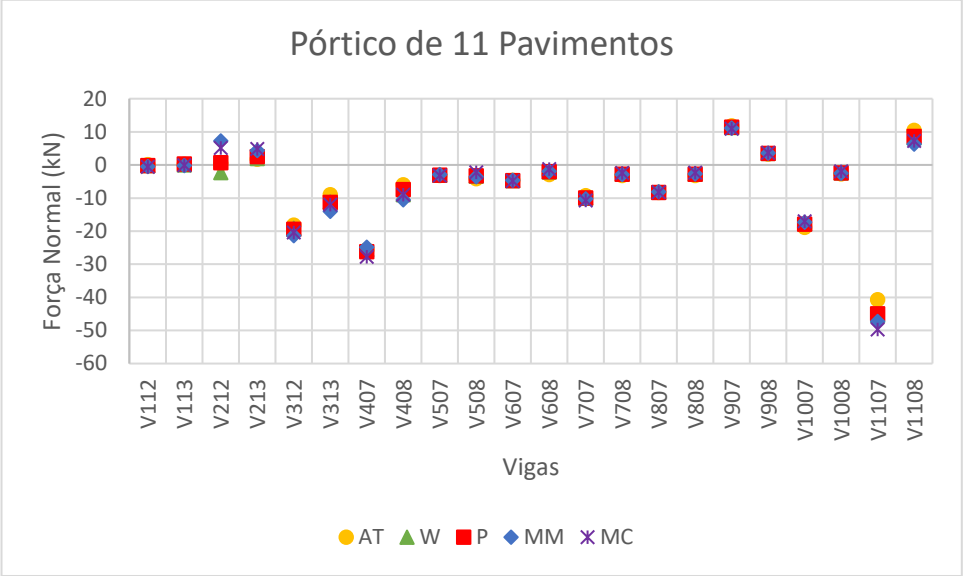
Fonte: Autora.

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



Fonte: Autora.

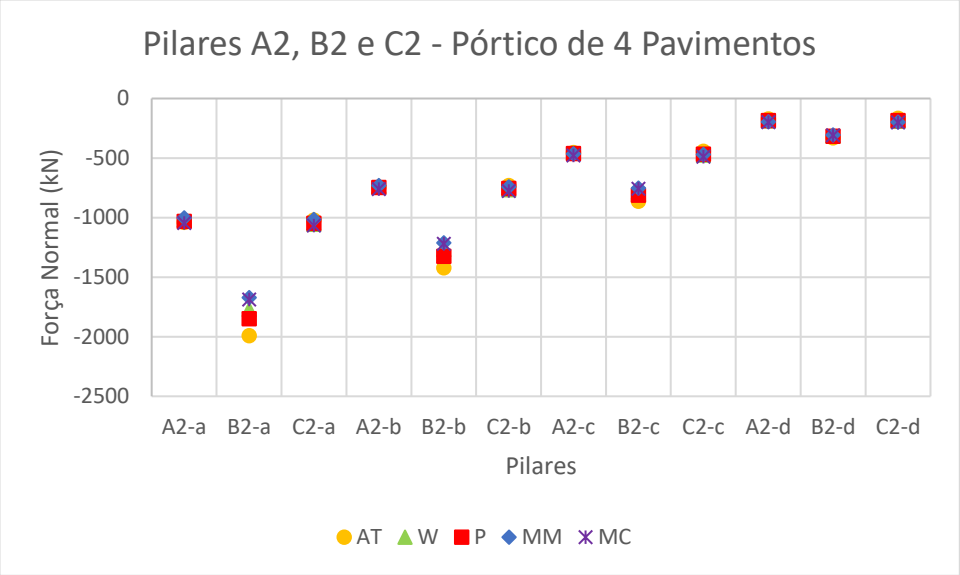
Gráfico 9 - Força Normal nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: Autora.

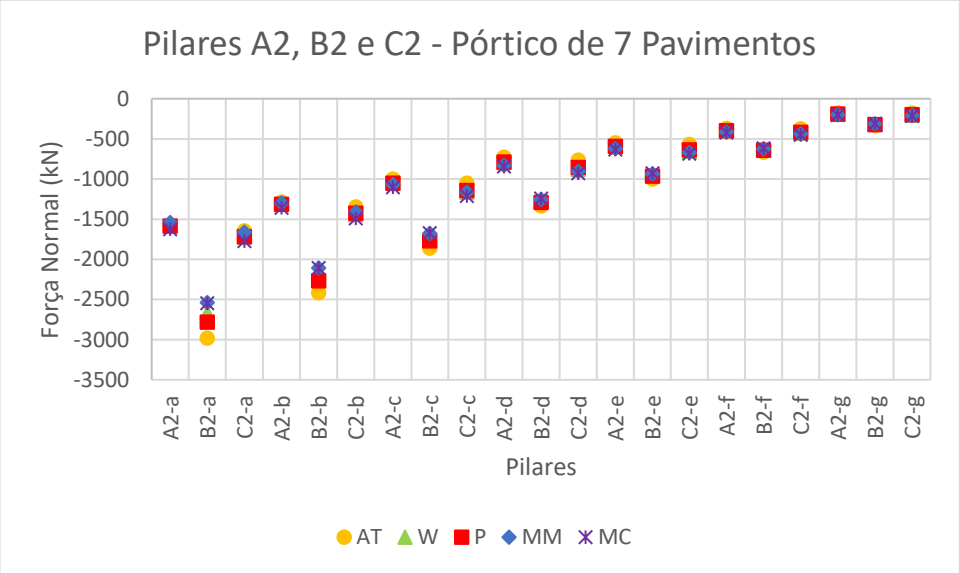
Nos Gráficos 10, 11 e 12 estão apresentadas as forças normais nos pilares dos pórticos de 4, 7 e 11 andares, respectivamente, para todos os modelos analisados. Observa-se que a consideração da ISE ocasionou uma redistribuição de esforços, com consequente alívio para o pilar central B2, em especial nos primeiros andares do pilar central B2. Essa redistribuição foi mais acentuada no modelo de Meio Contínuo e menos acentuada no modelo de Pasternak. Na modelagem no plano realizada foi Siqueira (2019), não foram observadas diferenças significativas para esse esforço.

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



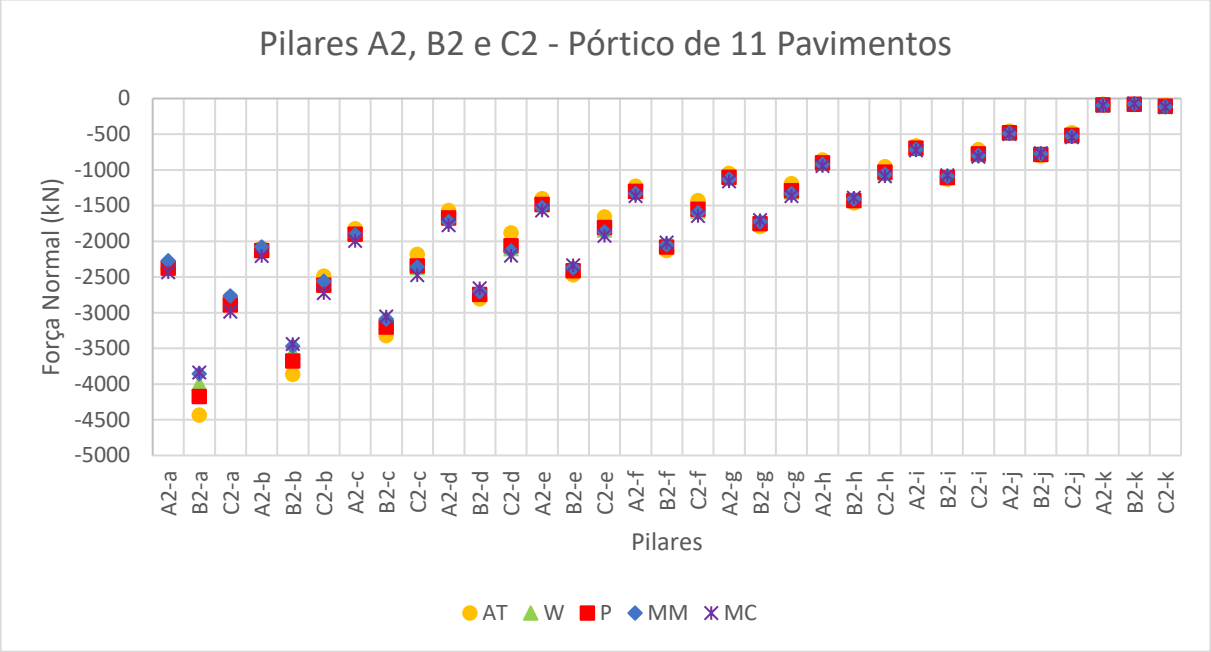
Fonte: Autora.

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



Fonte: Autora.

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

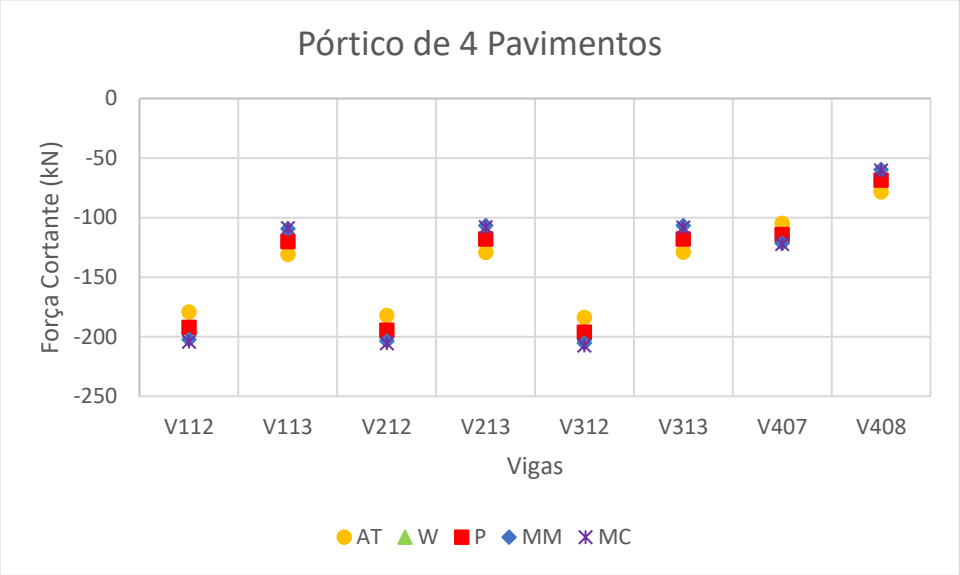


Fonte: Autora.

4.2.2.2 Força Cortante

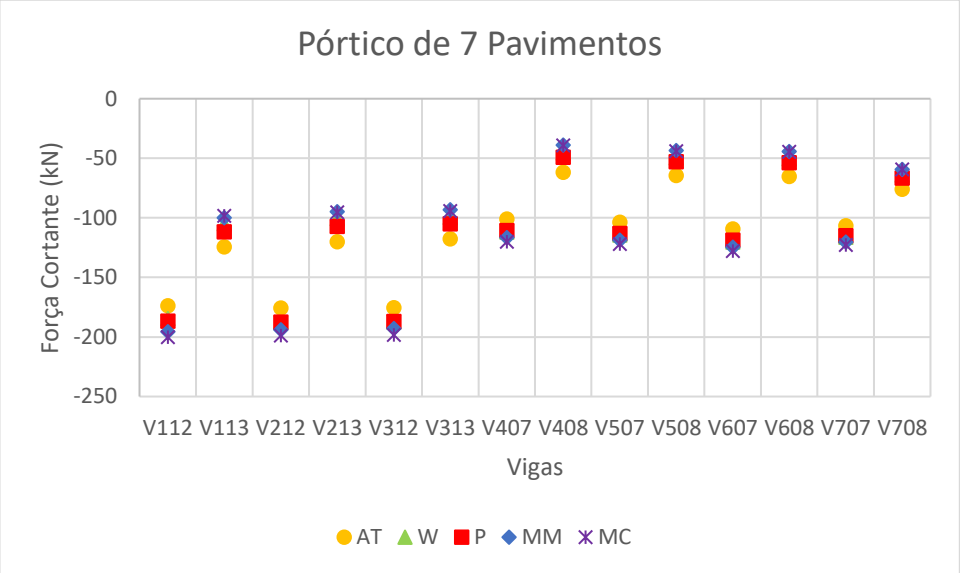
Nos Gráficos 13, 14 e 15 estão apresentadas as forças cortantes nas vigas dos pórticos de 4, 7 e 11 andares, respectivamente, para todos os modelos analisados. Observa-se que houve uma variação, mesmo que pequena, dos resultados de força cortante nas vigas entre os modelos estudados, sendo que o Pasternak foi o que mais se aproximou do modelo de Apoios Teóricos e o Meio Contínuo o que mais se distanciou. Observa-se que a altura do pórtico também influenciou nos valores de força cortante das vigas, uma vez que, para um mesmo modelo, a variação é maior quanto maior o número de pavimentos. Siqueira (2019) observou que, nem o tipo de modelo e nem o número de pavimentos, alteram de forma significativa os valores da força cortante nas vigas.

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



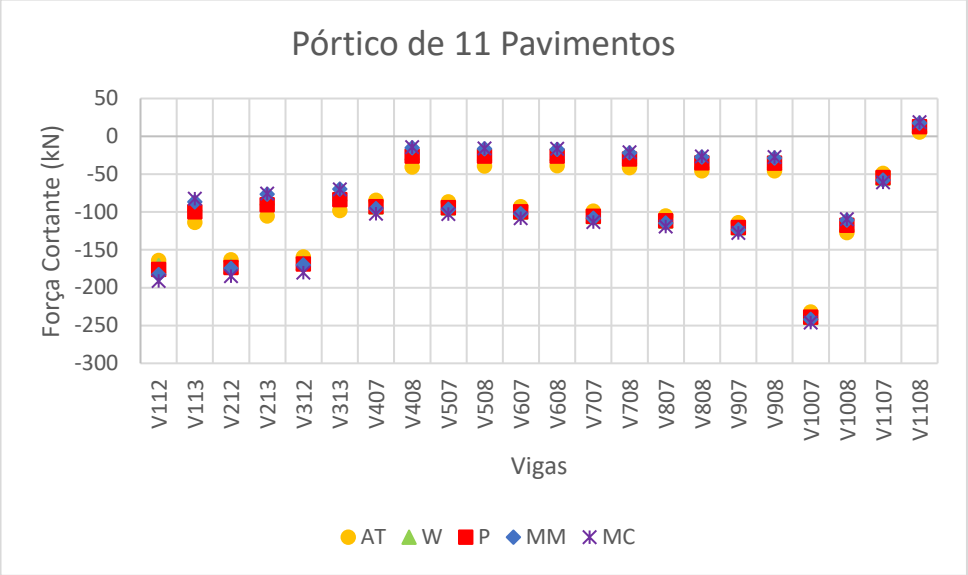
Fonte: Autora.

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



Fonte: Autora.

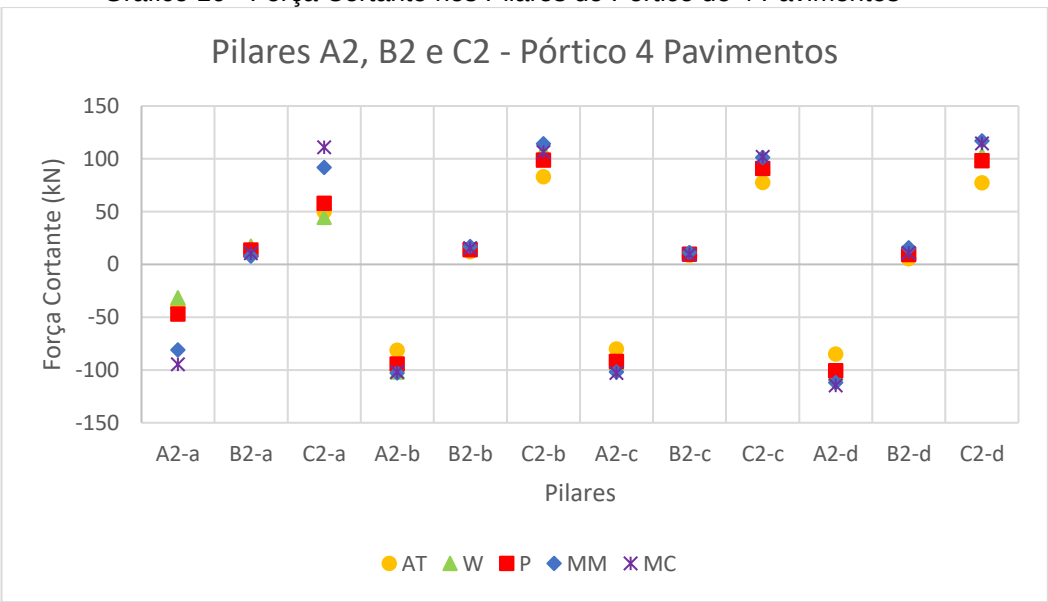
Gráfico 15 - Força Cortante nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: Autora.

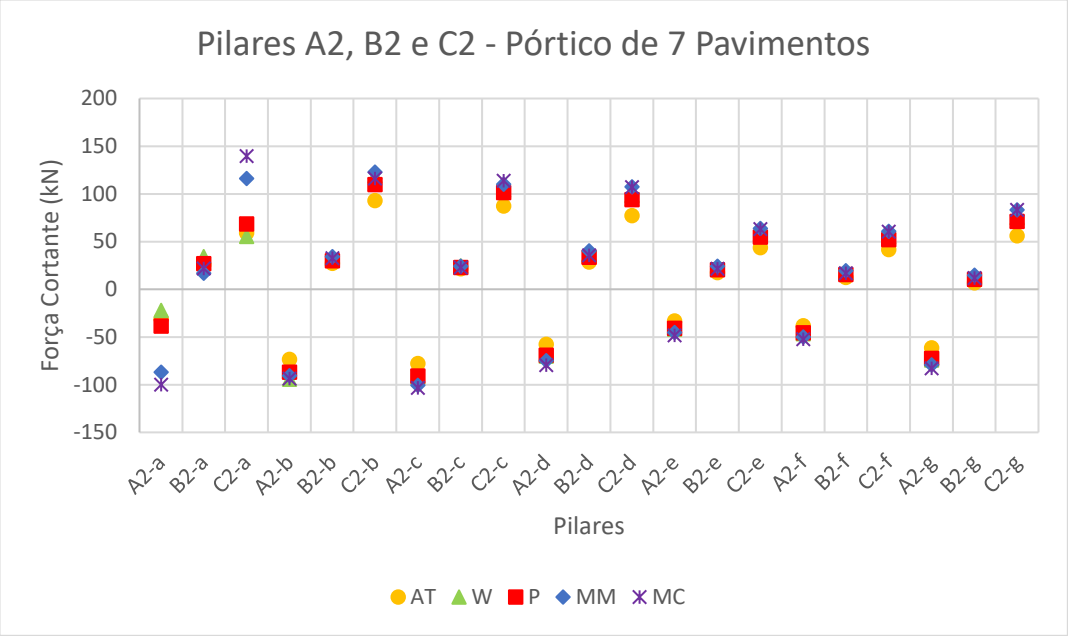
Todavia, para os pilares, conforme apresentado nos Gráficos 16, 17 e 18 abaixo, o modelo adotado influenciou de maneira mais significativa nos valores de força cortante obtidos, sendo que o Pasternak foi o que mais se aproximou do modelo de Apoios Teóricos e o Meio Contínuo o que mais se distanciou. O aumento da altura do pórtico acarretou no aumento da diferença percentual dos resultados de força cortante na base dos pilares das extremidades (A2 e C2) comparando os modelos ISE com o modelo de apoios teóricos.

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



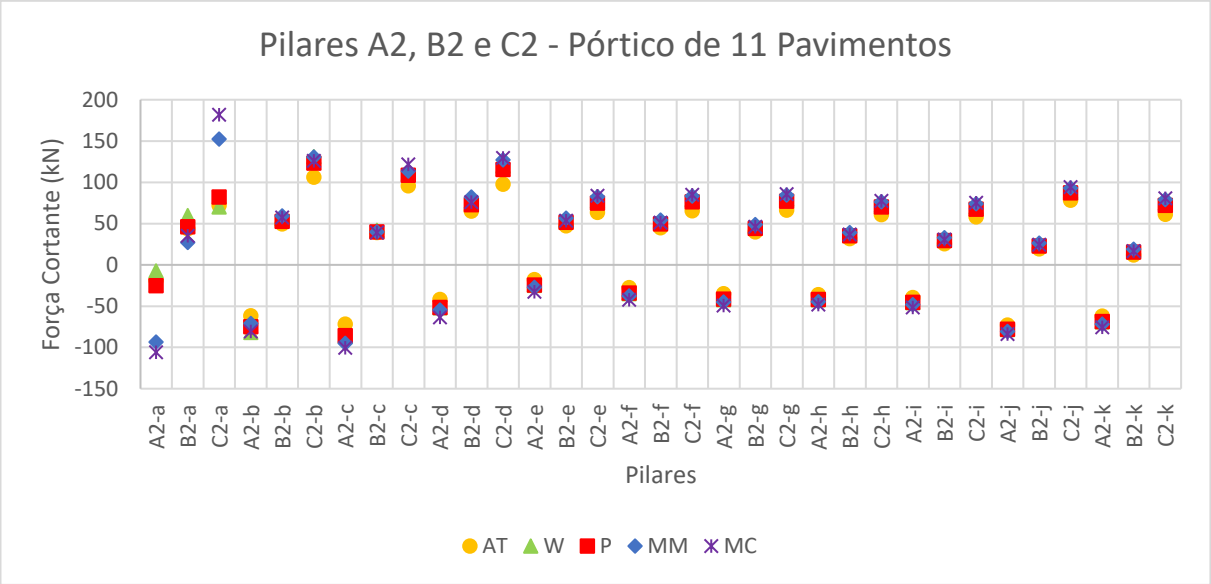
Fonte: Autora.

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



Fonte: Autora.

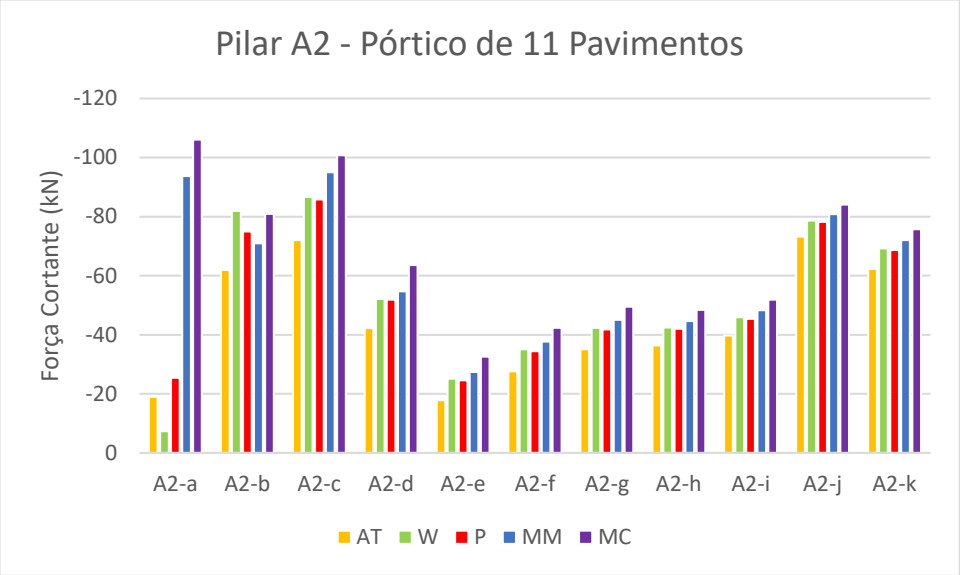
Gráfico 18 - Força Cortante nos Pilares do Pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: Autora.

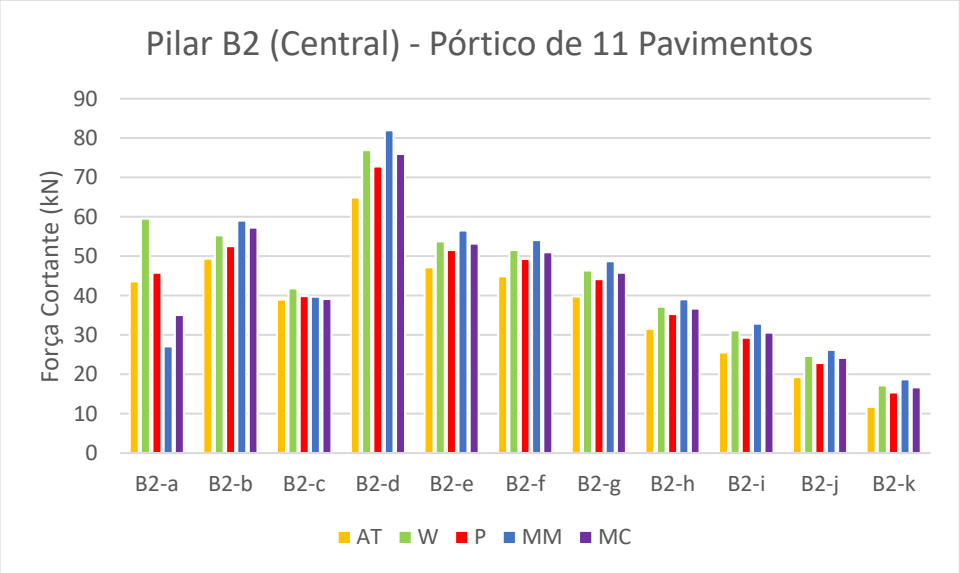
Nos Gráficos 19, 20 e 21 estão apresentados os valores das forças cortantes obtidos para os pilares A2, B2 e C2 considerando o pórtico de maior altura. É possível perceber facilmente as diferenças obtidas entres os modelos, as quais são mais significativas nos primeiros pavimentos dos pilares das extremidades.

Gráfico 19 - Força Cortante no Pilar A2 - Pórtico de 11 Pavimentos



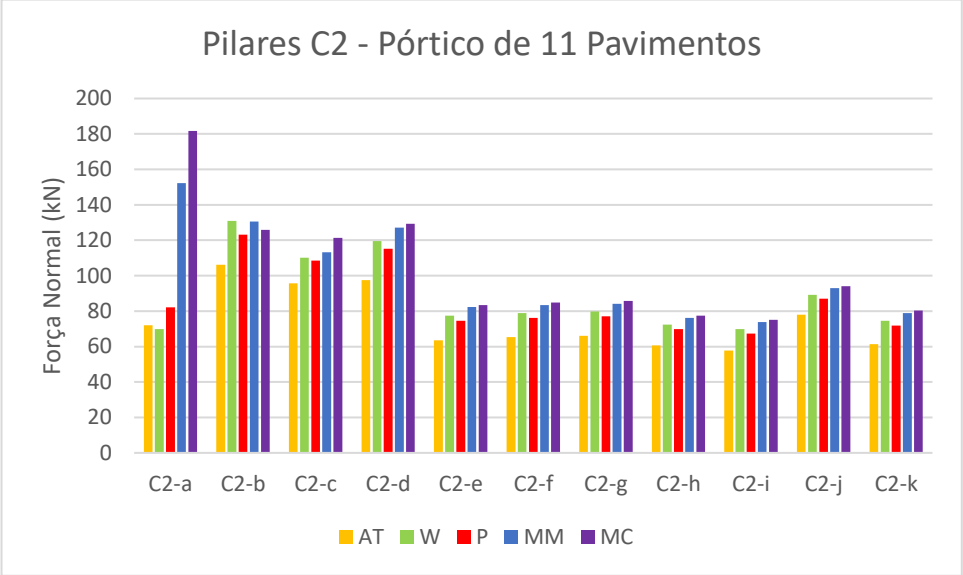
Fonte: Autora.

Gráfico 20 - Força Cortante no Pilar B2 - Pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: Autora.

Gráfico 21 - Força Cortante no Pilar C2 - Pórtico de 11 Pavimentos

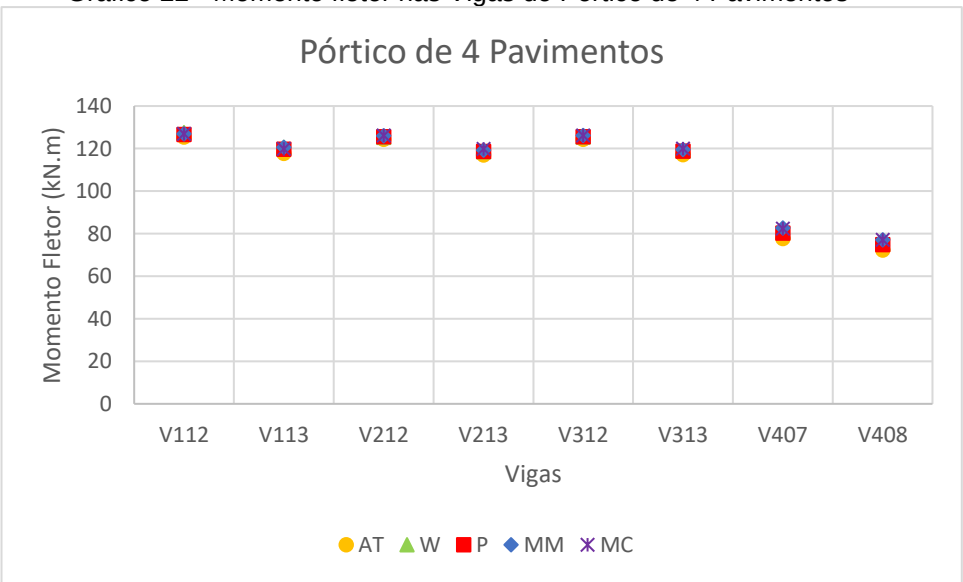


Fonte: Autora.

4.2.2.3 Momento Fletor

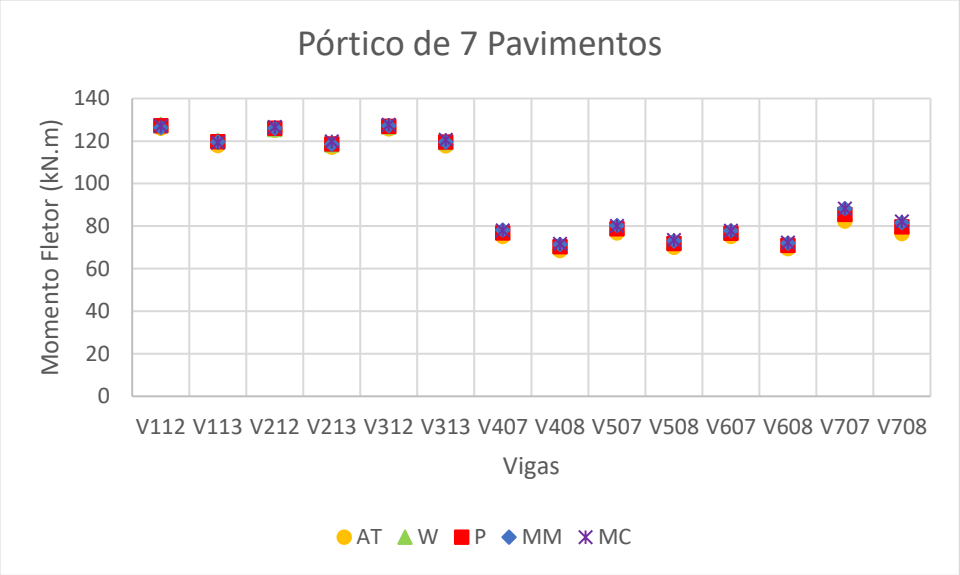
Os resultados obtidos de momentos fletores nas vigas dos pórticos não apresentaram variação significativa para os diferentes modelos estudados, tampouco devido à variação da altura do edifício, como é demonstrado nos Gráficos 22, 23 e 24 abaixo.

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



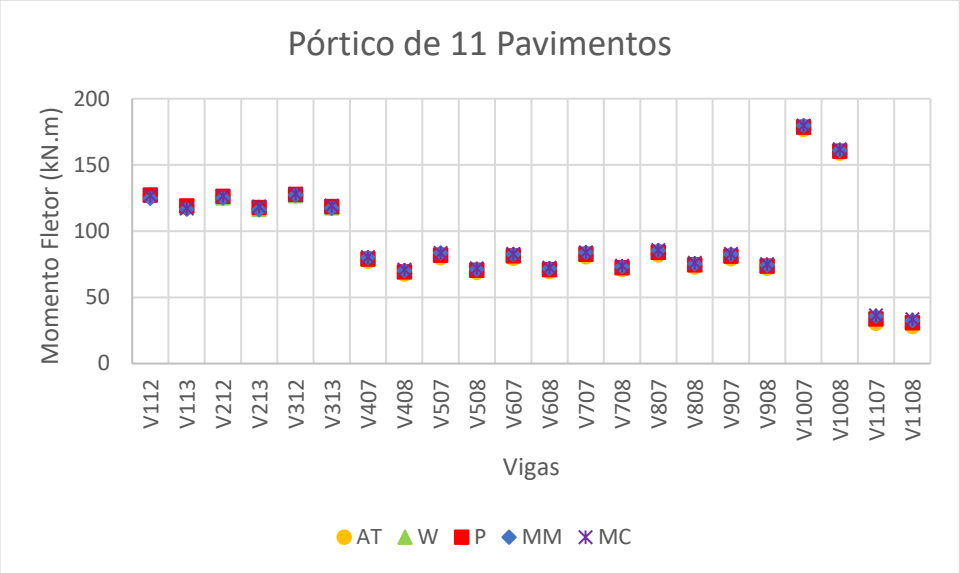
Fonte: Autora.

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



Fonte: Autora.

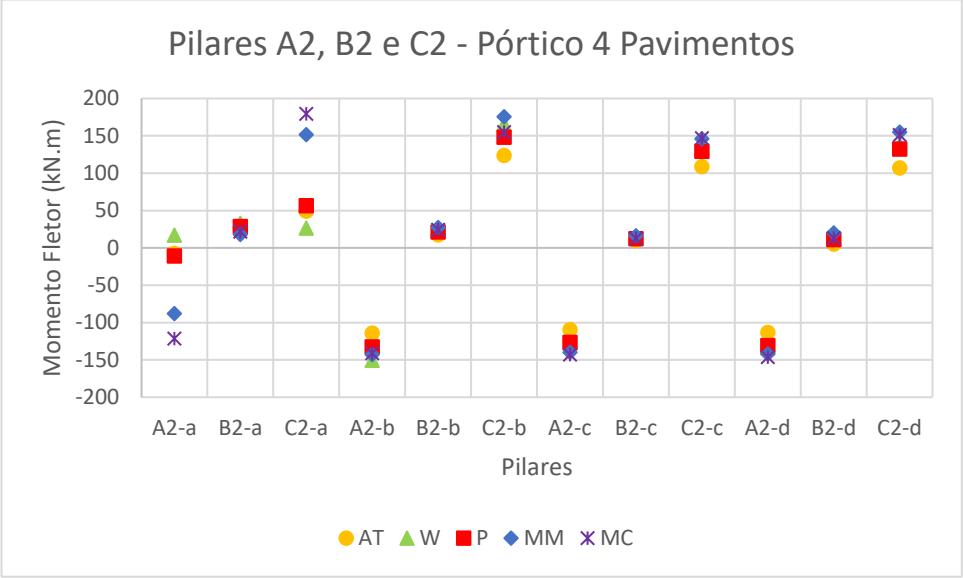
Gráfico 24 - Momento fletor nas Vigas do Pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: Autora.

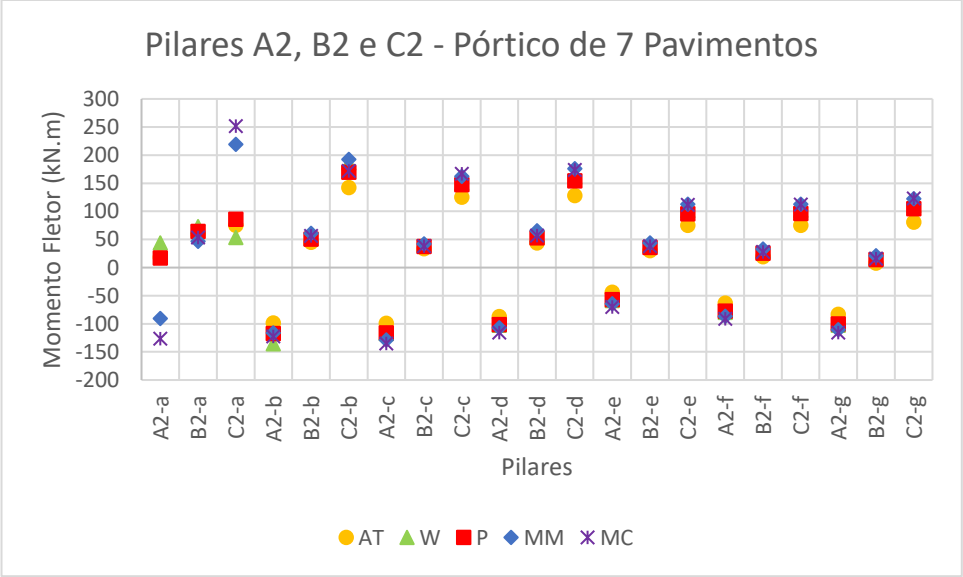
Já para os pilares, pode-se afirmar com base nos Gráficos 25, 26 e 27 que o tipo de modelo escolhido influencia os resultados de momento fletor para os pilares. As maiores diferenças percentuais foram encontradas na base dos pilares de extremidade (A2-a e C1a).

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



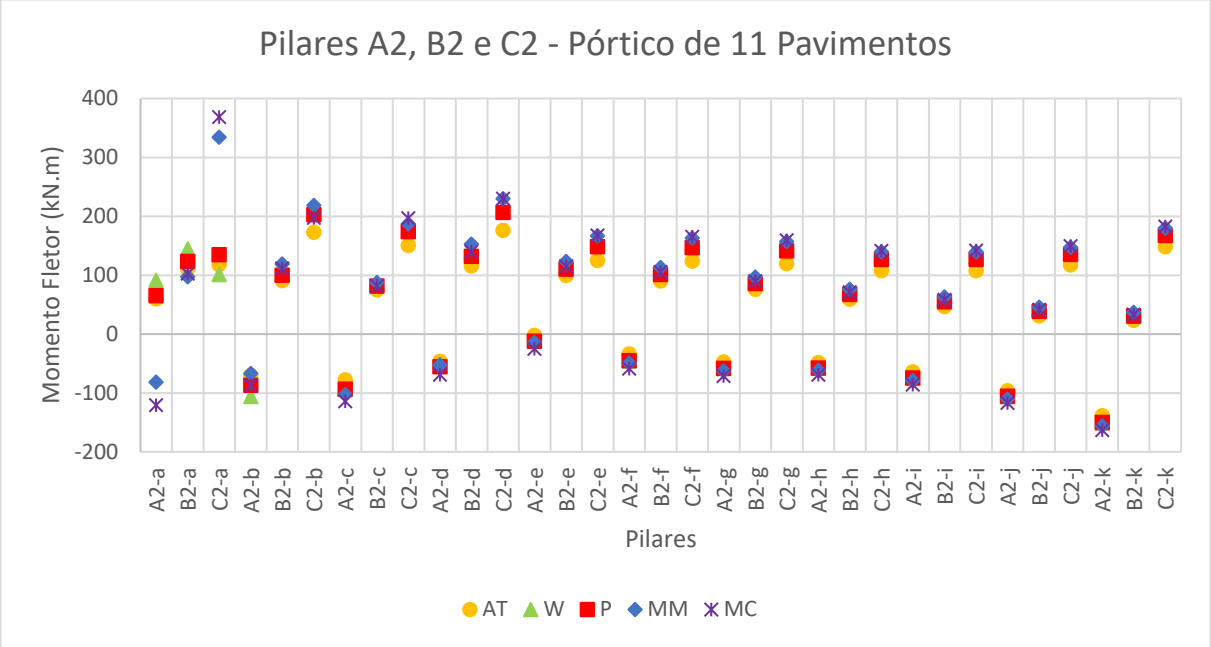
Fonte: Autora.

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



Fonte: Autora.

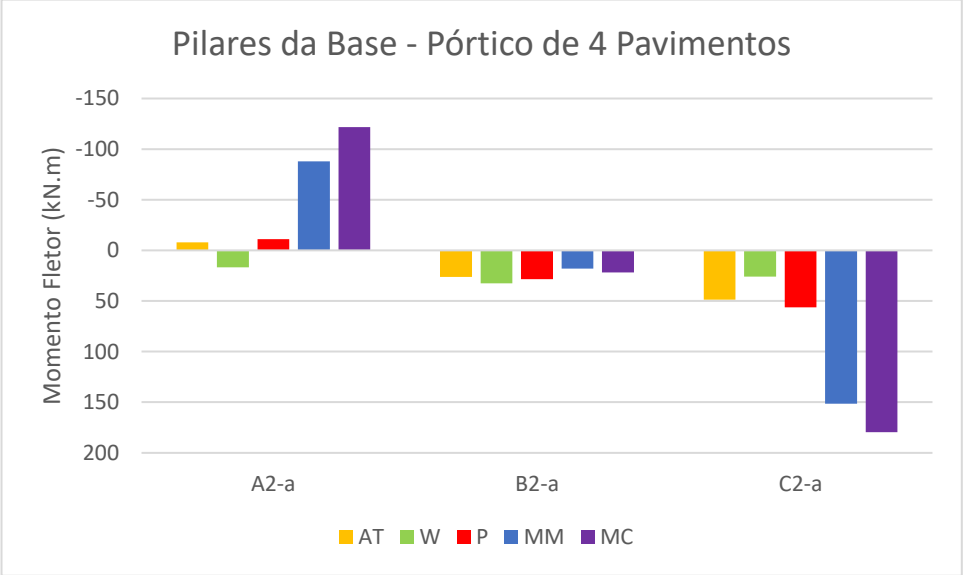
Gráfico 27 – Momento Fletor nos Pilares do Pórtico de 11 Pavimentos



Fonte: Autora.

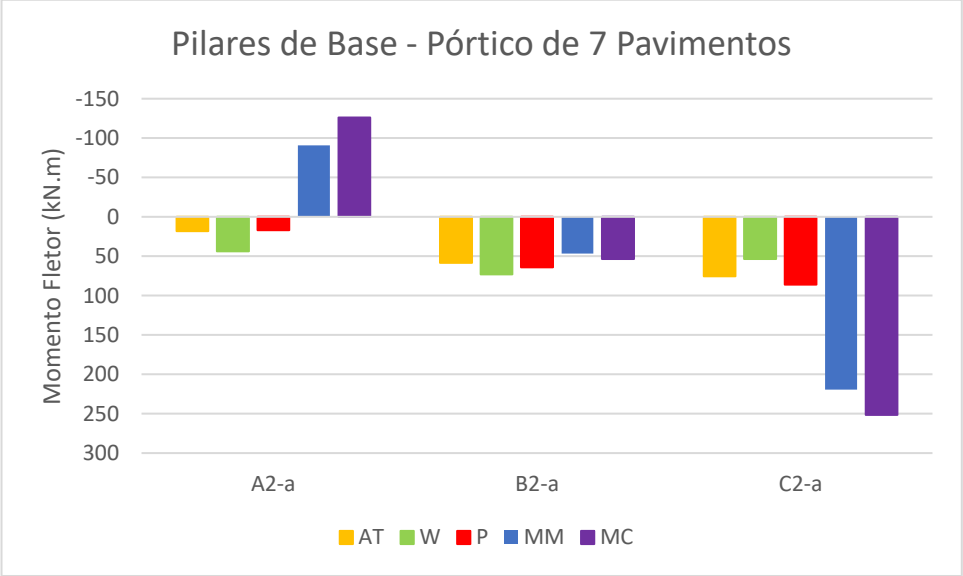
De acordo com os Gráficos 28, 29 e 30, observa-se, conforme afirmado anteriormente, que os resultados obtidos são diferentes para cada modelo estudado, sendo que a diferença é mais significante para os pilares de extremidade (A2 e C2). Para o pilar central (B2), os valores obtidos para todos modelos são próximos. Ainda, tem-se que o modelo de Pasternak é aquele que mais se aproxima do modelo que considera os Apoios Teóricos, e o modelo do Meio Contínuo é o que apresenta valores mais distantes. Ressalta-se, ainda, que houve uma inversão de sinal nos resultados obtidos para o pilar A2 quando são comparados os resultados de diferentes modelos, fato esse que influencia diretamente no dimensionamento do pilar.

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



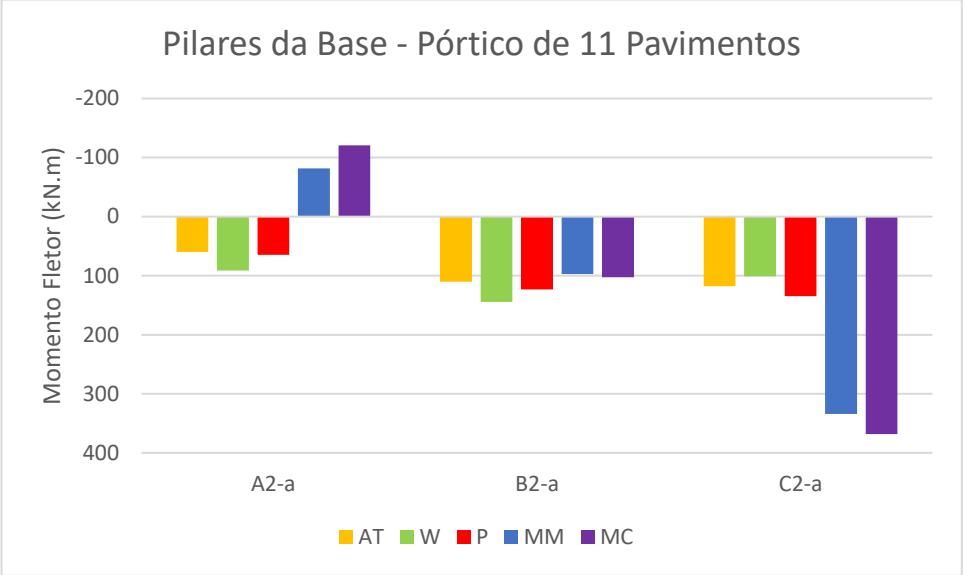
Fonte: Autora.

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



Fonte: Autora.

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



Fonte: Autora.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os quatro modelos de interação solo estrutura estudados resultaram em diferentes valores absolutos de deslocamentos verticais e horizontais dos nós das estruturas, sendo que para todos os pórticos tridimensionais analisados, os deslocamentos foram maiores no modelo Malha de Molas.

Os recalques diferenciais solicitam a estrutura e as diferenças encontradas para cada modelo refletem nos resultados dos esforços solicitantes. A rigidez da estrutura contribui para a uniformização dos recalques, reduzindo a variação percentual dos esforços solicitantes entre os modelos ao analisar os pavimentos superiores, sendo que as maiores diferenças percentuais são encontradas na base do pórtico.

Como era esperado, os deslocamentos horizontais nos nós da base para o modelo de Apoios Teóricos ou convencionais é igual a zero. Observa-se que os deslocamentos dos nós da base no modelo de Pasternak não apresentam um diferencial de deslocamento, o que faz com que os esforços solicitantes obtidos nesses modelos se aproximem com os resultados dos modelos de Apoio Teóricos. Isso ocorre devido ao efeito de diafragma rígido do modelo de Pasternak, no qual as deformações ocorrem apenas sob tensões de cisalhamento. A Tabela 9 apresenta os deslocamentos horizontais obtidos nos nós da base de todos os modelos estudados.

As lajes de todos os pórticos espaciais foram consideradas como diafragmas rígidos, sendo observada uma uniformidade entre os deslocamentos horizontais dos nós de um mesmo pavimento. Considerando a modelagem tridimensional, os resultados do modelo de Pasternak, em termos de deslocamentos e esforços solicitantes, foram os que mais se aproximaram do modelo de Apoios Teóricos, diferente do que ocorreu nos resultados de Siqueira (2019) considerando a modelagem no plano.

Tabela 9 – Deslocamentos Horizontais nos nós (Dy) em mm

Pórtico de 4 Pavimentos					
Nó	AT	W	P	MM	MC
Nº	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
N10	0,00	-0,34	0,11	2,23	0,25
N11	0,00	0,19	0,11	2,61	0,59
N12	0,00	0,67	0,11	3,68	0,80
Pórtico de 7 Pavimentos					
Nó	AT	W	P	MM	MC
Nº	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
N10	0,00	-0,20	0,22	4,82	0,73
N11	0,00	0,38	0,22	5,07	1,11
N12	0,00	0,83	0,22	6,17	1,20
Pórtico de 11 Pavimentos					
Nó	AT	W	P	MM	MC
Nº	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
N10	0,00	0,04	0,42	8,93	1,53
N11	0,00	0,67	0,42	9,02	2,00
N12	0,00	1,07	0,42	10,09	1,85

Fonte: Autora

Quanto ao número de pavimentos, tem-se que a altura do pórtico tridimensional influenciou nos deslocamentos horizontais dos nós para os diferentes tipos de modelo de interação solo-estrutura, mas não influenciou nos deslocamentos verticais.

Com relação aos esforços solicitantes (força normal, força cortante e momento fletor) para as vigas, a consideração da ISE não influenciou significativamente nos resultados obtidos. Já para os pilares, mesmo adotando os mesmos parâmetros em todos os modelos, observa-se uma variação significativa nos resultados dos esforços solicitantes, principalmente nos primeiros pavimentos. Ainda, houve uma inversão de sinais nos resultados de momentos fletores obtidos para o pilar A2 (pilar da esquerda), o que influencia no dimensionamento do pilar.

Em relação à comparação entre os pórticos com diferentes alturas, pode-se dizer que a rigidez da estrutura influencia significativamente os elementos estruturais mais próximos da fundação.

Em todas as análises, o modelo ISE que mais se aproximou dos resultados obtidos pelo método convencional utilizando Apoios Teóricos foi o modelo de Pasternak. O

modelo do Meio Contínuo apresentou a maior diferença percentual na maioria dos casos quando comparado com o modelo de Apoios Teóricos.

O único modelo que permite realizar uma análise de tensões é o modelo de Meio Contínuo, uma vez que utiliza elementos sólidos na modelagem do solo. Para os demais modelos, tem-se apenas os resultados de deformações nas molas.

A modelagem do solo como Meio Contínuo é considerada como a mais complexa e que leva maior tempo de processamento. Os modelos de Winkler e Malha de Molas são mais simples e conduzem a valores intermediários entre os modelos de Pasternak e Meio Contínuo.

Os modelos que consideram ISE mostram uma redistribuição significativa nos esforços da fundação e sugerem que a não consideração desses efeitos na estrutura pode levar a projetos que não atendam às especificações de norma quanto aos parâmetros de estabilidade e deslocamentos globais da estrutura, o que precisa ser avaliado em pesquisas futuras.

As grandes diferenças percentuais obtidas entre os modelos podem ter ocorrido devido ao dimensionamento das sapatas realizado apenas para o pórtico de maior altura, ou devido ao cálculo do coeficiente de mola por meio de correlações. Como sugestão para trabalhos futuros, fica a indicação para realização do redimensionamento das sapatas para cada edifício, bem como realizar um processo iterativo até que haja a estabilidade dos recalques ou dos coeficientes de mola.

6 CONCLUSÃO

O objetivo principal do estudo foi investigar a influência da consideração da interação solo-estrutura (ISE) nas respostas de elementos estruturais de pórticos espaciais de aço com fundação rasa tipo sapata, obtidas por uma análise de segunda ordem elástica. Para tanto, os resultados de deslocamentos verticais e horizontais nos pavimentos, dos recalques diferenciais na base e dos esforços solicitantes nas vigas e nos pilares, obtidos por quatro tipos de modelos que levam em consideração os efeitos da rigidez do solo (Winkler, Pasternak, Malha de Molas e Meio Contínuo), foram comparados com os resultados obtidos considerando as condições de Apoios Teóricos Convencionais.

O modelo de Winkler considerou a ISE por meio de molas isoladas na fundação. O modelo de Pasternak considerou a interação entre as molas por meio de uma placa elástica que sofre apenas deformação transversal de cisalhamento. O modelo de Malha de Molas levou em conta a interconexão das molas horizontais e verticais, formando-se cubos de molas, sendo possível simular a continuidade do solo sem a introdução de outros elementos estruturais. E, finalmente, o modelo de Meio Contínuo que idealizou o solo como elemento sólido elástico contínuo tridimensional. Somente o modelo de Winkler não considerou a influência que uma fundação causa na outra no modelo estrutural.

Três pórticos espaciais de aço com diferentes alturas foram analisados, utilizando para cada um, os quatro tipos de modelos para simular a flexibilidade do solo, a fim de avaliar o comportamento da estrutura à medida que sua rigidez aumenta e demonstrar a importância da consideração da ISE na análise. A partir da avaliação do efeito da altura do edifício nos modelos ISE, pôde-se observar que a rigidez da estrutura tem influência significativa nos elementos estruturais mais próximos da fundação, ou seja, o aumento de rigidez não é linear ao longo da altura do edifício.

Como esperado, os menores valores de deslocamentos horizontais e verticais foram obtidos no modelo de Apoios Teóricos. O modelo de Pasternak apresentou os deslocamentos mais próximos do modelo convencional (sem ISE). O Modelo de Malha de Molas apresentou os maiores deslocamentos nas direções horizontal e vertical.

A força normal solicitante nos pilares sofreu alterações significativas quando da consideração da deformabilidade do solo, ocorrendo uma transferência desse esforço

para os pilares periféricos e alívio do pilar central, cuja fundação apresentou maior assentamento.

Os valores da força cortante na base dos pilares periféricos apresentaram uma diferença significativa ao comparar os resultados obtidos nos modelos de Malha de Molas e Meio Contínuo com aqueles obtidos no modelo de Apoios Teóricos.

O momento fletor nos pilares localizados na base dos edifícios foi o esforço solicitante que apresentou maior variação e diferença percentual na comparação dos modelos ISE em relação aos modelos com apoios teóricos.

Com relação às vigas dos pórticos, observou-se que o tipo de modelo praticamente não teve influência nos resultados dos esforços solicitantes (força normal, força cortante e momento fletor).

Dentre os modelos ISE estudados neste trabalho, o modelo do Meio Contínuo é o único que fornece informações sobre a distribuição de tensões ao longo da profundidade do solo. Este modelo, quando comparado aos demais, é mais adequado para avaliar respostas relacionadas ao solo, o que lhe confere maior confiabilidade. Todavia, essa modelagem é mais complexa e o tempo de processamento é maior. O modelo de Malha de Molas possui uma implementação mais simples e apresentou uma semelhança quanto aos resultados obtidos no Meio Contínuo. Já o modelo de Pasternak foi aquele que se apresentou mais próximo do modelo de Apoios Teóricos em todos os casos.

A ISE é essencial para obter respostas razoavelmente precisas tanto de recalques do solo, quanto dos deslocamentos nos nós e esforços solicitantes nos elementos estruturais. A não consideração da flexibilidade do solo na análise pode levar a superestimação ou subestimação dos esforços solicitantes reais desses elementos.

A análise tridimensional levou a resultados coerentes com aqueles apresentados por Siqueira (2019) ao analisar os mesmos pórticos no plano, portanto, a simplificação para o modelo bidimensional, nesse estudo de caso, não apresentou prejuízos na análise do comportamento dos pórticos.

Por fim, deve-se ressaltar que as conclusões deste estudo partem do pressuposto de que o solo é um material linear elástico. Os coeficientes de segurança são empregados para levar em consideração a variabilidade dos atributos do solo. Essa variabilidade pode levar a recalques diferenciais que, na prática, podem causar danos à estrutura. Logo, como sugestão para trabalhos futuros, os resultados obtidos no

presente trabalho devem ser comparados com resultados de análises em que o solo é modelado como um material não linear. Além disso, outros fatores como efeito de edificações vizinhas e sequência construtiva não foram considerados nesse estudo e podem ser abordados em pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

ANTONIAZZI, Juliana Pippi et al. *Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais*. 2011. 138 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122 – Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122 – Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6489 – Prova de Carga Direta sobre Terreno de Fundação - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

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, ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16055 – Parede de Concreto Moldada no Local para a Construção de Edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

BOWLES, J. E. *Foundation Analysis and Design*. 4. ed.. New York: McGraw-Hill,1988.

CABRAL, Marcelo Perez. Análise do Comportamento de um Edifício Apoiado em Fundação Direta na Orla de Santos. p. 169, 2018.

CAPUTO, Homero Pinto. *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*. 6ª edição ed. [S.l: s.n.], 1987.

COLARES, George Moura. *Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios*. 2006. 83 f. Universidade de São Paulo, 2006.

DALOGLU, Ayse T. *et al.* Optimum design of steel space frames including soil-structure interaction. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 54, n. 1, p. 117–131, 1 jul. 2016.

DIAS, Marianna Silva. Análise do Comportamento de Edifícios Apoiados em Fundação Direta no Bairro da Ponta da Praia na Cidade de Santos. p. 166, 2010.

DUTTA, Sekhar Chandra; ROY, Rana. A critical review on idealization and modeling for interaction among soil-foundation-structure system. *Computers and Structures*, v. 80, n. 20–21, p. 1579–1594, 2002.

FAR, Harry. Dynamic behaviour of unbraced steel frames resting on soft ground. *Steel Construction*, v. 12, n. 2, p. 135–140, 1 maio 2019.

GARG, Vivek; HORA, M S. A review on interaction behaviour of structure-foundation-soil system. *International Journal of Engineering Research and Applications*, v. 2, n. 6, p. 639–644, 2012.

GUIMARÃES, R. M. *Análise dos efeitos da interação solo-estrutura em edifícios estruturados em aço.* 2018. 182f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

GUSMÃO, Alexandre Duarte. *Estudo da interação solo-estrutura e sua influência em recalques de edificações*. 1990. 208 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

GUSMAO, Alexandre Duarte; Gusmão Filho, J. A. Avaliação da influência da interação solo-estrutura em edificações. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, v.2 p. 447-454, 1994.

HOLANDA JUNIOR, Osvaldo Gomes de. *Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armado sobre fundações diretas*. 1998. 180 f. Universidade de São Paulo, 1998.

IWAMOTO, Roberto Kunihiro. *Alguns Aspectos Dos Efeitos Da Interação Solo – Estrutura Em*

Edifícios De Múltiplos Andares Com Fundação Profunda. 2000. 136 f. Universidade de São Paulo, 2000.

KAUSEL, Eduardo. Early history of soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 30, n. 9, p. 822–832, 2010.

KAVITHA, P. E.; BEENA, K. S.; NARAYANAN, K. P. A review on soil–structure interaction analysis of laterally loaded piles. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 1, n. 1, 1 dez. 2016.

KIA DARBANDSARI, SAEED. HOJAT KASHANI, Ata. A critical review on structure-soil-structure interaction. *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*, v. 8, n. 2, p. 57–62, 2018.

KRYSTOSIK, Przemysław. Influence of Supporting Joints Flexibility on Statics and Stability of Steel Frames. *International Journal of Steel Structures*, v. 18, n. 2, p. 433–442, 1 jun. 2018.

MITROPOULOU, Chara Ch. *et al.* Influence of soil–structure interaction on fragility assessment of building structures. *Structures*, v. 6, p. 85–98, 2016.

NIKOLAOU, K D; GEORGIADIS, K; BISBOS, C D. Lower bound limit analysis of 2D steel frames with foundation-structure interaction. *Engineering Structures*, v. 118, p. 41–54, 2016.

PORTO, Thiago Bonjardim. *Estudo da Interação de Paredes de Alvenaria Estrutural Com a Estrutura De Fundação*. 2010. 221 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

REIS, Jeselay. *Interação Solo - Estrutura De Grupo De Edifícios Com Fundações*. 2000. 131 f. Universidade de São Paulo, 2000.

RITTER, M G *et al.* Analysis of soil-structure interaction in buildings with deep foundation. *IBRACON Structures and Materials Journal*, v. 13, n. 2, 2020.

SILVA, Nelson Urias Pinto Da. *Análise de tensões verticais em edifícios de alvenaria estrutural considerando interação solo-estrutura*. 2006. 105 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

SILVA, Renata Gomes Lanna Da. *Avaliação dos efeitos de 2ª ordem em edifícios de aço utilizando métodos aproximados e análise rigorosa*. 2004. 155 f. Universidade Federal de Minas Geras, 2004.

SIQUEIRA, Dayene Cardoso De. *Avaliação dos Efeitos de 2ª ordem em Pórticos Planos de Aço Considerando Apoios Teóricos e Interação Solo-Estrutura*. 2019. 161 f. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2019.

TAPIA-HERNÁNDEZ, Edgar; DE JESÚS-MARTÍNEZ, Yesenia; SOLA, Luciano Fernández. Dynamic soil-structure interaction of ductile steel frames in soft soils. *Advanced Steel Construction*, v. 13, n. 4, p. 361–377, 2017.

TEIXEIRA, A.H., GODOY, N.S. de; *Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas* In: HACHICH, W. et al. Fundações: Teoria e Prática. 2. ed. São Paulo: PINI, 1996. 93

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. de; *Análise, projeto e execução de fundações rasas.* Fundações: teoria e prática; 2ª edição; PINI; São Paulo; 1998. 227-264 p.

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

VELLOSO, Dirceu De Alencar; LOPES, Francisco De Rezende. *Fundações: critérios de projeto, investigação de subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. São Paulo: [s.n.], 2011.

VIVEK, B.; RAYCHOWDHURY, Prishati. Influence of SSI on period and damping of buildings supported by shallow foundations on cohesionless soil. *International Journal of Geomechanics*, v. 17, n. 8, 1 ago. 2017.

YESANE, Prakash M; GHUGAL, Y M; WANKHADE, R L. Study on soil-structure interaction : A review. *International Journal of Engineering Research*, v. 5, n. 3, p. 1–6, 2016.

APÊNDICE

Tabela 10 - Deslocamentos Horizontais nos nós (Dy) - Pórticos de 4 Pavimentos

Deslocamentos Horizontais nos nós - Pórtico de 4 Pavimentos						**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Nó	**Dy-AT**	**Dy-W**	**Dy-P**	**Dy-MM**	**Dy-MC**	**Dy-W**	**Dy-P**	**Dy-MM**	**Dy-MC**
Nº	mm	mm	mm	mm	mm				
N10	0,00	-0,34	0,11	2,23	0,25	-	-	-	-
N11	0,00	0,19	0,11	2,61	0,59	-	-	-	-
N12	0,00	0,67	0,11	3,68	0,80	-	-	-	-
35	0,47	1,11	0,78	3,63	1,54	135,96	65,53	672,13	227,87
46	0,47	1,11	0,78	3,63	1,54	135,96	65,53	672,13	227,87
57	0,47	1,11	0,78	3,63	1,54	135,96	65,53	672,13	227,87
36	1,09	2,17	1,70	5,06	2,78	98,35	55,95	363,74	154,76
47	1,08	2,15	1,70	5,06	2,78	98,71	56,37	366,42	156,09
58	1,08	2,14	1,69	5,05	2,77	98,70	56,63	367,93	157,09
37	1,52	3,01	2,46	6,39	3,85	98,35	62,23	321,49	153,53
48	1,51	3,01	2,46	6,39	3,85	98,88	62,52	322,54	154,20
59	1,51	3,01	2,46	6,40	3,85	99,47	62,87	323,49	154,93
38	1,80	3,82	3,16	7,83	4,91	111,83	75,62	334,81	172,35
49	1,71	3,71	3,06	7,71	4,80	117,21	79,33	351,52	180,80
60	1,63	3,62	2,98	7,61	4,70	122,34	82,81	366,97	188,77
					Máximos	135,96	82,81	672,13	227,87
					Mínimos	98,35	55,95	321,49	153,53
					Média	112,64	65,91	427,94	179,68

Fonte: Autora.

Tabela 11 - Deslocamentos Horizontais nos nós (Dy) - Pórticos de 7 Pavimentos

Deslocamentos Horizontais nos nós - Pórtico de 7 Pavimentos						**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Nó	**Dy-AT**	**Dy-W**	**Dy-P**	**Dy-MM**	**Dy-MC**	**Dy-W**	**Dy-P**	**Dy-MM**	**Dy-MC**
Nº	mm	mm	mm	mm	mm				
N10	0,00	-0,20	0,22	4,82	0,73	-	-	-	-
N11	0,00	0,38	0,22	5,07	1,11	-	-	-	-
N12	0,00	0,83	0,22	6,17	1,20	-	-	-	-
35	1,13	2,53	1,79	7,33	3,17	124,25	59,24	550,89	181,44
46	1,13	2,53	1,79	7,33	3,17	124,25	59,24	550,89	181,44
57	1,13	2,53	1,79	7,33	3,17	124,25	59,24	550,89	181,44
36	2,97	5,30	4,23	10,74	6,18	78,60	42,64	262,05	108,32
47	2,96	5,29	4,23	10,74	6,18	78,56	42,74	262,59	108,64
58	2,96	5,28	4,22	10,73	6,18	78,50	42,77	262,88	108,96
37	4,83	8,04	6,74	14,30	9,24	66,59	39,52	196,11	91,47
48	4,81	8,02	6,72	14,27	9,22	66,83	39,65	196,80	91,77
59	4,80	8,01	6,70	14,26	9,21	67,06	39,76	197,35	92,04
38	6,94	11,20	9,63	18,46	12,76	61,46	38,82	166,03	83,92
49	6,88	11,15	9,58	18,40	12,70	61,92	39,13	167,31	84,54
60	6,84	11,10	9,53	18,35	12,66	62,31	39,37	168,32	85,07
39	9,55	15,24	13,32	23,88	17,27	59,55	39,47	149,95	80,84
50	9,53	15,22	13,30	23,86	17,26	59,68	39,57	150,27	81,04
61	9,52	15,21	13,29	23,84	17,25	59,76	39,62	150,45	81,16
40	11,37	18,47	16,22	28,46	20,98	62,41	42,58	150,25	84,49
51	11,38	18,49	16,23	28,48	21,00	62,45	42,61	150,26	84,55
62	11,39	18,51	16,25	28,50	21,03	62,44	42,62	150,18	84,56
41	12,35	20,85	18,26	32,16	23,85	68,80	47,86	160,36	93,10
52	12,30	20,79	18,20	32,08	23,78	68,95	47,96	160,77	93,29
63	12,27	20,74	18,16	32,02	23,73	69,00	47,98	160,96	93,36
					Máximos	124,25	59,24	550,89	181,44
					Mínimos	59,55	38,82	149,95	80,84
					Média	74,65	44,40	234,07	103,59

Fonte: Autora.

Tabela 12 - Deslocamentos Horizontais nos nós (Dy) - Pórticos de 11 Pavimentos

Deslocamentos Horizontais nos nós - Pórtico de 11 Pavimentos						**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Nó	**Dy-AT**	**Dy-W**	**Dy-P**	**Dy-MM**	**Dy-MC**	**Dy-W**	**Dy-P**	**Dy-MM**	**Dy-MC**
Nº	mm	mm	mm	mm	mm				
N10	0,00	0,04	0,42	8,93	1,53	-	-	-	-
N11	0,00	0,67	0,42	9,02	2,00	-	-	-	-
N12	0,00	1,07	0,42	10,09	1,85	-	-	-	-
35	2,19	5,01	3,58	13,70	6,09	129,02	63,62	526,10	178,43
46	2,19	5,01	3,58	13,70	6,09	129,02	63,62	526,10	178,43
57	2,19	5,01	3,58	13,70	6,09	129,02	63,62	526,10	178,43
36	6,06	10,96	8,75	21,07	12,43	80,85	44,26	247,53	104,98
47	6,06	10,96	8,74	21,07	12,43	80,82	44,30	247,75	105,13
58	6,05	10,95	8,74	21,06	12,43	80,82	44,33	247,99	105,37
37	10,38	17,29	14,45	29,11	19,29	66,60	39,21	180,48	85,81
48	10,36	17,27	14,43	29,08	19,26	66,70	39,26	180,76	85,93
59	10,35	17,26	14,42	29,07	19,25	66,80	39,32	180,99	86,03
38	15,99	25,26	21,74	39,12	27,86	58,01	35,97	144,68	74,22
49	15,93	25,20	21,68	39,06	27,79	58,20	36,10	145,18	74,48
60	15,89	25,16	21,64	39,01	27,75	58,36	36,20	145,56	74,69
39	24,57	37,07	32,65	53,72	40,48	50,88	32,87	118,63	64,76
50	24,55	37,06	32,63	53,70	40,47	50,92	32,89	118,71	64,82
61	24,54	37,04	32,62	53,69	40,46	50,95	32,92	118,77	64,87
40	32,85	48,56	43,24	67,94	52,80	47,83	31,66	106,84	60,75
51	32,83	48,54	43,23	67,92	52,78	47,86	31,68	106,90	60,79
62	32,82	48,53	43,22	67,91	52,78	47,88	31,70	106,94	60,82
41	40,22	59,09	52,91	81,13	64,17	46,92	31,56	101,71	59,55
52	40,20	59,07	52,89	81,10	64,15	46,94	31,58	101,77	59,58
63	40,18	59,05	52,88	81,09	64,13	46,96	31,59	101,80	59,60
42	46,79	68,78	61,75	93,42	74,70	47,01	31,98	99,66	59,65
53	46,76	68,76	61,73	93,40	74,68	47,04	32,00	99,72	59,68
64	46,75	68,75	61,72	93,38	74,66	47,05	32,01	99,75	59,70
43	52,03	77,09	69,22	104,24	83,83	48,16	33,05	100,35	61,12
54	52,04	77,10	69,23	104,25	83,84	48,16	33,04	100,33	61,11
65	52,05	77,11	69,24	104,26	83,85	48,15	33,04	100,31	61,10
154	55,90	83,96	75,28	113,56	91,51	50,19	34,67	103,14	63,71
157	55,87	83,93	75,25	113,52	91,48	50,23	34,69	103,21	63,76
148	55,85	83,91	75,23	113,51	91,47	50,25	34,71	103,24	63,78
135	58,97	90,38	80,80	122,70	98,86	53,26	37,01	108,05	67,64
143	58,95	90,34	80,76	122,65	98,81	53,26	37,00	108,07	67,64
141	58,93	90,31	80,73	122,61	98,78	53,24	36,99	108,05	67,61
					Máximos	129,02	63,62	526,10	178,43
					Mínimos	46,92	31,56	99,66	59,55
					Média	61,74	37,83	167,13	80,12

Fonte: Autora.

Tabela 13 - Deslocamentos Verticais nos nós (Dz) - Pórticos de 4 Pavimentos

Deslocamentos Verticais nos 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				
N10	0,00	-18,35	-12,91	-37,00	-25,72	-	-	-	-
N11	0,00	-24,89	-18,35	-47,58	-36,08	-	-	-	-
N12	0,00	-18,77	-13,65	-39,49	-27,66	-	-	-	-
35	-1,10	-19,43	-14,00	-38,07	-26,83	1660,24	1168,39	3348,19	2330,16
46	-1,78	-26,47	-20,00	-49,08	-37,59	1383,91	1021,24	2650,84	2007,06
57	-1,09	-19,90	-14,76	-40,57	-28,79	1733,64	1260,09	3638,71	2553,46
36	-1,90	-20,22	-14,80	-38,84	-27,64	966,75	680,74	1949,82	1358,31
47	-3,06	-27,61	-21,19	-50,16	-38,69	802,91	592,94	1540,35	1165,04
58	-1,86	-20,71	-15,56	-41,35	-29,61	1012,68	736,11	2122,08	1491,30
37	-2,38	-20,70	-15,29	-39,34	-28,14	771,38	543,39	1555,60	1084,43
48	-3,83	-28,32	-21,92	-50,84	-39,37	639,30	472,25	1227,34	927,81
59	-2,33	-21,21	-16,06	-41,85	-30,13	810,00	588,80	1695,45	1192,66
38	-2,56	-20,90	-15,49	-39,55	-28,35	716,56	504,88	1444,80	1007,54
49	-4,13	-28,60	-22,20	-51,11	-39,64	592,78	437,86	1138,20	860,30
60	-2,51	-21,42	-16,26	-42,06	-30,35	753,91	548,13	1577,15	1110,01
					Máximos	1733,64	1260,09	3638,71	2553,46
					Mínimos	592,78	437,86	1138,20	860,30
					Média	987,00	712,90	1990,71	1424,01

Fonte: Autora.

Tabela 14 - Deslocamentos Verticais nos nós (Dz) - Pórticos de 7 Pavimentos

Deslocamentos Verticais nos 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				
N10	0,00	-24,11	-16,91	-48,34	-33,83	-	-	-	-
N11	0,00	-31,91	-23,40	-60,71	-46,33	-	-	-	-
N12	0,00	-25,92	-18,66	-53,86	-37,78	-	-	-	-
35	-1,67	-25,76	-18,59	-49,97	-35,56	1442,63	1013,35	2892,10	2029,04
46	-2,67	-34,30	-25,89	-62,98	-48,61	1183,68	868,90	2257,11	1719,27
57	-1,74	-27,75	-20,48	-55,62	-39,66	1491,06	1074,25	3089,39	2173,97
36	-3,03	-27,14	-19,99	-51,34	-37,00	794,72	558,95	1592,81	1119,75
47	-4,83	-36,26	-27,92	-64,87	-50,50	650,06	477,58	1241,93	944,66
58	-3,17	-29,28	-21,99	-57,12	-41,24	822,95	593,32	1700,69	1200,03
37	-4,09	-28,25	-21,10	-52,47	-38,16	589,96	415,36	1181,73	832,19
48	-6,50	-37,81	-29,51	-66,37	-52,00	481,63	353,94	921,11	699,97
59	-4,29	-30,51	-23,20	-58,35	-42,52	611,78	441,34	1261,41	892,07
38	-4,87	-29,09	-21,94	-53,35	-39,06	497,84	350,80	996,42	702,69
49	-7,70	-38,95	-30,66	-67,49	-53,11	406,13	298,41	777,00	590,14
60	-5,10	-31,44	-24,11	-59,31	-43,50	516,95	373,14	1063,78	753,67
39	-5,76	-30,06	-22,90	-54,36	-40,08	422,22	297,78	844,34	596,35
50	-9,32	-40,50	-32,22	-69,01	-54,62	334,77	245,92	640,84	486,32
61	-6,02	-32,50	-25,14	-60,39	-44,61	440,05	317,82	903,62	641,43
40	-6,35	-30,71	-23,54	-55,03	-40,76	383,39	270,53	766,28	541,73
51	-10,39	-41,53	-33,26	-70,02	-55,62	299,66	220,09	573,82	435,25
62	-6,62	-33,19	-25,82	-61,10	-45,34	401,03	289,73	822,36	584,47
41	-6,64	-31,02	-23,85	-55,35	-41,09	367,00	259,03	733,33	518,67
52	-10,93	-42,04	-33,78	-70,52	-56,12	284,70	209,10	545,27	413,49
63	-6,92	-33,52	-26,14	-61,43	-45,68	384,69	277,98	788,40	560,64
					Máximos	1491,06	1074,25	3089,39	2173,97
					Mínimos	284,70	209,10	545,27	413,49
					Média	609,85	438,44	1218,75	877,90

Fonte: Autora.

Tabela 15 - Deslocamentos Verticais nos nós (Dz) - Pórticos de 11 Pavimentos

Deslocamentos Verticais nos 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				
N10	0,00	-32,23	-22,58	-63,83	-45,17	-	-	-	-
N11	0,00	-42,40	-30,80	-80,15	-61,50	-	-	-	-
N12	0,00	-38,31	-27,27	-77,94	-54,56	-	-	-	-
35	-2,52	-34,68	-25,10	-66,25	-47,75	1275,60	895,52	2527,81	1794,13
46	-3,97	-45,98	-34,54	-83,61	-64,94	1057,34	769,34	2004,43	1534,43
57	-2,96	-41,37	-30,33	-80,88	-57,73	1295,72	923,38	2628,61	1847,64
36	-4,74	-36,90	-27,36	-68,45	-50,09	677,76	476,69	1342,94	955,90
47	-7,44	-49,17	-37,83	-86,72	-68,02	561,00	408,66	1065,90	814,49
58	-5,60	-44,15	-33,11	-83,59	-60,62	687,95	490,86	1391,95	981,90
37	-6,68	-38,90	-29,38	-70,48	-52,21	482,23	339,68	954,92	681,44
48	-10,42	-51,98	-40,71	-89,49	-70,76	399,04	290,79	759,16	579,30
59	-7,92	-46,66	-35,59	-86,10	-63,24	489,24	349,46	987,28	698,64
38	-8,35	-40,68	-31,15	-72,31	-54,09	387,30	273,14	766,20	547,98
49	-12,93	-54,43	-43,17	-91,92	-73,14	320,82	233,76	610,70	465,54
60	-9,92	-48,89	-37,78	-88,37	-65,58	392,96	280,94	790,99	561,23
39	-10,62	-43,09	-33,56	-74,79	-56,64	305,78	215,98	604,19	433,32
50	-16,93	-58,31	-47,07	-95,76	-76,93	244,35	177,99	465,55	354,32
61	-12,61	-51,88	-40,71	-91,40	-68,70	311,48	222,94	624,96	444,94
40	-12,61	-45,20	-35,66	-76,95	-58,86	258,42	182,75	510,10	366,67
51	-20,39	-61,66	-50,44	-99,08	-80,20	202,44	147,44	386,02	293,40
62	-14,92	-54,43	-43,23	-93,99	-71,37	264,78	189,69	529,89	378,28
41	-14,31	-47,00	-37,45	-78,78	-60,74	228,41	161,69	450,52	324,44
52	-23,30	-64,48	-53,29	-101,88	-82,96	176,81	128,74	337,35	256,12
63	-16,85	-56,56	-45,32	-96,15	-73,58	235,57	168,89	470,47	336,59
42	-16,09	-48,87	-39,32	-80,70	-62,70	203,67	144,31	401,41	289,59
53	-26,33	-67,43	-56,25	-104,80	-85,84	156,10	113,64	298,04	226,02
64	-18,84	-58,73	-47,46	-98,35	-75,84	211,80	151,95	422,14	302,65
43	-17,47	-50,32	-40,77	-82,18	-64,21	187,98	133,29	370,28	267,47
54	-28,68	-69,72	-58,55	-107,07	-88,08	143,09	104,16	273,34	207,12
65	-20,33	-60,36	-49,07	-100,00	-77,54	196,90	141,33	391,88	281,38
154	-18,43	-51,32	-41,76	-83,19	-65,25	178,49	126,62	351,46	254,08
157	-30,34	-71,34	-60,18	-108,68	-89,67	135,11	98,33	258,16	195,52
148	-21,33	-61,45	-50,14	-101,10	-78,66	188,08	135,05	374,00	268,80
135	-18,62	-51,53	-41,97	-83,41	-65,48	176,79	125,44	348,05	251,72
143	-30,55	-71,53	-60,37	-108,86	-89,84	134,10	97,59	256,29	194,04
141	-21,56	-61,72	-50,40	-101,38	-78,95	186,29	133,78	370,27	266,24
					Máximos	1295,72	923,38	2628,61	1847,64
					Mínimos	134,10	97,59	256,29	194,04
					Média	374,35	267,69	737,13	535,01

Fonte: Autora.

Tabela 16 - Força Normal nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos

Força Normal nas Vigas - Pórtico de 4 Pavimentos						**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Vigas	**N-AT**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**
Nº	kN	kN	kN	kN	kN				
V112	0,00	-0,18	-0,16	-0,30	-0,34	12019,16	11003,59	19940,62	22716,52
V113	0,00	-0,08	0,10	-0,15	-0,06	2380,95	2792,91	4328,09	1741,17
V212	-4,94	-8,57	-5,45	-4,79	-3,93	73,65	10,35	3,00	20,42
V213	-0,11	-0,32	0,26	0,38	0,98	199,06	348,11	459,43	1027,36
V312	-1,99	1,09	0,21	1,35	2,06	155,06	110,67	167,94	203,52
V313	-0,09	-0,06	-0,36	-1,31	-0,06	40,86	283,87	1312,90	39,78
V407	-56,93	-68,81	-66,96	-74,02	-75,97	20,86	17,61	30,00	33,44
V408	-13,16	-10,78	-10,50	-13,59	-10,05	18,10	20,19	3,30	23,61
					Máximos	12019,16	11003,59	19940,62	22716,52
					Mínimos	18,10	10,35	3,00	20,42
					Média	1863,46	1823,41	3280,66	3225,73

Fonte: Autora.

Tabela 17 - Força Normal nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos

Força Normal nas Vigas - Pórtico de 7 Pavimentos						**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Vigas	**N-AT**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**
Nº	kN	kN	kN	kN	kN				
V112	0,04	-0,20	-0,17	-0,39	-0,42	587,80	517,07	1039,02	1131,71
V113	0,09	-0,08	0,14	-0,20	-0,10	185,11	48,94	307,45	205,32
V212	-2,38	-5,64	-2,54	0,48	0,28	136,79	6,51	120,12	111,63
V213	0,58	0,57	1,14	1,82	2,43	2,74	95,20	212,86	316,81
V312	-13,84	-13,98	-14,37	-15,45	-14,90	1,04	3,86	11,62	7,67
V313	-4,47	-5,37	-5,64	-7,24	-5,89	20,25	26,18	62,05	31,82
V407	-26,17	-27,46	-27,60	-27,64	-29,22	4,91	5,47	5,62	11,65
V408	-7,05	-8,72	-7,74	-9,98	-8,89	23,80	9,83	41,65	26,18
V507	-6,31	-6,65	-6,58	-6,70	-6,85	5,35	4,21	6,21	8,44
V508	-2,96	-2,10	-2,09	-2,17	-1,41	29,15	29,39	26,72	52,49
V607	6,25	9,19	8,77	10,52	11,06	47,01	40,18	68,28	76,83
V608	3,07	4,39	4,34	4,62	5,51	43,26	41,60	50,83	79,61
V707	-40,64	-48,94	-47,82	-52,45	-54,66	20,42	17,68	29,05	34,51
V708	-0,55	-1,37	-1,09	-3,86	-1,60	149,00	98,91	603,46	190,53
					Máximos	587,80	517,07	1039,02	1131,71
					Mínimos	1,04	3,86	5,62	7,67
					Média	89,76	67,50	184,64	163,23

Fonte: Autora.

Tabela 18 - Força Normal nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos

Força Normal nas Vigas - Pórtico de 11 Pavimentos						**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Vigas	**N-AT**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**
Nº	kN	kN	kN	kN	kN				
V112	0,11	-0,21	-0,15	-0,49	-0,53	296,23	243,40	563,21	597,17
V113	0,23	-0,03	0,26	-0,22	-0,11	113,25	11,11	193,16	147,44
V212	0,40	-2,30	0,69	7,30	5,11	670,97	71,96	1711,41	1167,49
V213	1,78	1,97	2,53	4,32	4,81	10,73	42,13	142,53	170,45
V312	-18,22	-19,17	-19,43	-21,37	-20,40	5,20	6,66	17,28	11,98
V313	-9,01	-11,17	-11,28	-14,03	-11,95	24,01	25,21	55,73	32,65
V407	-25,66	-25,55	-26,24	-24,81	-27,79	0,42	2,30	3,31	8,32
V408	-5,95	-8,96	-7,42	-10,54	-8,97	50,58	24,75	77,11	50,75
V507	-3,13	-3,13	-3,12	-2,91	-3,23	0,26	0,32	7,28	3,06
V508	-4,18	-3,39	-3,25	-3,52	-2,18	18,91	22,22	15,71	47,81
V607	-4,64	-4,74	-4,73	-4,68	-4,85	2,09	1,85	0,73	4,50
V608	-2,90	-2,07	-2,06	-1,96	-1,24	28,58	28,96	32,47	57,44
V707	-9,30	-10,04	-9,96	-10,28	-10,74	7,96	7,13	10,59	15,45
V708	-3,17	-2,75	-2,77	-2,86	-2,39	13,04	12,54	9,82	24,60
V807	-8,31	-8,25	-8,26	-8,15	-8,25	0,69	0,55	1,89	0,70
V808	-3,21	-2,75	-2,77	-2,67	-2,34	14,34	13,88	16,86	27,32
V907	11,85	11,34	11,41	11,17	10,95	4,37	3,77	5,80	7,65
V908	3,30	3,53	3,52	3,55	3,69	6,81	6,45	7,57	11,87
V1007	-18,87	-17,78	-17,93	-17,33	-17,01	5,77	5,01	8,15	9,87
V1008	-2,66	-2,39	-2,38	-2,49	-1,96	10,15	10,38	6,24	26,48
V1107	-40,75	-45,39	-44,97	-47,24	-49,70	11,41	10,36	15,94	21,99
V1108	10,43	8,24	8,59	6,26	7,27	20,96	17,58	39,94	30,29
					Máximos	670,97	243,40	1711,41	1167,49
					Mínimos	0,26	0,32	0,73	0,70
					Média	59,85	25,84	133,76	112,51

Fonte: Autora.

Tabela 19 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos

Força Normal nos Pilares - Pórtico de 4 Pavimentos						**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Pilares	**N-AT**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**
Nº	kN	kN	kN	kN	kN				
A2-a	-1040,93	-1018,75	-1034,21	-1004,62	-1045,48	2,13	0,65	3,49	0,44
A2-b	-746,38	-737,72	-747,33	-732,18	-760,31	1,16	0,13	1,90	1,87
A2-c	-453,99	-461,38	-464,14	-465,07	-478,77	1,63	2,24	2,44	5,46
A2-d	-173,28	-188,68	-186,74	-197,42	-198,98	8,89	7,77	13,93	14,83
B2-a	-1991,40	-1771,12	-1850,56	-1673,39	-1688,43	11,06	7,07	15,97	15,21
B2-b	-1421,22	-1270,32	-1324,59	-1212,55	-1221,91	10,62	6,80	14,68	14,02
B2-c	-862,63	-785,71	-811,56	-753,65	-758,67	8,92	5,92	12,63	12,05
B2-d	-331,89	-316,26	-319,35	-307,55	-308,74	4,71	3,78	7,33	6,97
C2-a	-1023,05	-1058,07	-1048,18	-1016,35	-1069,05	3,42	2,46	0,66	4,50
C2-b	-732,21	-765,50	-756,93	-743,27	-777,52	4,55	3,38	1,51	6,19
C2-c	-443,15	-476,41	-468,71	-471,20	-488,91	7,51	5,77	6,33	10,32
C2-d	-167,38	-192,59	-187,23	-198,80	-202,41	15,06	11,86	18,77	20,93
					Máximos	15,06	11,86	18,77	20,93
					Mínimos	1,16	0,13	0,66	0,44
					Média	6,64	4,82	8,30	9,40

Fonte: Autora.

Tabela 20 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos

Força Normal nos Pilares - Pórtico de 7 Pavimentos						**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Pilares	**N-AT**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**
Nº	kN	kN	kN	kN	kN				
A2-a	-1575,32	-1556,85	-1586,54	-1540,26	-1623,41	1,17	0,71	2,23	3,05
A2-b	-1285,60	-1296,96	-1314,31	-1296,94	-1358,24	0,88	2,23	0,88	5,65
A2-c	-1000,88	-1047,00	-1049,95	-1066,10	-1102,33	4,61	4,90	6,52	10,14
A2-d	-728,40	-796,52	-789,18	-828,64	-844,20	9,35	8,34	13,76	15,90
A2-e	-549,85	-597,95	-592,89	-620,43	-632,09	8,75	7,83	12,84	14,96
A2-f	-368,05	-399,13	-395,82	-413,70	-421,07	8,45	7,55	12,41	14,41
A2-g	-179,39	-193,41	-191,84	-199,96	-203,09	7,81	6,94	11,46	13,21
B2-a	-2981,97	-2664,26	-2782,48	-2538,41	-2547,06	10,65	6,69	14,88	14,58
B2-b	-2413,07	-2185,16	-2267,30	-2106,22	-2107,05	9,44	6,04	12,72	12,68
B2-c	-1860,25	-1728,18	-1770,18	-1677,69	-1672,82	7,10	4,84	9,81	10,08
B2-d	-1334,70	-1278,85	-1289,50	-1252,90	-1243,95	4,18	3,39	6,13	6,80
B2-e	-999,67	-955,54	-964,24	-935,42	-928,99	4,41	3,54	6,43	7,07
B2-f	-665,20	-636,10	-641,79	-622,87	-618,66	4,37	3,52	6,36	7,00
B2-g	-332,18	-318,09	-320,80	-311,77	-309,79	4,24	3,42	6,14	6,74
C2-a	-1645,03	-1725,74	-1715,46	-1662,23	-1772,08	4,91	4,28	1,05	7,72
C2-b	-1347,38	-1440,75	-1426,74	-1410,65	-1488,89	6,93	5,89	4,70	10,50
C2-c	-1050,70	-1161,68	-1141,75	-1162,09	-1210,78	10,56	8,67	10,60	15,24
C2-d	-763,60	-879,82	-856,93	-902,18	-926,38	15,22	12,22	18,15	21,32
C2-e	-569,31	-651,96	-635,74	-667,94	-685,21	14,52	11,67	17,33	20,36
C2-f	-374,94	-427,95	-417,55	-438,32	-449,33	14,14	11,37	16,91	19,84
C2-g	-179,51	-202,72	-198,20	-207,44	-212,21	12,93	10,41	15,56	18,22
					Máximos	15,22	12,22	18,15	21,32
					Mínimos	0,88	0,71	0,88	3,05
					Média	7,84	6,40	9,85	12,16

Fonte: Autora.

Tabela 21 - Força Normal nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos

Força Normal nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos						**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Pilares	**N-AT**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**	**N-W**	**N-P**	**N-MM**	**N-MC**
Nº	kN	kN	kN	kN	kN				
A2-a	-2377,84	-2314,97	-2378,56	-2275,69	-2438,19	2,64	0,03	4,30	2,54
A2-b	-2097,27	-2092,38	-2132,82	-2081,20	-2207,77	0,23	1,70	0,77	5,27
A2-c	-1827,29	-1888,73	-1902,50	-1911,07	-1996,14	3,36	4,12	4,58	9,24
A2-d	-1572,04	-1679,87	-1674,05	-1726,65	-1777,79	6,86	6,49	9,84	13,09
A2-e	-1403,39	-1491,20	-1486,96	-1529,13	-1572,80	6,26	5,96	8,96	12,07
A2-f	-1230,63	-1303,19	-1299,63	-1334,77	-1370,61	5,90	5,61	8,46	11,38
A2-g	-1048,83	-1106,96	-1104,06	-1132,44	-1160,92	5,54	5,27	7,97	10,69
A2-h	-860,78	-905,69	-903,38	-925,53	-947,25	5,22	4,95	7,52	10,05
A2-i	-666,04	-698,79	-697,05	-713,39	-728,96	4,92	4,66	7,11	9,45
A2-j	-459,74	-480,77	-479,57	-490,17	-499,92	4,57	4,31	6,62	8,74
A2-k	-80,11	-89,61	-88,98	-93,81	-97,98	11,86	11,07	17,11	22,30
B2-a	-4434,07	-3997,06	-4174,55	-3857,39	-3839,30	9,86	5,85	13,01	13,41
B2-b	-3867,68	-3553,75	-3676,68	-3471,57	-3441,73	8,12	4,94	10,24	11,01
B2-c	-3324,12	-3141,91	-3204,84	-3092,17	-3053,78	5,48	3,59	6,98	8,13
B2-d	-2809,05	-2729,11	-2745,63	-2706,26	-2662,30	2,85	2,26	3,66	5,22
B2-e	-2470,49	-2396,57	-2412,15	-2374,78	-2338,09	2,99	2,36	3,87	5,36
B2-f	-2133,15	-2070,54	-2083,53	-2051,80	-2021,39	2,94	2,33	3,81	5,24
B2-g	-1797,24	-1745,26	-1755,91	-1729,47	-1704,99	2,89	2,30	3,77	5,13
B2-h	-1464,36	-1423,04	-1431,41	-1410,33	-1391,39	2,82	2,25	3,69	4,98
B2-i	-1133,27	-1102,68	-1108,83	-1093,20	-1079,41	2,70	2,16	3,54	4,75
B2-j	-802,99	-782,81	-786,82	-776,52	-767,63	2,51	2,01	3,30	4,40
B2-k	-88,89	-79,35	-81,20	-76,36	-72,29	10,74	8,66	14,10	18,68
C2-a	-2795,76	-2883,81	-2891,86	-2768,91	-2986,87	3,15	3,44	0,96	6,84
C2-b	-2489,45	-2621,76	-2615,51	-2563,92	-2726,66	5,31	5,06	2,99	9,53
C2-c	-2184,93	-2370,96	-2345,57	-2365,75	-2475,94	8,51	7,35	8,28	13,32
C2-d	-1885,06	-2103,72	-2065,05	-2137,43	-2204,70	11,60	9,55	13,39	16,96
C2-e	-1661,41	-1842,67	-1810,72	-1870,81	-1926,48	10,91	8,99	12,60	15,95
C2-f	-1429,99	-1579,72	-1553,27	-1603,26	-1648,76	10,47	8,62	12,12	15,30
C2-g	-1193,13	-1312,63	-1291,49	-1331,60	-1367,64	10,02	8,24	11,61	14,63
C2-h	-956,75	-1048,44	-1032,21	-1063,05	-1090,61	9,58	7,89	11,11	13,99
C2-i	-721,14	-787,35	-775,63	-797,85	-817,82	9,18	7,56	10,64	13,41
C2-j	-482,26	-523,99	-516,62	-530,63	-543,28	8,65	7,12	10,03	12,65
C2-k	-95,88	-113,83	-110,69	-116,74	-122,28	18,72	15,44	21,75	27,53
					Máximos	18,72	15,44	21,75	27,53
					Mínimos	0,23	0,03	0,77	2,54
					Média	6,59	5,52	8,14	10,95

Fonte: Autora.

Tabela 22 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos

Força Cortante nas Vigas - Pórtico de 4 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Vigas	**Coord**	**V-AT**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**
Nº	m	kN	kN	kN	kN	kN				
V112	0,00	-179,34	-191,86	-192,22	-202,55	-204,42	6,98	7,18	12,94	13,99
V112	7,00	146,13	134,67	136,32	125,64	125,77	7,84	6,71	14,02	13,94
V113	0,00	-130,91	-115,48	-120,15	-109,34	-108,99	11,79	8,22	16,48	16,74
V113	7,00	179,04	197,18	193,93	203,54	207,23	10,13	8,32	13,68	15,74
V212	0,00	-182,35	-196,44	-194,71	-203,89	-205,61	7,73	6,78	11,81	12,75
V212	7,00	143,68	131,21	134,19	125,42	124,90	8,68	6,60	12,70	13,07
V213	0,00	-129,23	-113,14	-118,06	-106,86	-108,17	12,45	8,64	17,31	16,30
V213	7,00	181,23	200,58	196,31	207,69	208,16	10,68	8,32	14,60	14,86
V312	0,00	-184,00	-198,02	-196,38	-205,28	-207,54	7,62	6,73	11,57	12,79
V312	7,00	140,59	129,46	132,00	124,55	123,35	7,92	6,11	11,41	12,27
V313	0,00	-129,00	-113,62	-118,00	-106,75	-108,52	11,92	8,53	17,25	15,87
V313	7,00	179,98	199,83	195,78	208,16	208,13	11,03	8,78	15,66	15,64
V407	0,00	-104,87	-116,03	-114,24	-121,44	-122,50	10,64	8,94	15,80	16,81
V407	7,00	84,97	75,37	76,93	71,06	69,71	11,30	9,47	16,37	17,96
V408	0,00	-78,52	-65,80	-68,57	-59,69	-60,65	16,20	12,67	23,98	22,76
V408	7,00	100,87	115,47	112,41	122,73	121,56	14,47	11,44	21,67	20,51
						Máximos	16,20	12,67	23,98	22,76
						Mínimos	6,98	6,11	11,41	12,27
						Média	10,46	8,34	15,45	15,75

Fonte: Autora.

Tabela 23 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos

Força Cortante nas Vigas - Pórtico de 7 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Vigas	**Coord**	**V-AT**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**
Nº	m	kN	kN	kN	kN	kN				
V112	0,00	-173,73	-184,52	-186,73	-195,66	-200,08	6,21	7,48	12,62	15,17
V112	7,00	151,85	139,73	141,07	129,02	128,62	7,98	7,10	15,04	15,30
V113	0,00	-124,24	-105,03	-111,79	-99,95	-98,23	15,47	10,02	19,55	20,94
V113	7,00	186,39	206,02	202,28	209,62	217,38	10,53	8,52	12,46	16,63
V212	0,00	-175,55	-188,06	-187,64	-193,87	-198,74	7,13	6,88	10,43	13,21
V212	7,00	150,50	136,86	140,19	131,19	129,59	9,07	6,85	12,83	13,89
V213	0,00	-119,95	-100,65	-107,05	-94,83	-95,32	16,09	10,76	20,94	20,54
V213	7,00	191,32	211,19	207,14	215,98	219,67	10,39	8,27	12,89	14,82
V312	0,00	-175,40	-187,52	-187,02	-192,95	-198,20	6,91	6,63	10,00	13,00
V312	7,00	149,35	137,93	140,65	133,62	131,15	7,65	5,83	10,54	12,19
V313	0,00	-117,57	-99,66	-105,12	-93,15	-94,22	15,23	10,59	20,77	19,86
V313	7,00	192,57	212,68	208,99	219,11	221,83	10,44	8,53	13,78	15,20
V407	0,00	-101,01	-112,11	-110,76	-116,58	-120,00	10,99	9,65	15,41	18,80
V407	7,00	87,34	77,30	78,55	73,59	70,23	11,50	10,06	15,75	19,60
V408	0,00	-61,72	-45,49	-49,01	-38,84	-39,20	26,28	20,58	37,07	36,49
V408	7,00	116,38	134,05	130,38	141,64	141,34	15,19	12,03	21,71	21,45
V507	0,00	-103,77	-114,47	-113,11	-118,73	-122,00	10,31	9,00	14,42	17,57
V507	7,00	85,506	76,684	77,667	73,445	70,179	10,32	9,17	14,11	17,93
V508	0,00	-64,446	-49,699	-52,78	-43,459	-43,87	22,88	18,10	32,57	31,93
V508	7,00	114,858	131,917	128,385	139,339	138,938	14,85	11,78	21,31	20,97
V607	0,00	-109,41	-120,188	-118,81	-124,6	-127,769	9,85	8,59	13,88	16,78
V607	7,00	79,737	70,774	71,796	67,368	64,21	11,24	9,96	15,51	19,47
V608	0,00	-65,338	-50,488	-53,589	-44,312	-44,631	22,73	17,98	32,18	31,69
V608	7,00	113,631	130,705	127,181	138,033	137,736	15,03	11,92	21,47	21,21
V707	0,00	-106,657	-116,312	-114,985	-120,351	-122,727	9,05	7,81	12,84	15,07
V707	7,00	84,394	76,667	77,645	73,666	71,276	9,16	8,00	12,71	15,54
V708	0,00	-76,019	-64,246	-66,661	-59,402	-59,37	15,49	12,31	21,86	21,90
V708	7,00	105,412	119,618	116,753	125,596	125,67	13,48	10,76	19,15	19,22
						Máximos	26,28	20,58	37,07	36,49
						Mínimos	6,21	5,83	10,00	12,19
						Média	12,55	10,18	17,64	19,16

Fonte: Autora.

Tabela 24 - Força Cortante nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos

Força Cortante nas Vigas - Pórtico de 11 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Vigas	**Coord**	**V-AT**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**
Nº	m	kN	kN	kN	kN	kN				
V112	0,00	-164,15	-170,97	-176,17	-182,91	-191,26	4,16	7,33	11,43	16,52
V112	7,00	161,22	148,14	149,14	134,63	133,58	8,11	7,49	16,49	17,14
V113	0,00	-113,75	-89,82	-99,79	-86,79	-82,64	21,04	12,28	23,70	27,35
V113	7,00	197,39	216,17	212,23	214,89	229,78	9,51	7,52	8,86	16,41
V212	0,00	-163,20	-171,75	-173,52	-174,81	-184,87	5,24	6,33	7,12	13,28
V212	7,00	162,15	146,98	151,00	141,78	138,36	9,36	6,88	12,56	14,67
V213	0,00	-105,37	-81,78	-90,49	-76,49	-75,82	22,39	14,13	27,41	28,05
V213	7,00	206,10	224,16	220,99	225,34	234,40	8,76	7,22	9,33	13,73
V312	0,00	-159,59	-167,60	-168,98	-170,09	-180,36	5,02	5,88	6,58	13,01
V312	7,00	164,73	153,28	156,31	150,23	145,47	6,95	5,11	8,80	11,69
V313	0,00	-98,24	-76,36	-83,69	-69,84	-70,20	22,27	14,81	28,91	28,54
V313	7,00	212,37	231,43	228,55	235,48	242,54	8,97	7,62	10,88	14,20
V407	0,00	-84,83	-93,37	-92,98	-95,53	-102,44	10,08	9,62	12,62	20,77
V407	7,00	103,14	94,93	95,41	93,06	86,67	7,96	7,49	9,78	15,97
V408	0,00	-40,60	-22,04	-26,12	-15,32	-14,49	45,71	35,65	62,26	64,30
V408	7,00	137,80	157,24	153,17	164,46	165,82	14,10	11,15	19,35	20,33
V507	0,00	-86,76	-94,67	-94,24	-96,60	-103,02	9,13	8,63	11,34	18,74
V507	7,00	102,65	96,32	96,40	95,07	89,03	6,16	6,08	7,38	13,27
V508	0,00	-39,27	-22,89	-26,31	-16,72	-16,08	41,71	32,99	57,43	59,05
V508	7,00	141,27	159,79	155,94	166,87	167,87	13,11	10,38	18,12	18,83
V607	0,00	-92,98	-100,52	-100,10	-102,54	-108,43	8,11	7,65	10,28	16,62
V607	7,00	96,43	90,31	90,44	88,92	83,38	6,34	6,20	7,79	13,52
V608	0,00	-38,80	-23,12	-26,39	-17,32	-16,64	40,42	31,98	55,37	57,13
V608	7,00	141,68	159,30	155,65	165,93	166,97	12,44	9,87	17,12	17,85
V707	0,00	-98,96	-106,20	-105,75	-108,32	-113,64	7,32	6,87	9,46	14,84
V707	7,00	91,23	85,47	85,62	84,01	79,01	6,31	6,15	7,92	13,39
V708	0,00	-41,73	-27,18	-30,21	-21,90	-21,15	34,85	27,60	47,51	49,32
V708	7,00	139,65	156,18	152,78	162,29	163,39	11,84	9,40	16,22	17,00
V807	0,00	-105,33	-112,30	-111,84	-114,54	-119,30	6,62	6,17	8,74	13,26
V807	7,00	85,78	80,31	80,49	78,74	74,29	6,38	6,17	8,21	13,40
V808	0,00	-45,89	-32,49	-35,27	-27,73	-26,90	29,20	23,15	39,57	41,38
V808	7,00	136,67	152,07	148,93	157,66	158,82	11,27	8,97	15,36	16,20
V907	0,00	-114,20	-121,08	-120,59	-123,48	-127,87	6,03	5,59	8,13	11,97
V907	7,00	76,28	70,87	71,09	69,14	65,04	7,09	6,80	9,36	14,73
V908	0,00	-45,93	-33,11	-35,76	-28,69	-27,77	27,90	22,14	37,52	39,53
V908	7,00	135,50	150,24	147,24	155,46	156,70	10,88	8,67	14,73	15,64
V1007	0,00	-232,44	-239,49	-238,94	-242,12	-246,27	3,03	2,79	4,16	5,95
V1007	7,00	158,06	152,50	152,77	150,53	146,66	3,52	3,35	4,76	7,21
V1008	0,00	-127,45	-114,95	-117,51	-110,78	-109,71	9,81	7,80	13,08	13,92
V1008	7,00	234,28	248,74	245,82	253,72	255,10	6,17	4,92	8,30	8,89
V1107	0,00	-49,02	-55,41	-54,77	-57,83	-60,93	13,03	11,73	17,98	24,30
V1107	7,00	4,67	-0,21	0,18	-1,93	-4,83	104,58	96,11	141,36	203,36
V1108	0,00	5,28	14,48	12,64	17,46	18,63	174,03	139,16	230,53	252,62
V1108	7,00	54,90	66,18	63,98	70,00	71,42	20,55	16,54	27,50	30,09
						Máximos	174,03	139,16	230,53	252,62
						Mínimos	3,03	2,79	4,16	5,95
						Média	19,26	15,92	25,71	30,86

Fonte: Autora.

Tabela 25 - Força Cortante nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos

Força Cortante nos Pilares - Pórtico de 4 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Pilares	**Coord**	**V-AT**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**
Nº	m	kN	kN	kN	kN	kN				
A2-a	0,00	-31,12	-22,96	-38,54	-72,49	-85,89	26,24	23,84	132,92	175,96
A2-a	2,90	-39,75	-31,58	-47,17	-81,12	-94,51	20,54	18,66	104,07	137,77
A2-b	0,00	-72,69	-93,24	-85,56	-94,20	-93,35	28,27	17,71	29,60	28,43
A2-b	2,90	-81,31	-101,86	-94,19	-102,83	-101,98	25,27	15,83	26,46	25,41
A2-c	0,00	-71,45	-84,82	-83,37	-93,34	-94,31	18,70	16,68	30,63	31,99
A2-c	2,90	-80,08	-93,44	-92,00	-101,97	-102,94	16,69	14,88	27,33	28,54
A2-d	0,00	-76,17	-94,85	-92,00	-103,31	-106,16	24,53	20,78	35,63	39,36
A2-d	2,90	-84,80	-103,48	-100,63	-111,94	-114,78	22,03	18,67	32,01	35,36
B2-a	0,00	13,12	17,20	13,54	7,79	10,55	31,09	3,16	40,60	19,57
B2-a	2,90	13,12	17,20	13,54	7,79	10,55	31,09	3,16	40,60	19,57
B2-b	0,00	12,14	15,60	14,07	16,90	15,57	28,47	15,89	39,19	28,25
B2-b	2,90	12,14	15,60	14,07	16,90	15,57	28,47	15,89	39,19	28,25
B2-c	0,00	8,53	11,14	9,77	11,27	9,76	30,59	14,52	32,03	14,36
B2-c	2,90	8,53	11,14	9,77	11,27	9,76	30,59	14,52	32,03	14,36
B2-d	0,00	5,31	11,68	9,36	15,73	10,98	120,01	76,32	196,42	106,88
B2-d	2,90	5,31	11,68	9,36	15,73	10,98	120,01	76,32	196,42	106,88
C2-a	0,00	49,87	44,57	57,92	91,87	110,93	10,63	16,13	84,21	122,43
C2-a	2,90	49,87	44,57	57,92	91,87	110,93	10,63	16,13	84,21	122,43
C2-b	0,00	83,04	107,63	98,72	114,17	106,34	29,61	18,88	37,48	28,05
C2-b	2,90	83,04	107,63	98,72	114,17	106,34	29,61	18,88	37,48	28,05
C2-c	0,00	77,67	93,81	90,90	101,23	101,88	20,78	17,04	30,34	31,17
C2-c	2,90	77,67	93,81	90,90	101,23	101,88	20,78	17,04	30,34	31,17
C2-d	0,00	77,39	103,71	98,22	116,97	114,44	34,01	26,92	51,15	47,87
C2-d	2,90	77,39	103,71	98,22	116,97	114,44	34,01	26,92	51,15	47,87
						Máximos	120,01	76,32	196,42	175,96
						Mínimos	10,63	3,16	26,46	14,36
						Média	33,03	21,87	60,06	54,17

Fonte: Autora.

Tabela 26 - Força Cortante nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos

Força Cortante nos Pilares - Pórtico de 7 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Pilares	**Coord**	**V-AT**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**
Nº	m	kN	kN	kN	kN	kN				
A2-a	0,00	-22,86	-13,61	-30,16	-78,48	-91,67	40,44	31,97	243,37	301,05
A2-a	2,90	-31,49	-22,24	-38,79	-87,11	-100,30	29,36	23,20	176,68	218,55
A2-b	0,00	-65,11	-85,86	-78,46	-82,13	-85,30	31,87	20,51	26,14	31,00
A2-b	2,90	-73,74	-94,49	-87,09	-90,76	-93,93	28,14	18,11	23,08	27,38
A2-c	0,00	-69,23	-83,56	-82,37	-92,05	-94,96	20,70	18,98	32,96	37,17
A2-c	2,90	-77,86	-92,19	-91,00	-100,67	-103,59	18,41	16,88	29,31	33,05
A2-d	0,00	-49,38	-61,79	-60,48	-66,47	-71,19	25,12	22,47	34,59	44,16
A2-d	2,90	-58,01	-70,41	-69,11	-75,10	-79,82	21,38	19,13	29,45	37,59
A2-e	0,00	-19,67	-28,34	-27,25	-31,74	-34,60	44,08	38,56	61,36	75,90
A2-e	3,75	-33,38	-42,05	-40,96	-45,45	-48,31	25,98	22,73	36,16	44,73
A2-f	0,00	-24,64	-32,91	-31,90	-36,29	-38,91	33,60	29,49	47,32	57,94
A2-f	3,75	-38,34	-46,62	-45,61	-50,00	-52,62	21,59	18,95	30,40	37,23
A2-g	0,00	-47,89	-60,46	-58,83	-65,79	-69,18	26,23	22,83	37,37	44,45
A2-g	3,75	-61,60	-74,16	-72,53	-79,50	-82,89	20,39	17,75	29,05	34,56
B2-a	0,00	25,37	34,02	26,74	16,63	21,73	34,10	5,40	34,45	14,35
B2-a	2,90	25,37	34,02	26,74	16,63	21,73	34,10	5,40	34,45	14,35
B2-b	0,00	27,04	32,04	29,80	34,13	32,49	18,46	10,19	26,21	20,14
B2-b	2,90	27,04	32,04	29,80	34,13	32,49	18,46	10,19	26,21	20,14
B2-c	0,00	21,18	24,48	22,71	23,91	22,58	15,56	7,22	12,86	6,61
B2-c	2,90	21,18	24,48	22,71	23,91	22,58	15,56	7,22	12,86	6,61
B2-d	0,00	28,39	36,30	33,50	40,19	35,51	27,86	17,98	41,56	25,07
B2-d	2,90	28,39	36,30	33,50	40,19	35,51	27,86	17,98	41,56	25,07
B2-e	0,00	17,19	21,81	20,17	24,11	21,26	26,92	17,38	40,28	23,69
B2-e	3,75	17,19	21,81	20,17	24,11	21,26	26,92	17,38	40,28	23,69
B2-f	0,00	12,40	17,12	15,46	19,34	16,55	38,05	24,63	55,91	33,45
B2-f	3,75	12,40	17,12	15,46	19,34	16,55	38,05	24,63	55,91	33,45
B2-g	0,00	6,47	12,31	10,26	14,77	11,60	90,22	58,48	128,26	79,21
B2-g	3,75	6,47	12,31	10,26	14,77	11,60	90,22	58,48	128,26	79,21
C2-a	0,00	58,95	55,20	68,32	115,99	139,52	6,36	15,89	96,74	136,67
C2-a	2,90	58,95	55,20	68,32	115,99	139,52	6,36	15,89	96,74	136,67
C2-b	0,00	92,69	118,54	109,74	122,55	115,83	27,88	18,40	32,22	24,97
C2-b	2,90	92,69	118,54	109,74	122,55	115,83	27,88	18,40	32,22	24,97
C2-c	0,00	87,01	103,96	101,27	110,06	113,48	19,48	16,39	26,50	30,43
C2-c	2,90	87,01	103,96	101,27	110,06	113,48	19,48	16,39	26,50	30,43
C2-d	0,00	77,03	98,25	93,97	107,25	106,84	27,55	22,00	39,23	38,70
C2-d	2,90	77,03	98,25	93,97	107,25	106,84	27,55	22,00	39,23	38,70
C2-e	0,00	43,64	57,53	54,62	63,56	63,11	31,81	25,15	45,63	44,60
C2-e	3,75	43,64	57,53	54,62	63,56	63,11	31,81	25,15	45,63	44,60
C2-f	0,00	41,44	54,83	52,04	60,54	60,21	32,33	25,60	46,09	45,30
C2-f	3,75	41,44	54,83	52,04	60,54	60,21	32,33	25,60	46,09	45,30
C2-g	0,00	55,79	75,03	71,09	82,96	83,01	34,48	27,42	48,69	48,79
C2-g	3,75	55,79	75,03	71,09	82,96	83,01	34,48	27,42	48,69	48,79
						Máximos	90,22	58,48	243,37	301,05
						Mínimos	6,36	5,40	12,86	6,61
						Média	29,75	21,57	52,06	51,64

Fonte: Autora.

Tabela 27 - Força Cortante nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos

Força Cortante nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Pilares	**Coord**	**V-AT**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**	**V-W**	**V-P**	**V-MM**	**V-MC**
Nº	m	kN	kN	kN	kN	kN				
A2-a	0,00	-10,26	1,27	-16,78	-85,11	-97,47	112,33	63,53	729,46	849,89
A2-a	2,90	-18,89	-7,36	-25,41	-93,74	-106,10	61,02	34,51	396,26	461,68
A2-b	0,00	-53,30	-73,25	-66,38	-62,38	-72,32	37,42	24,54	17,03	35,67
A2-b	2,90	-61,93	-81,88	-75,01	-71,00	-80,94	32,21	21,12	14,66	30,71
A2-c	0,00	-63,43	-78,07	-77,24	-86,41	-92,15	23,07	21,77	36,22	45,28
A2-c	2,90	-72,06	-86,70	-85,87	-95,03	-100,78	20,31	19,16	31,88	39,86
A2-d	0,00	-33,60	-43,52	-43,29	-46,09	-54,97	29,53	28,84	37,17	63,59
A2-d	2,90	-42,23	-52,15	-51,92	-54,72	-63,59	23,50	22,95	29,58	50,60
A2-e	0,00	-4,14	-11,44	-10,90	-13,64	-18,86	176,08	163,07	229,13	355,27
A2-e	3,75	-17,85	-25,14	-24,61	-27,34	-32,57	40,87	37,85	53,19	82,46
A2-f	0,00	-13,91	-21,34	-20,76	-23,93	-28,62	53,46	49,25	72,04	105,81
A2-f	3,75	-27,61	-35,05	-34,46	-37,63	-42,33	26,92	24,81	36,29	53,29
A2-g	0,00	-21,40	-28,66	-28,09	-31,32	-35,76	33,92	31,27	46,34	67,10
A2-g	3,75	-35,11	-42,37	-41,80	-45,02	-49,47	20,68	19,06	28,25	40,90
A2-h	0,00	-21,39	-27,46	-27,00	-29,69	-33,44	28,35	26,21	38,81	56,32
A2-h	3,75	-36,37	-42,44	-41,98	-44,68	-48,42	16,67	15,41	22,82	33,12
A2-i	0,00	-24,78	-30,93	-30,45	-33,31	-36,91	24,83	22,90	34,45	48,99
A2-i	3,75	-39,76	-45,91	-45,43	-48,29	-51,89	15,47	14,27	21,47	30,53
A2-j	0,00	-58,26	-63,67	-63,29	-65,81	-69,10	9,28	8,63	12,95	18,60
A2-j	3,75	-73,24	-78,65	-78,28	-80,79	-84,08	7,39	6,87	10,30	14,80
A2-k	0,00	-45,13	-52,10	-51,50	-54,88	-58,60	15,43	14,11	21,59	29,84
A2-k	4,30	-62,31	-69,28	-68,68	-72,06	-75,78	11,17	10,22	15,64	21,61
B2-a	0,00	43,60	59,57	45,82	27,08	35,09	36,62	5,09	37,90	19,52
B2-a	2,90	43,60	59,57	45,82	27,08	35,09	36,62	5,09	37,90	19,52
B2-b	0,00	49,34	55,32	52,53	59,04	57,30	12,12	6,46	19,66	16,12
B2-b	2,90	49,34	55,32	52,53	59,04	57,30	12,12	6,46	19,66	16,12
B2-c	0,00	38,93	41,79	39,90	39,68	39,11	7,35	2,50	1,93	0,46
B2-c	2,90	38,93	41,79	39,90	39,68	39,11	7,35	2,50	1,93	0,46
B2-d	0,00	64,94	76,91	72,80	81,99	75,96	18,42	12,09	26,25	16,96
B2-d	2,90	64,94	76,91	72,80	81,99	75,96	18,42	12,09	26,25	16,96
B2-e	0,00	47,16	53,80	51,54	56,51	53,19	14,06	9,29	19,81	12,78
B2-e	3,75	47,16	53,80	51,54	56,51	53,19	14,06	9,29	19,81	12,78
B2-f	0,00	44,87	51,59	49,33	54,11	50,99	14,96	9,93	20,57	13,63
B2-f	3,75	44,87	51,59	49,33	54,11	50,99	14,96	9,93	20,57	13,63
B2-g	0,00	39,76	46,40	44,18	48,70	45,82	16,72	11,13	22,49	15,25
B2-g	3,75	39,76	46,40	44,18	48,70	45,82	16,72	11,13	22,49	15,25
B2-h	0,00	31,54	37,15	35,29	39,03	36,66	17,80	11,88	23,75	16,23
B2-h	3,75	31,54	37,15	35,29	39,03	36,66	17,80	11,88	23,75	16,23
B2-i	0,00	25,54	31,14	29,28	32,84	30,62	21,91	14,64	28,58	19,90
B2-i	3,75	25,54	31,14	29,28	32,84	30,62	21,91	14,64	28,58	19,90
B2-j	0,00	19,25	24,65	22,86	26,20	24,14	28,02	18,75	36,07	25,37
B2-j	3,75	19,25	24,65	22,86	26,20	24,14	28,02	18,75	36,07	25,37
B2-k	0,00	11,75	17,19	15,39	18,69	16,66	46,39	31,03	59,10	41,86
B2-k	4,30	11,75	17,19	15,39	18,69	16,66	46,39	31,03	59,10	41,86
C2-a	0,00	72,03	69,83	82,13	152,26	181,67	3,05	14,02	111,38	152,21
C2-a	2,90	72,03	69,83	82,13	152,26	181,67	3,05	14,02	111,38	152,21
C2-b	0,00	106,15	130,97	123,18	130,58	125,95	23,38	16,04	23,02	18,65

C2-b	2,90	106,15	130,97	123,18	130,58	125,95	23,38	16,04	23,02	18,65
C2-c	0,00	95,75	110,09	108,55	113,26	121,42	14,97	13,37	18,29	26,81
C2-c	2,90	95,75	110,09	108,55	113,26	121,42	14,97	13,37	18,29	26,81
C2-d	0,00	97,43	119,52	115,27	127,11	129,28	22,68	18,31	30,47	32,69
C2-d	2,90	97,43	119,52	115,27	127,11	129,28	22,68	18,31	30,47	32,69
C2-e	0,00	63,61	77,46	74,62	82,31	83,42	21,77	17,30	29,39	31,14
C2-e	3,75	63,61	77,46	74,62	82,31	83,42	21,77	17,30	29,39	31,14
C2-f	0,00	65,27	78,87	76,14	83,39	84,85	20,84	16,65	27,76	29,99
C2-f	3,75	65,27	78,87	76,14	83,39	84,85	20,84	16,65	27,76	29,99
C2-g	0,00	66,12	79,74	77,00	84,20	85,71	20,60	16,45	27,34	29,63
C2-g	3,75	66,12	79,74	77,00	84,20	85,71	20,60	16,45	27,34	29,63
C2-h	0,00	60,55	72,32	69,94	76,23	77,42	19,43	15,50	25,89	27,85
C2-h	3,75	60,55	72,32	69,94	76,23	77,42	19,43	15,50	25,89	27,85
C2-i	0,00	57,83	69,82	67,40	73,76	75,04	20,74	16,56	27,55	29,77
C2-i	3,75	57,83	69,82	67,40	73,76	75,04	20,74	16,56	27,55	29,77
C2-j	0,00	77,98	89,24	86,94	92,94	94,04	14,43	11,49	19,18	20,59
C2-j	3,75	77,98	89,24	86,94	92,94	94,04	14,43	11,49	19,18	20,59
C2-k	0,00	61,29	74,51	71,87	78,82	80,39	21,58	17,26	28,60	31,16
C2-k	4,30	61,29	74,51	71,87	78,82	80,39	21,58	17,26	28,60	31,16
						Máximos	176,08	163,07	729,46	849,89
						Mínimos	3,05	2,50	1,93	0,46
						Média	25,69	19,57	49,48	57,47

Fonte: Autora.

Tabela 28 - Momento Fletor nas Vigas - Pórticos de 4 Pavimentos

Momento Fletor nas Vigas - Pórtico de 4 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Vigas	**Coord**	**M-AT**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**
Nº	m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m				
V112	0,00	-202,06	-237,55	-238,06	-268,67	-271,88	17,56	17,82	32,96	34,55
V112	3,50	125,45	127,60	126,72	126,99	126,92	1,72	1,02	1,23	1,17
V112	7,00	-223,49	-182,10	-186,83	-153,14	-152,50	18,52	16,40	31,48	31,76
V113	0,00	-193,94	-141,66	-154,42	-120,14	-118,66	26,96	20,38	38,05	38,82
V113	3,50	117,80	120,62	119,72	120,72	119,87	2,39	1,64	2,48	1,77
V113	7,00	-212,90	-261,35	-252,96	-282,05	-289,78	22,76	18,81	32,48	36,11
V212	0,00	-211,26	-252,14	-246,14	-273,56	-276,07	19,35	16,51	29,49	30,68
V212	3,50	124,48	125,28	125,56	126,09	126,27	0,64	0,86	1,29	1,44
V212	7,00	-216,70	-173,42	-181,33	-151,37	-149,86	19,97	16,32	30,15	30,84
V213	0,00	-189,10	-135,87	-148,96	-112,69	-115,65	28,15	21,23	40,41	38,84
V213	3,50	117,10	118,60	118,76	119,35	119,97	1,28	1,42	1,92	2,45
V213	7,00	-219,61	-272,42	-260,53	-294,47	-292,63	24,05	18,63	34,09	33,25
V312	0,00	-216,39	-256,14	-250,65	-276,62	-280,95	18,37	15,83	27,83	29,83
V312	3,50	124,44	125,44	125,57	126,21	126,26	0,80	0,90	1,42	1,46
V312	7,00	-210,10	-169,08	-176,44	-149,13	-145,84	19,52	16,02	29,02	30,58
V313	0,00	-190,01	-137,44	-149,69	-112,49	-116,78	27,67	21,22	40,80	38,54
V313	3,50	117,22	118,89	118,90	119,60	119,99	1,43	1,43	2,04	2,37
V313	7,00	-216,84	-270,09	-259,02	-294,86	-292,15	24,56	19,45	35,98	34,73
V407	0,00	-117,80	-151,07	-145,89	-167,12	-170,81	28,24	23,84	41,86	45,00
V407	3,50	77,84	81,04	80,40	82,74	82,48	4,11	3,29	6,30	5,96
V407	7,00	-123,21	-85,78	-91,92	-67,97	-64,37	30,37	25,39	44,83	47,75
V408	0,00	-112,85	-65,49	-75,43	-42,13	-45,53	41,97	33,16	62,67	59,65
V408	3,50	72,30	75,53	74,95	77,11	77,21	4,46	3,67	6,65	6,78
V408	7,00	-115,46	-159,99	-150,57	-181,99	-178,30	38,57	30,41	57,62	54,43
						Máximos	41,97	33,16	62,67	59,65
						Mínimos	0,64	0,86	1,23	1,17
						Média	17,64	14,40	26,38	26,62

Fonte: Autora.

Tabela 29 - Momento Fletor nas Vigas - Pórticos de 7 Pavimentos

Momento Fletor nas Vigas - Pórtico de 7 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Vigas	**Coord**	**M-AT**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**
Nº	m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m				
V112	0,00	-186,93	-220,30	-224,73	-254,42	-262,78	17,85	20,22	36,11	40,58
V112	3,50	125,93	127,79	127,14	126,31	126,98	1,48	0,97	0,30	0,84
V112	7,00	-237,82	-195,68	-198,23	-163,95	-159,02	17,72	16,65	31,06	33,14
V113	0,00	-175,60	-114,28	-131,12	-97,25	-89,38	34,92	25,33	44,62	49,10
V113	3,50	117,76	120,19	119,69	119,47	119,11	2,07	1,64	1,46	1,15
V113	7,00	-232,47	-287,57	-276,65	-303,25	-319,86	23,70	19,00	30,45	37,59
V212	0,00	-193,17	-232,69	-228,96	-251,14	-260,57	20,46	18,53	30,01	34,89
V212	3,50	125,01	125,34	125,94	125,89	126,50	0,26	0,74	0,70	1,19
V212	7,00	-233,62	-188,77	-196,08	-168,35	-161,48	19,20	16,07	27,94	30,88
V213	0,00	-163,45	-103,21	-118,62	-82,61	-80,74	36,85	27,42	49,46	50,60
V213	3,50	117,07	118,07	118,63	118,47	119,74	0,85	1,33	1,20	2,28
V213	7,00	-246,65	-303,85	-291,25	-321,70	-326,38	23,19	18,08	30,42	32,32
V312	0,00	-193,16	-230,06	-226,68	-246,83	-257,89	19,10	17,35	27,78	33,51
V312	3,50	125,69	126,54	126,89	127,14	127,58	0,67	0,95	1,15	1,51
V312	7,00	-231,15	-190,38	-197,01	-173,18	-164,30	17,64	14,77	25,08	28,92
V313	0,00	-157,82	-99,60	-113,46	-76,88	-76,93	36,89	28,11	51,29	51,25
V313	3,50	117,72	119,11	119,44	119,54	120,49	1,18	1,46	1,54	2,35
V313	7,00	-250,0201	-306,4667	-295,2383	-327,8109	-330,7268	22,58	18,09	31,11	32,28
V407	0,00	-108,5404	-142,7656	-138,7263	-156,5594	-167,5101	31,53	27,81	44,24	54,33
V407	3,50	75,1016	77,118	76,7178	78,0459	77,9989	2,68	2,15	3,92	3,86
V407	7,00	-136,8253	-100,5906	-105,1668	-86,2564	-75,2915	26,48	23,14	36,96	44,97
V408	0,00	-66,2739	-10,3655	-22,0625	13,1787	12,6936	84,36	66,71	119,89	119,15
V408	3,50	68,5116	70,5271	70,2164	71,3272	71,6912	2,94	2,49	4,11	4,64
V408	7,00	-169,1378	-224,7461	-213,0939	-248,298	-247,3644	32,88	25,99	46,80	46,25
V507	0,00	-115,5521	-147,8551	-143,9284	-160,6378	-171,1884	27,96	24,56	39,02	48,15
V507	3,50	76,7602	79,0983	78,6246	80,1647	80,0872	3,05	2,43	4,44	4,33
V507	7,00	-127,0921	-92,6431	-97,0439	-79,1507	-68,6227	27,11	23,64	37,72	46,01
V508	0,00	-71,1319	-17,9879	-28,9298	4,7952	4,1158	74,71	59,33	106,74	105,79
V508	3,50	70,0164	72,1567	71,836	72,9838	73,4323	3,06	2,60	4,24	4,88
V508	7,00	-162,5725	-215,6326	-204,5514	-238,5062	-237,1226	32,64	25,82	46,71	45,86
V607	0,00	-135,0574	-167,9252	-163,8812	-181,3254	-191,5365	24,34	21,34	34,26	41,82
V607	3,50	75,0853	76,9946	76,6022	77,8666	77,78	2,54	2,02	3,70	3,59
V607	7,00	-110,6888	-76,3946	-80,7841	-62,6139	-52,4481	30,98	27,02	43,43	52,62
V608	0,00	-75,0897	-22,1592	-33,0493	0,2475	-0,2288	70,49	55,99	100,33	99,70
V608	3,50	69,3907	71,1771	70,9095	71,8881	72,2417	2,57	2,19	3,60	4,11
V608	7,00	-159,4297	-212,8243	-201,7295	-235,492	-234,5107	33,49	26,53	47,71	47,09
V707	0,00	-119,6099	-147,0802	-143,5261	-158,5139	-166,1615	22,97	20,00	32,53	38,92
V707	3,50	82,2712	86,3262	85,5343	88,1182	88,145	4,93	3,97	7,11	7,14
V707	7,00	-113,7832	-80,8584	-85,5338	-67,3613	-59,4855	28,94	24,83	40,80	47,72
V708	0,00	-97,1585	-51,6585	-60,728	-32,6078	-31,7002	46,83	37,50	66,44	67,37
V708	3,50	76,4798	80,1196	79,5496	81,6112	82,2321	4,76	4,01	6,71	7,52
V708	7,00	-126,0471	-168,5175	-159,8085	-186,3133	-186,1442	33,69	26,78	47,81	47,68
						Máximos	84,36	66,71	119,89	119,15
						Mínimos	0,26	0,74	0,30	0,84
						Média	22,68	18,70	32,16	34,71

Fonte: Autora.

Tabela 30 - Momento Fletor nas Vigas - Pórticos de 11 Pavimentos

Momento Fletor nas Vigas - Pórtico de 11 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Vigas	**Coord**	**M-AT**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**
Nº	m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m				
V112	0,00	-161,28	-188,60	-199,23	-227,43	-243,64	16,94	23,53	41,01	51,06
V112	3,50	126,60	127,57	127,42	124,86	126,81	0,76	0,64	1,38	0,16
V112	7,00	-261,91	-220,75	-219,93	-184,37	-172,84	15,71	16,03	29,61	34,01
V113	0,00	-147,39	-77,28	-99,90	-68,60	-49,68	47,57	32,22	53,46	66,30
V113	3,50	117,53	118,78	119,03	116,58	117,10	1,07	1,28	0,81	0,36
V113	7,00	-262,16	-320,70	-306,89	-327,34	-359,40	22,33	17,06	24,86	37,09
V212	0,00	-160,57	-194,48	-194,61	-207,64	-228,58	21,12	21,20	29,31	42,35
V212	3,50	125,75	125,06	126,23	125,22	126,51	0,55	0,38	0,42	0,60
V212	7,00	-263,73	-219,01	-225,37	-201,91	-186,07	16,96	14,55	23,44	29,45
V213	0,00	-124,34	-57,05	-75,67	-40,01	-30,64	54,12	39,15	67,82	75,36
V213	3,50	116,75	116,47	117,77	116,28	118,71	0,24	0,87	0,40	1,68
V213	7,00	-287,08	-345,55	-332,82	-357,08	-372,36	20,37	15,94	24,38	29,71
V312	0,00	-151,42	-181,20	-181,29	-191,68	-214,32	19,67	19,73	26,59	41,54
V312	3,50	126,76	126,92	127,69	127,24	128,25	0,13	0,73	0,38	1,18
V312	7,00	-270,19	-232,47	-237,80	-220,43	-201,80	13,96	11,99	18,42	25,31
V313	0,00	-105,65	-40,36	-56,78	-19,54	-13,75	61,80	46,26	81,50	86,98
V313	3,50	117,36	117,60	118,60	117,47	119,39	0,20	1,06	0,09	1,73
V313	7,00	-303,83	-362,73	-351,51	-380,49	-391,86	19,39	15,69	25,23	28,97
V407	0,00	-55,59	-81,77	-80,79	-88,37	-110,26	47,10	45,32	58,96	98,33
V407	3,50	77,14	79,33	78,90	80,21	80,36	2,84	2,28	3,98	4,18
V407	7,00	-186,03	-157,15	-158,87	-149,82	-127,92	15,52	14,60	19,47	31,24
V408	0,00	-0,21	61,42	48,41	83,81	88,63	29641,17	23386,63	40413,76	42730,54
V408	3,50	67,67	69,56	69,33	70,13	70,93	2,79	2,45	3,64	4,82
V408	7,00	-238,62	-300,11	-287,13	-322,67	-326,80	25,77	20,33	35,22	36,95
V507	0,00	-58,91	-82,27	-81,34	-87,72	-108,13	39,65	38,07	48,89	83,54
V507	3,50	79,96	82,45	81,95	83,46	83,56	3,12	2,48	4,37	4,51
V507	7,00	-178,32	-152,43	-153,91	-146,17	-125,73	14,52	13,69	18,03	29,49
V508	0,00	8,76	66,13	54,28	87,63	91,57	654,89	519,65	900,28	945,35
V508	3,50	68,74	70,58	70,38	71,11	72,01	2,68	2,39	3,45	4,76
V508	7,00	-248,21	-306,20	-294,01	-328,19	-331,01	23,36	18,45	32,22	33,36
V607	0,00	-79,39	-101,76	-100,80	-107,62	-126,32	28,18	26,97	35,56	59,12
V607	3,50	79,48	81,74	81,29	82,64	82,76	2,85	2,27	3,98	4,12
V607	7,00	-159,06	-134,40	-135,88	-127,87	-109,11	15,50	14,57	19,61	31,40
V608	0,00	10,79	65,48	54,23	85,68	89,61	506,58	402,39	693,77	730,11
V608	3,50	69,52	71,23	71,04	71,75	72,54	2,46	2,18	3,21	4,34
V608	7,00	-249,15	-304,40	-292,87	-325,00	-328,00	22,17	17,55	30,44	31,65
V707	0,00	-97,35	-118,60	-117,59	-124,72	-141,59	21,83	20,80	28,12	45,45
V707	3,50	80,60	83,00	82,52	83,94	84,08	2,97	2,38	4,13	4,31
V707	7,00	-139,74	-115,95	-117,52	-109,07	-92,09	17,03	15,90	21,95	34,10
V708	0,00	4,47	55,72	45,25	74,37	78,47	1147,94	913,48	1565,65	1657,43
V708	3,50	70,85	72,63	72,43	73,19	73,99	2,51	2,23	3,30	4,43
V708	7,00	-241,39	-292,99	-282,26	-311,93	-315,03	21,38	16,93	29,22	30,51
V807	0,00	-116,17	-136,40	-135,34	-142,82	-157,86	17,41	16,50	22,94	35,88
V807	3,50	82,06	84,55	84,06	85,51	85,69	3,04	2,44	4,21	4,43
V807	7,00	-118,90	-95,83	-97,52	-88,57	-73,33	19,41	17,99	25,51	38,32

V808	0,00	-4,68	43,10	33,41	60,17	64,45	1021,78	814,67	1386,92	1478,50
V808	3,50	72,91	74,75	74,54	75,35	76,15	2,53	2,24	3,36	4,45
V808	7,00	-229,74	-277,57	-267,68	-294,79	-298,02	20,82	16,52	28,32	29,72
V907	0,00	-146,96	-166,91	-165,76	-173,84	-187,69	13,57	12,79	18,29	27,72
V907	3,50	79,24	81,63	81,16	82,52	82,71	3,02	2,42	4,15	4,39
V907	7,00	-93,04	-70,41	-72,14	-62,73	-48,65	24,32	22,46	32,58	47,71
V908	0,00	-7,65	38,10	28,86	54,07	58,54	598,11	477,32	806,94	865,27
V908	3,50	72,05	73,84	73,63	74,46	75,20	2,50	2,21	3,35	4,37
V908	7,00	-227,17	-272,94	-263,51	-288,99	-292,50	20,14	16,00	27,21	28,76
V1007	0,00	-282,23	-303,03	-301,64	-310,84	-323,99	7,37	6,88	10,14	14,80
V1007	3,50	176,81	178,91	178,49	179,68	179,82	1,19	0,95	1,62	1,70
V1007	7,00	-228,32	-205,37	-207,24	-197,03	-183,73	10,05	9,23	13,70	19,53
V1008	0,00	-161,35	-116,75	-125,71	-101,60	-96,78	27,64	22,09	37,03	40,02
V1008	3,50	159,06	160,63	160,45	161,19	161,83	0,99	0,88	1,34	1,74
V1008	7,00	-320,02	-365,03	-355,83	-380,35	-384,41	14,07	11,19	18,85	20,12
V1107	0,00	-90,47	-107,45	-106,05	-114,01	-123,42	18,76	17,21	26,02	36,42
V1107	3,50	30,34	34,42	33,66	35,88	36,45	13,43	10,93	18,26	20,15
V1107	7,00	25,30	48,36	45,76	56,76	67,25	91,12	80,85	124,32	165,81
V1108	0,00	52,44	88,62	81,70	100,80	106,31	69,00	55,79	92,23	102,73
V1108	3,50	27,93	31,25	30,82	32,45	33,60	11,89	10,33	16,18	20,30
V1108	7,00	-114,08	-147,19	-140,55	-158,25	-161,90	29,02	23,20	38,72	41,91
						Máximos	29641,17	23386,63	40413,76	42730,54
						Mínimos	0,13	0,38	0,09	0,16
						Média	524,83	415,69	715,04	761,40

Fonte: Autora.

Tabela 31 - Momento Fletor nos Pilares - Pórticos de 4 Pavimentos

Momento Fletor nos Pilares - Pórtico de 4 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Pilares	**Coord**	**M-AT**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**
Nº	m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m				
A2-a	0,00	-7,79	16,62	-11,09	-88,02	-121,63	313,33	42,34	1029,62	1460,94
A2-a	2,90	94,48	94,23	112,49	133,30	138,60	0,27	19,06	41,09	46,69
A2-b	0,00	-114,30	-150,61	-132,91	-143,20	-141,24	31,78	16,29	25,29	23,57
A2-b	2,90	108,54	131,50	127,03	141,44	141,04	21,15	17,03	30,31	29,95
A2-c	0,00	-109,59	-128,19	-126,58	-140,01	-143,05	16,97	15,50	27,75	30,52
A2-c	2,90	109,93	129,90	127,35	142,57	142,45	18,16	15,84	29,68	29,58
A2-d	0,00	-113,40	-133,85	-130,85	-142,02	-146,62	18,04	15,39	25,24	29,29
A2-d	2,90	119,96	153,58	148,34	169,81	173,53	28,03	23,66	41,56	44,66
B2-a	0,00	26,09	32,53	28,50	17,87	21,74	24,70	9,24	31,49	16,67
B2-a	2,90	-12,90	-18,97	-12,00	-6,43	-10,47	47,06	7,00	50,13	18,86
B2-b	0,00	17,33	22,36	21,15	27,31	24,14	28,99	22,01	57,57	39,29
B2-b	2,90	-18,75	-24,21	-20,87	-23,43	-22,52	29,11	11,32	24,95	20,13
B2-c	0,00	9,49	14,18	12,23	16,11	12,46	49,38	28,88	69,76	31,22
B2-c	2,90	-15,62	-18,81	-16,73	-17,56	-16,66	20,38	7,05	12,42	6,60
B2-d	0,00	4,96	13,55	10,64	19,90	13,08	173,36	114,58	301,31	163,70
B2-d	2,90	-10,50	-20,53	-16,69	-26,13	-19,06	95,58	59,00	148,94	81,58
C2-a	0,00	48,78	26,06	56,12	151,57	179,41	46,59	15,05	210,70	267,76
C2-a	2,90	-96,32	-103,67	-112,53	-114,80	-143,08	7,62	16,83	19,18	48,54
C2-b	0,00	123,40	165,41	147,99	175,26	154,95	34,05	19,93	42,03	25,57
C2-b	2,90	-117,87	-147,50	-139,00	-156,89	-154,39	25,14	17,92	33,10	30,98
C2-c	0,00	108,67	132,83	129,22	145,81	146,53	22,23	18,91	34,18	34,84
C2-c	2,90	-116,76	-139,62	-134,75	-148,40	-149,43	19,58	15,41	27,10	27,99
C2-d	0,00	106,93	138,33	131,92	154,71	151,00	29,36	23,37	44,68	41,21
C2-d	2,90	-117,52	-162,54	-153,02	-184,75	-181,05	38,31	30,21	57,21	54,06
						Máximos	313,33	114,58	1029,62	1460,94
						Mínimos	0,27	7,00	12,42	6,60
						Média	47,47	24,24	100,64	108,51

Fonte: Autora.

Tabela 32 - Momento Fletor nos Pilares - Pórticos de 7 Pavimentos

Momento Fletor nos Pilares - Pórtico de 7 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Pilares	**Coord**	**M-AT**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**
Nº	m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m				
A2-a	0,00	18,11	43,70	17,07	-90,73	-126,19	141,31	5,71	601,01	796,83
A2-a	2,90	95,13	91,45	114,56	145,52	148,20	3,87	20,43	52,97	55,78
A2-b	0,00	-98,20	-135,71	-117,18	-116,30	-122,26	38,19	19,32	18,43	24,49
A2-b	2,90	100,76	122,20	119,67	129,95	133,52	21,28	18,77	28,97	32,52
A2-c	0,00	-98,91	-117,53	-116,34	-128,47	-134,64	18,82	17,63	29,89	36,12
A2-c	2,90	112,50	134,43	132,41	147,19	149,88	19,49	17,70	30,83	33,22
A2-d	0,00	-87,13	-102,64	-101,28	-106,88	-115,57	17,80	16,24	22,66	32,65
A2-d	2,90	67,06	86,54	84,34	94,94	100,42	29,05	25,77	41,58	49,75
A2-e	0,00	-43,59	-58,73	-56,84	-64,28	-69,86	34,71	30,38	47,45	60,24
A2-e	3,75	54,43	70,83	68,88	77,08	82,74	30,14	26,54	41,61	52,00
A2-f	0,00	-63,30	-79,55	-77,54	-86,24	-91,23	25,67	22,50	36,23	44,12
A2-f	3,75	54,12	68,28	66,64	73,67	78,83	26,18	23,15	36,13	45,66
A2-g	0,00	-83,32	-102,37	-99,92	-110,54	-115,69	22,87	19,93	32,67	38,86
A2-g	3,75	121,81	149,57	145,98	161,13	168,86	22,80	19,85	32,29	38,63
B2-a	0,00	58,45	73,20	64,14	46,70	53,48	25,24	9,73	20,11	8,50
B2-a	2,90	-18,48	-31,17	-17,79	-7,25	-14,79	68,68	3,74	60,74	19,98
B2-b	0,00	45,08	51,94	50,76	60,87	56,33	15,21	12,60	35,03	24,95
B2-b	2,90	-37,78	-47,01	-41,18	-45,29	-44,25	24,44	9,02	19,90	17,12
B2-c	0,00	33,89	40,34	37,91	42,25	38,19	19,03	11,86	24,68	12,69
B2-c	2,90	-30,98	-35,37	-32,36	-33,00	-32,39	14,18	4,46	6,55	4,55
B2-d	0,00	43,91	57,31	52,96	65,32	56,81	30,52	20,61	48,77	29,39
B2-d	2,90	-41,20	-51,96	-47,87	-56,40	-50,50	26,12	16,20	36,91	22,58
B2-e	0,00	30,07	39,16	36,06	44,01	38,36	30,24	19,94	46,38	27,58
B2-e	3,75	-37,03	-46,53	-43,18	-51,50	-45,58	25,66	16,61	39,07	23,10
B2-f	0,00	19,50	28,87	25,62	33,28	27,88	48,00	31,35	70,64	42,96
B2-f	3,75	-28,23	-37,41	-34,22	-42,11	-36,49	32,52	21,21	49,15	29,26
B2-g	0,00	7,75	17,37	14,01	21,39	16,26	124,25	80,80	176,09	109,88
B2-g	3,75	-16,83	-29,52	-25,08	-35,13	-28,09	75,43	49,07	108,75	66,94
C2-a	0,00	75,44	53,37	85,94	219,32	251,65	29,26	13,92	190,73	233,58
C2-a	2,90	-97,38	-109,63	-114,88	-118,97	-156,45	12,59	17,98	22,18	60,67
C2-b	0,00	142,31	186,10	169,75	192,54	172,16	30,77	19,29	35,30	20,98
C2-b	2,90	-128,97	-161,63	-151,97	-167,66	-168,23	25,32	17,84	30,00	30,45
C2-c	0,00	125,16	150,65	147,52	162,63	167,00	20,37	17,87	29,94	33,43
C2-c	2,90	-129,09	-154,00	-148,98	-160,66	-165,77	19,30	15,40	24,45	28,41
C2-d	0,00	128,45	160,97	154,59	175,93	173,93	25,32	20,35	36,97	35,41
C2-d	2,90	-96,50	-126,67	-120,36	-138,78	-139,11	31,26	24,72	43,81	44,16
C2-e	0,00	75,27	101,33	95,86	113,00	111,76	34,62	27,36	50,13	48,48
C2-e	3,75	-89,92	-117,07	-111,35	-129,00	-128,04	30,19	23,83	43,46	42,39
C2-f	0,00	75,23	101,71	96,23	112,87	112,47	35,20	27,92	50,04	49,51
C2-f	3,75	-80,86	-105,33	-100,16	-116,18	-115,02	30,25	23,87	43,67	42,23
C2-g	0,00	81,12	110,63	104,58	122,67	122,87	36,38	28,92	51,21	51,46
C2-g	3,75	-128,25	-171,18	-162,38	-189,15	-188,99	33,47	26,61	47,48	47,36
						Máximos	141,31	80,80	601,01	796,83
						Mínimos	3,87	3,74	6,55	4,55
						Média	33,48	21,36	59,40	60,69

Fonte: Autora.

Tabela 33 - Momento Fletor nos Pilares - Pórticos de 11 Pavimentos

Momento Fletor nos Pilares - Pórtico de 11 Pavimentos							**Diferença Percentual com Relação ao AT (%)**			
Pilares	**Coord**	**M-AT**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**	**M-W**	**M-P**	**M-MM**	**M-MC**
Nº	m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m				
A2-a	0,00	59,64	91,24	64,91	-81,52	-120,67	52,98	8,83	236,69	302,32
A2-a	2,90	96,71	88,56	118,56	166,95	163,37	8,42	22,60	72,63	68,93
A2-b	0,00	-70,46	-106,12	-87,06	-67,10	-87,40	50,59	23,56	4,78	24,04
A2-b	2,90	88,49	106,36	106,94	110,97	120,84	20,19	20,85	25,40	36,55
A2-c	0,00	-77,90	-94,21	-93,91	-102,81	-114,50	20,94	20,55	31,98	46,98
A2-c	2,90	110,67	132,74	131,75	144,90	151,56	19,94	19,04	30,93	36,94
A2-d	0,00	-46,35	-54,33	-55,53	-52,68	-69,28	17,22	19,82	13,67	49,48
A2-d	2,90	54,78	71,01	70,32	76,21	87,40	29,61	28,36	39,11	59,53
A2-e	0,00	-2,44	-12,74	-12,41	-14,23	-25,13	421,12	407,62	481,90	928,02
A2-e	3,75	26,75	38,24	37,94	40,29	51,44	42,96	41,86	50,62	92,31
A2-f	0,00	-33,84	-45,99	-45,33	-49,45	-58,91	35,90	33,95	46,12	74,09
A2-f	3,75	33,83	44,78	44,44	47,00	57,24	32,36	31,36	38,93	69,20
A2-g	0,00	-47,45	-59,14	-58,49	-62,84	-71,50	24,65	23,28	32,45	50,68
A2-g	3,75	50,76	62,36	61,87	65,35	75,10	22,85	21,88	28,74	47,94
A2-h	0,00	-48,65	-58,55	-58,01	-61,75	-69,04	20,36	19,26	26,93	41,92
A2-h	3,75	54,01	63,73	63,34	66,32	74,48	17,99	17,27	22,79	37,90
A2-i	0,00	-64,41	-75,16	-74,46	-79,05	-86,08	16,69	15,61	22,74	33,64
A2-i	3,75	53,10	63,10	62,60	66,23	73,77	18,84	17,90	24,73	38,94
A2-j	0,00	-96,42	-106,59	-105,93	-110,48	-116,92	10,55	9,86	14,58	21,26
A2-j	3,75	148,38	156,96	156,61	159,82	166,46	5,79	5,55	7,71	12,19
A2-k	0,00	-138,99	-151,43	-150,38	-156,47	-163,12	8,95	8,20	12,58	17,36
A2-k	4,30	91,78	108,94	107,52	115,58	125,08	18,71	17,16	25,94	36,29
B2-a	0,00	110,02	144,22	123,21	97,13	102,72	31,08	11,98	11,72	6,63
B2-a	2,90	-26,11	-45,87	-22,86	0,56	-14,77	75,64	12,45	102,14	43,45
B2-b	0,00	90,79	100,55	99,65	118,74	110,95	10,75	9,76	30,78	22,21
B2-b	2,90	-67,28	-81,02	-71,68	-78,08	-77,01	20,42	6,54	16,05	14,47
B2-c	0,00	74,99	84,25	81,10	87,13	81,61	12,35	8,15	16,19	8,83
B2-c	2,90	-52,19	-56,77	-52,82	-52,72	-52,66	8,76	1,21	1,00	0,89
B2-d	0,00	115,73	139,25	131,91	152,28	139,23	20,32	13,98	31,59	20,31
B2-d	2,90	-88,25	-105,43	-99,12	-112,46	-103,76	19,46	12,31	27,44	17,58
B2-e	0,00	99,37	115,22	110,16	123,41	114,87	15,95	10,86	24,19	15,60
B2-e	3,75	-98,79	-114,92	-109,54	-123,27	-114,23	16,32	10,88	24,77	15,62
B2-f	0,00	90,10	105,72	100,67	112,78	105,17	17,33	11,73	25,17	16,72
B2-f	3,75	-95,82	-111,51	-106,39	-119,29	-110,94	16,37	11,03	24,49	15,78
B2-g	0,00	75,67	90,27	85,55	96,32	89,69	19,30	13,06	27,28	18,52
B2-g	3,75	-86,65	-102,10	-97,09	-109,10	-101,51	17,83	12,04	25,90	17,14
B2-h	0,00	58,96	71,21	67,26	76,12	70,70	20,78	14,08	29,12	19,91
B2-h	3,75	-68,93	-81,91	-77,72	-87,57	-81,42	18,83	12,75	27,04	18,12
B2-i	0,00	46,41	58,36	54,49	62,62	57,71	25,73	17,39	34,90	24,33
B2-i	3,75	-55,33	-67,59	-63,63	-72,39	-67,02	22,15	14,99	30,83	21,11
B2-j	0,00	30,90	41,97	38,37	45,55	41,22	35,82	24,16	47,38	33,37
B2-j	3,75	-44,37	-55,80	-52,10	-59,89	-55,17	25,77	17,42	34,99	24,34
B2-k	0,00	23,37	33,78	30,33	36,57	32,74	44,57	29,82	56,51	40,10
B2-k	4,30	-27,41	-40,66	-36,29	-44,48	-39,44	48,34	32,40	62,27	43,88
C2-a	0,00	117,71	101,11	134,65	334,12	368,04	14,11	14,39	183,84	212,66
C2-a	2,90	-97,29	-112,78	-112,68	-117,43	-171,48	15,92	15,81	20,70	76,26
C2-b	0,00	172,67	216,54	202,68	218,34	197,25	25,41	17,38	26,45	14,24

C2-b	2,90	-144,79	-178,84	-168,03	-179,23	-185,29	23,51	16,05	23,79	27,97
C2-c	0,00	150,54	175,74	173,71	186,80	196,62	16,74	15,39	24,09	30,61
C2-c	2,90	-136,52	-158,48	-154,39	-160,60	-172,37	16,09	13,10	17,64	26,27
C2-d	0,00	175,88	213,67	206,43	229,42	229,47	21,49	17,37	30,44	30,47
C2-d	2,90	-117,11	-149,57	-142,76	-160,45	-164,18	27,72	21,90	37,01	40,19
C2-e	0,00	124,84	154,54	148,25	166,47	166,95	23,79	18,75	33,34	33,72
C2-e	3,75	-128,08	-157,82	-151,45	-169,63	-170,35	23,23	18,25	32,44	33,01
C2-f	0,00	123,57	152,42	146,50	162,83	165,00	23,35	18,56	31,77	33,52
C2-f	3,75	-133,04	-161,50	-155,50	-172,69	-173,50	21,40	16,88	29,80	30,42
C2-g	0,00	119,59	146,95	141,32	156,58	158,83	22,88	18,17	30,93	32,81
C2-g	3,75	-137,14	-165,87	-159,88	-176,70	-178,11	20,95	16,58	28,85	29,87
C2-h	0,00	107,65	131,06	126,24	139,37	141,13	21,75	17,26	29,46	31,10
C2-h	3,75	-125,71	-150,29	-145,16	-159,58	-160,66	19,55	15,47	26,94	27,81
C2-i	0,00	107,33	131,09	126,24	139,20	141,40	22,14	17,61	29,69	31,74
C2-i	3,75	-113,34	-137,32	-132,36	-146,07	-147,53	21,16	16,78	28,88	30,17
C2-j	0,00	117,14	139,40	134,85	146,87	148,98	19,01	15,12	25,38	27,18
C2-j	3,75	-177,13	-198,80	-194,28	-206,57	-207,83	12,23	9,68	16,62	17,33
C2-k	0,00	148,23	172,06	167,28	179,74	182,62	16,07	12,85	21,26	23,20
C2-k	4,30	-115,61	-149,07	-142,36	-160,24	-163,93	28,95	23,14	38,61	41,80
						Máximos	421,12	407,62	481,90	928,02
						Mínimos	5,79	1,21	1,00	0,89
						Média	29,07	22,88	41,99	52,54

Fonte: Autora.