

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**DEIVIDI MAURENTE GOMES DA SILVA**

**COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MODELOS COMPUTACIONAIS PARA  
OBTENÇÃO DE ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS EM UM *RADIER* DE  
FUNDAÇÃO COM INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA**

**Alegrete  
2015**

**DEIVIDI MAURENTE GOMES DA SILVA**

**COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MODELOS COMPUTACIONAIS PARA  
OBTENÇÃO DE ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS EM UM *RADIER* DE  
FUNDAÇÃO COM INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Álisson Simonetti Milani

Coorientador: André Lübeck

**Alegrete  
2015**

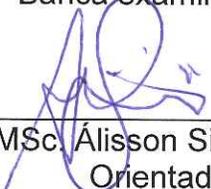
DEIVIDI MAURENTE GOMES DA SILVA

**COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MODELOS COMPUTACIONAIS PARA  
OBTENÇÃO DE ESFORÇOS E DESLOCAMENTOS EM UM RADIER DE  
FUNDAÇÃO COM INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de dezembro de  
2015.

Banca examinadora:



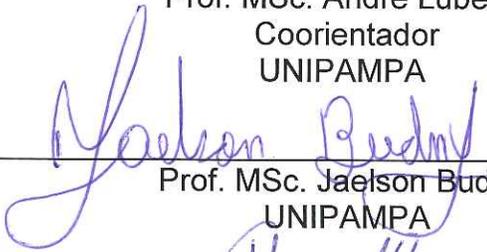
---

Prof. MSc. Alisson Simonetti Milani  
Orientador  
UNIPAMPA



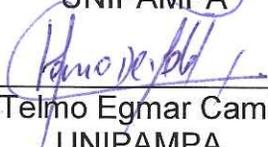
---

Prof. MSc. André Lübeck  
Coorientador  
UNIPAMPA



---

Prof. MSc. Jaelson Budny  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld  
UNIPAMPA

“A arte de vencer é continuar quando os outros decidem parar”.

*Marcilio Maurenre*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Regina e Marcilio, pela presença constante e apoio nas minhas decisões pessoais, acadêmicas e profissionais.

Igualmente, agradeço ao meu irmão, Marcilio, pelo acompanhamento nas indaadas dessa vida que resolvi enfrentar e pela amizade incondicional. A Linda, minha irmã, pelos mimos e conselhos que acompanharam toda essa jornada

Aos demais irmãos, agradeço pelas palavras e mais diferentes formas de recepção nas chegadas em casa.

Agradeço ao professor Alisson, pela paciência, dedicação e principalmente pela forma como ele encara seu compromisso com a docência; ao professor André, pelas inúmeras revisões, explicações e aconselhamentos no desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço à minha “mãe-professora” Adriana Salbego pelas incontáveis palavras de motivação e pelos mais simples e pequenos gestos de carinho.

Agradeço aos professores Ricardo Schenato, Rodrigo Padilha, Elizabete Bavastri, Ederli Marangon e Magnos Baroni por acreditarem que em seus projetos eu poderia ser bem sucedido.

Agradeço à Eng Rosmari Apollo por espelhar a minha escolha da profissão.

Ao Onias Neto, grande Amigo, pelos conselhos, estudos e companheirismo; ao Pablo Botton, pela preocupação e companhia.

À Helena Leon, pela amizade ao contrabalançar com emoção a minha “razão”. Ao Flávio Vieira pelos trabalhos mal dormidos, pelos diagramas invertidos e pelos graus sobrevividos.

Ao Jean Cogo, pelas boas palavras nos momentos complexos. À Manoela Sauthier por possibilitar as análises no Eberick e ao Felipe Klimaczewski pela disposição imediata na graficação de alguns modelos.

Agradeço às possibilidades de estudar em uma universidade pública e, entre os estudos, conhecer a cultura da Alemanha, país escolhido para o intercâmbio acadêmico.

Por fim, cito minha memória seletiva ao novo, ao recente, e incluo nesses parágrafo todos aqueles que a pressa de entregar esse trabalho em 40 minutos não foram citados.

## RESUMO

Com o advento do computador e seu constante aprimoramento, a velocidade e capacidade no processamento de informações e cálculos é gradativamente incrementada. Dessa forma, a utilização de modelos computacionais, nas mais diversas áreas da engenharia, é capaz de simulações realísticas com a obtenção de relevantes resultados. Dessa forma, concebeu-se uma edificação em concreto armado a qual o elemento de fundação pondera a teoria de Winkler que considera o solo como um meio elástico cujas deformações são proporcionais à magnitude dos carregamentos atuantes. As simulações foram analisadas sobre dois diferentes solos: uma areia mediamente compacta e uma areia fofa, com distintos coeficientes de reação vertical. Foram criados modelos no Ftool, Eberick e SAP para os diferentes solos. Analisou-se os deslocamentos dos nós da grelha referentes a todos os pilares, os momentos em dois eixos perpendiculares para os nós referentes a dois pilares e os momentos nas bases e topos dos tramos iniciais de três diferentes pilares para os mesmos eixos. Os resultados identificaram resultados significativos no que diz respeito aos deslocamentos da grelha nos três modelos. Quanto aos momentos nos nós considerados, constatou-se valores equivalentes para os modelos do Eberick e SAP, no entanto, para o Ftool não foi observada convergência nestes valores. Os momentos nos primeiros tramos dos pilares assemelhou-se às demais análises de momento, equivalendo os modelos Eberick e SAP e divergindo os valores obtidos no Ftool. Diante do exposto, sem que haja uma adaptação maior no modelo de pórticos associados com interação solo estrutura no Ftool, sua utilização para esta simulação não mostrou-se adequada.

**Palavras-chave:** *radier*, interação solo estrutura, teoria de Winkler

## ABSTRACT

With the advent of the computer and its constant improvement, the velocity and the ability to process information and calculations are gradually increased. Thus, the use of computational models, in several areas of engineering, is able to perform realistic simulations, and it gets relevant results. Therefore, it was conceived a building of reinforced concrete. The foundation element ponders the Winkler theory which considers the soil as an elastic element environment, whose deformations are proportional to the magnitude of acting loads. The simulations were analyzed on two different soils: a moderately compacted area, and a soft sand, with distinct vertical reaction coefficients. Each model was created in Ftool software, Eberick and SAP. It was analyzed the displacements of the nodes of the grid related to all pillars, the moments in the nodes referred to the two pillars, and the moments at the base and top of the three pillars for the two perpendicular axes. The results showed significant results with respect to the grid displacements in the three models. As to the moments in the considered nodes, the values found for Eberick and SAP models are equivalent, however, for the Ftool model it does not seem to converge. The moments in the spans of the pillars, resemble the other moment's analysis, the Eberick and SAP models are equivalent, and the Ftool model is diverging from the others. Considering the above, without further adaptation in the model of portico associated with soil structure in Ftool, So without further adaptation in the model frames associated with soil structure interaction in Ftool, their use for this simulation did not show up properly.

**Keywords:** *radier*, soil structure interaction, Winkler theory

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1 Objetivos .....	14
1.1.1 Objetivo geral.....	14
1.1.2 Objetivos específicos .....	14
1.2 Justificativa.....	15
1.3 Estrutura do trabalho.....	15
<b>2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1 <i>Radier</i> .....	16
2.1.1 Modelagem matricial .....	18
2.1.1.1 O elemento de barra.....	19
2.2 Aspectos geotécnicos .....	19
2.2.1 A hipótese de Winkler.....	21
2.2.2 Coeficiente de reação vertical (CRV) .....	22
2.2.2.1 Métodos para determinação do CRV .....	23
2.2.3 Coeficiente de reação horizontal (CRH) .....	30
2.2.4 Estimativa dos recalques verticais .....	31
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
3.1 Concepção da edificação .....	33
3.2 Quantificação dos carregamentos permanentes e acidentais e determinação das combinações de ações.....	34
3.2.1 Combinações de ações.....	34
3.3 Modelagem do <i>radier</i> .....	35
3.3.1 Modelos estruturais testados.....	37
3.4 Identificação dos solos e coeficientes verticais de reação e áreas de influência no <i>radier</i> .....	38
3.4.1 Área de influência das molas .....	39
3.5 Comparação dos resultados obtidos com coeficientes de reação distintos .....	39
3.5.1 Simulação no Ftool.....	39
3.5.2 Simulação no Eberick.....	42
3.5.3 Simulação no SAP .....	43
3.5.4 Análise dos deslocamentos.....	45

3.5.5 Análise dos momentos nos nós da grelha.....	45
3.5.6 Momentos nos pilares 3, 5 e 8 .....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
4.1 Análise dos deslocamentos no nós da grelhas referente aos pilares 1 ao 15 .....	50
4.1.1 Solo 1: areia mediamente compacta .....	50
4.1.2 Solo 2: areia fofa .....	58
4.1.3 Comparação entre os solos 1 e 2.....	65
4.2 Análise dos momentos nos nós da grelha referente aos pilares 5 e 8 .....	66
4.2.1 Solo 1: areia mediamente compacta .....	66
4.2.2 Solo 2: areia fofa .....	70
4.2.3 Comparação entre os solos 1 e 2.....	74
4.3 Análise dos momentos na base e topo dos pilares 3, 5 e 8 entre os pavimentos térreo e primeiro pavimento tipo.....	74
4.3.1 Solo 1: areia mediamente compacta .....	74
4.3.2 Solo 2: areia fofa .....	81
4.3.3 Comparação entre os solos 1 e 2.....	87
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>89</b>
5.1 Conclusões.....	89
5.2 Recomendações .....	90
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O acréscimo gradativo na robustez dos projetos é responsável pela criação de materiais e métodos que atendam às necessidades impostas por esse desenvolvimento construtivo.

Atualmente, os componentes das edificações são constantemente estudados e reinventados, seja por requisitos ecologicamente sustentáveis, a exemplo da adição da cinza da casca de arroz em concretos, seja pela alta resistência e o baixo peso estrutural, como é o caso de materiais compósitos com fibras de carbono, conforme Figura 1.

Figura 1: Composições de concretos fibrosos em carbono



Fonte: [1]

Estruturas leves e com elevado desempenho, conforme a Figura 1, apresentam-se na atualidade como alternativas indispensáveis na concepção de alguns modelos construtivos. Igualmente, os demais elementos estruturais devem corroborar para o bom desempenho de uma edificação, a exemplo dos elementos de fundação.

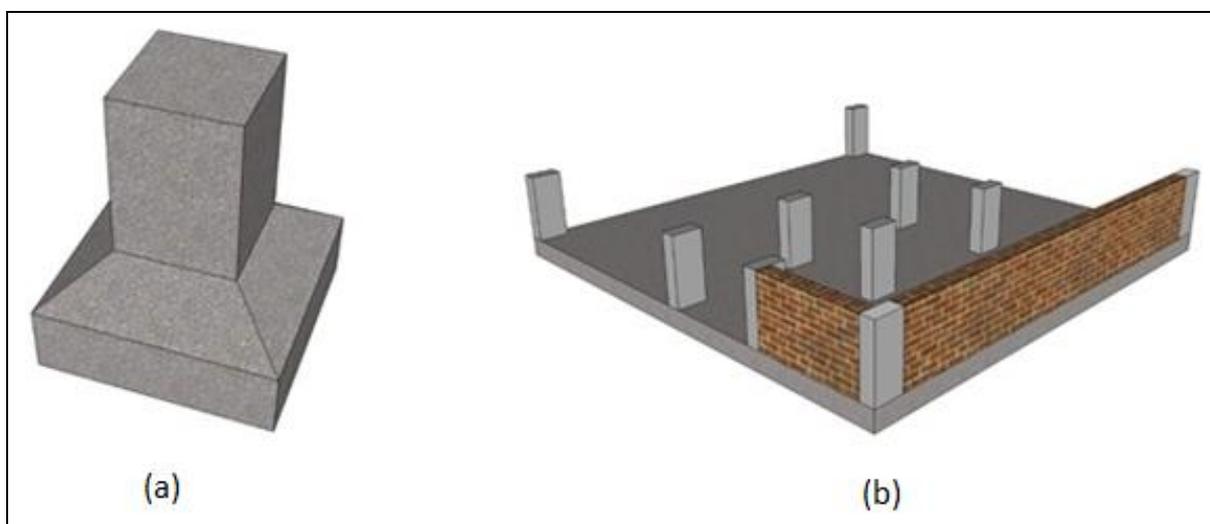
Um elemento de fundação é a estrutura capaz de receber os carregamentos da superestrutura de uma edificação e distribuí-la ao solo. Atualmente, uma diversidade de opções podem ser adotadas para uma mesma concepção construtiva [2].

As fundações podem ter duas principais classificações: superficiais ou profundas, definidas conforme suas dimensões, profundidade de implantação e forma de distribuição do carregamento ao solo.

A capacidade de carga do solo, no qual uma edificação será assentada, as cargas atuantes, o mercado e as técnicas construtivas disponíveis no local são fatores imprescindíveis no momento da escolha do elemento de fundação. Elemento este responsável pela dissipação das tensões no maciço do solo.

São consideradas superficiais as fundações que distribuem o carregamento predominantemente por sua base, além de sua profundidade de assentamento não exceder duas vezes sua menor dimensão, sendo os *radiers*, sapatas isoladas, corridas ou associadas e vigas de fundação exemplos dessa tipologia [2].

Figura 2: Ilustração de elementos de fundação tipo sapata isolada e *radier*



Fonte: Elaboração própria

As sapatas são elementos de fundação cujos esforços de tração atuantes em seu interior são resistidos pela armadura metálica e apenas tensões de compressão são transmitidas ao solo pelo concreto. A confecção de uma sapata deve levar em consideração fatores como a planicidade da base, a inclinação do terreno, a excentricidade do carregamento, entre outros, que irão determinar seu bom desempenho quando corretamente considerados. Quanto à forma, uma sapata pode ser quadrada, retangular, circular, etc.

A associação de sapatas também é prática corrente de obra, quando o terreno demanda o uso de fundações superficiais e o cálculo resulta na sobreposição das sapatas isoladas, opta-se pela fusão destas sapatas, resultando nas sapatas associadas. Nessa tipologia, uma sapata recebe diferentes pilares que normalmente não estão alinhados [2].

Por fim, entre as fundações superficiais, está o *radier*. Concepção adotada quando a superposição das projeções das sapatas em planta é muito elevada. Um *radier* é uma placa única, em concreto, que pode ser simples, armado ou protendido, na qual todos os pilares de uma edificação estarão atuando. Esta placa única tende a homogeneizar as cargas e recalques.

Diferentes formas construtivas podem ser adotadas para um *radier*, como descrito no decorrer desse trabalho, eles podem ser lisos, com grelhas de vigas, com capitéis etc.

Como o *radier* recebe os carregamentos de todos os pilares do edifício, o conjunto de esforços transmitido ao elemento de fundação é complexo. Sendo assim, a geometria do *radier* deve ser tal que as resultantes dos carregamentos atue próxima ao centro geométrico da fundação.

A atuação direta de um elemento de fundação e o maciço de solo exige a consideração da interação de ambos materiais trabalhando em conjunto. Esse fenômeno é denominado de Interação Solo Estrutura (ISE) [3] [4].

A concepção dos projetos ocorre normalmente entre equipes diferentes, ou seja, o setor de fundações recebe apenas o resumo do projeto estrutural contendo as cargas atuantes nos pilares apoiados nas fundações, porém, a origem e a natureza destes carregamentos não é de conhecimento geral entre os profissionais envolvidos. Dessa forma, os métodos triviais de dimensionamento acabam por considerar os elementos de fundação como indeslocáveis e desprezam os recalques produzidos e o resultado que os mesmos provocam sobre a estrutura.

A dinâmica das cargas, seja em seu acréscimo durante a evolução dos pavimentos, seja durante a sua atuação das cargas de vento, pode intensificar a ISE e produzir fenômenos sobre a fundação não considerados nas etapas de dimensionamento.

A análise do maciço de solo pode ser realizada de maneira elástica ou plástica. Sendo que para a primeira um dos métodos mais difundidos é a hipótese de winkler, onde a resposta do maciço é aproximada por uma equação de mola tal qual a lei de Hooke. O comportamento do solo é representado através de uma constante de mola  $k$ , chamada coeficiente de reação do solo [5].

A consideração do solo pode ser feita de duas diferentes formas, como um meio contínuo ou como um meio discreto. A primeira, mais realista, permite levar em consideração todas as heterogeneidades naturais do solo, no entanto, é de aplicação

mais custosa, muitas vezes inviável. Já, o segundo, procura representar o solo como elementos discretos, simplificados, que resultem em um comportamento global semelhante à situação real, mas sem representar a realidade na microescala.

Esses modelos discretos, pela praticidade, são os mais abordados na modelagem estrutural, ainda mais com a aplicabilidade do método dos elementos finitos e a resolução estrutural com auxílio de computadores

O MEF trabalha com a discretização dos elementos constituintes da estrutura e do maciço de solo. O advento do computador tornou esse método amplamente difundido no meio acadêmico devido ao elevado número de cálculos exigidos e necessidade de considerável capacidade de processamento. Os resultados obtidos nas simulações por essa metodologia apresentam relevante acurácia.

Entre as possibilidades de representação do solo, um dos modelos mais tradicionais e difundidos é o Modelo de Winkler (1876). Este considera que os apoios (elementos de fundação) estão fixos à três molas coincidentes com os eixos cartesianos capazes de demonstrar uma proporção entre as pressões e deslocamentos aos quais esses estão submetidos. A tradução do comportamento do solo na teoria de Winkler se dá na determinação dos coeficientes de mola. Assim, a idealização do solo se dá pela resolução da Equação ...(1) da força estática.

$$F = k \cdot x \quad \dots(1)$$

Onde  $F$  são os carregamentos atuantes sobre o elemento,  $k$  a constante elástica que representa o comportamento do solo e  $x$  as deformações resultantes.

A simplicidade dessa analogia se enquadra na prática dos projetos estruturais. Nestes, os engenheiros usam programas computacionais que rapidamente resolvem um sistema de equações como a acima, encontrando as deformações no elemento de fundação a partir das reações aplicadas nos pilares e do fornecimento da constante de mola que representa o solo.

Dentre os programas computacionais que viabilizam a utilização da teoria de Winkler estão os softwares Ftool, Eberick, SAP, utilizados para análises e/ou dimensionamentos estruturais em concreto armado moldado *in loco* e concreto pré-moldado. Esses softwares podem apresentar tanto interfaces simplificadas como o Ftool, como refinadas, a exemplo do SAP.

Apesar da possível análise computacional da ISE, a maior dificuldade está em determinar de maneira realista o comportamento do solo, seja pelo seu comportamento anisotrópico, seja pela determinação da constante de mola.

A constante de mola é comumente chamada na bibliografia de coeficiente de reação vertical, mas também recebe denominações de coeficiente de recalque ou modulo de reação [6].

A determinação do coeficiente de reação vertical ( $k$ ,  $k_v$  ou  $k_s$ ) pode ser feita através de tabelas, correlações empíricas ou por ensaios de campo. O ensaio de placa, realizado *in loco*, é responsável pela obtenção de parâmetros que mais assemelham-se à realidade à realidade física, visto que a obtenção de  $k_v$  considera parâmetros reais do local onde será implantado o empreendimento. Quanto ao coeficiente de reação horizontal ( $k_h$ ), normalmente sua obtenção ocorre através de correlações com o valor de  $k_v$ .

Por fim, esse estudo é responsável por contemplar uma edificação em concreto armado composta um pavimento de cobertura, três pavimentos tipo e um pavimento térreo atuando sobre um elemento de fundação do tipo *radier*. As considerações em estudo contemplam aspectos estruturais, tais como esforços e deformações, impostos ao elemento de fundação; e geotécnicos, relacionados aos diferentes coeficientes de reação vertical atuando nas simulações.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Comparar deslocamentos e esforços de um elemento de fundação tipo *radier* sujeito ao carregamento oriundo de uma edificação em concreto armado convencional e sua interação com o solo.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Modelar uma edificação tendo como elemento de fundação um *radier*;

Comparar os esforços internos atuantes nos pilares entre o modelo tendo como suporte dois diferentes tipos de solo;

Avaliar a influência da variação do coeficiente de recalque vertical sobre os esforços e recalques;

Analisar momentos e deslocamentos sofridos através da influência do vento na edificação.

## 1.2 Justificativa

A autonomia dos projetistas de estruturas e fundações acaba por desconsiderar as interferências na relação entre estes projetos, ou seja, o dimensionamento de fundações elenca apenas aspectos relacionados aos carregamentos atuantes nas fundações e desconsideram sua origem. Os apoios indeslocáveis idealizados pelos projetistas estruturais acabam por agravar esse cenário, pois desconsideram a interação solo estrutura.

Os *radiers* são amplamente utilizados em projetos multipavimentos de alvenaria estrutural, paredes contínuas de concreto, residências populares. Todavia, sua aplicação em edificações de concreto armado convencional e em número superior à 2 pavimentos são raras.

Dessa forma, o presente estudo tem a finalidade de estudar a alternativa de um *radier* concebido para receber as cargas de um edifício em concreto armado convencional, ou seja, com pilares e vigas compondo sua superestrutura.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Serão considerados neste trabalho os seguintes tópicos: a concepção construtiva *radier*, bem como seu dimensionamento e aplicações; aspectos geotécnicos relacionados ao solo no qual o elemento de fundação está apoiado, considerando principalmente o coeficiente de reação vertical, por fim, a análise numérica, através dos softwares Ftool, Eberick e SAP, de um *radier* atuando em diferentes tipos de solos.

## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

O estudo de um elemento de fundação exige a consideração de características relacionadas às suas formas e composição, bem como às propriedades do maciço de solo que a recebe. A multidisciplinaridade na obtenção desses dados vem a discorrer desde a concepção de um *radier* à obtenção de parâmetros de reações horizontal e vertical do solo. Dessa forma, alguns conceitos dessas áreas são essenciais para a delimitação desta pesquisa.

### 2.1 *Radier*

São elementos de fundação em contato diretamente com o solo, ou seja, os carregamentos atuantes em uma laje *radier* são distribuídos uniformemente ao solo visto que suas dimensões englobam toda a área do pavimento térreo da edificação.

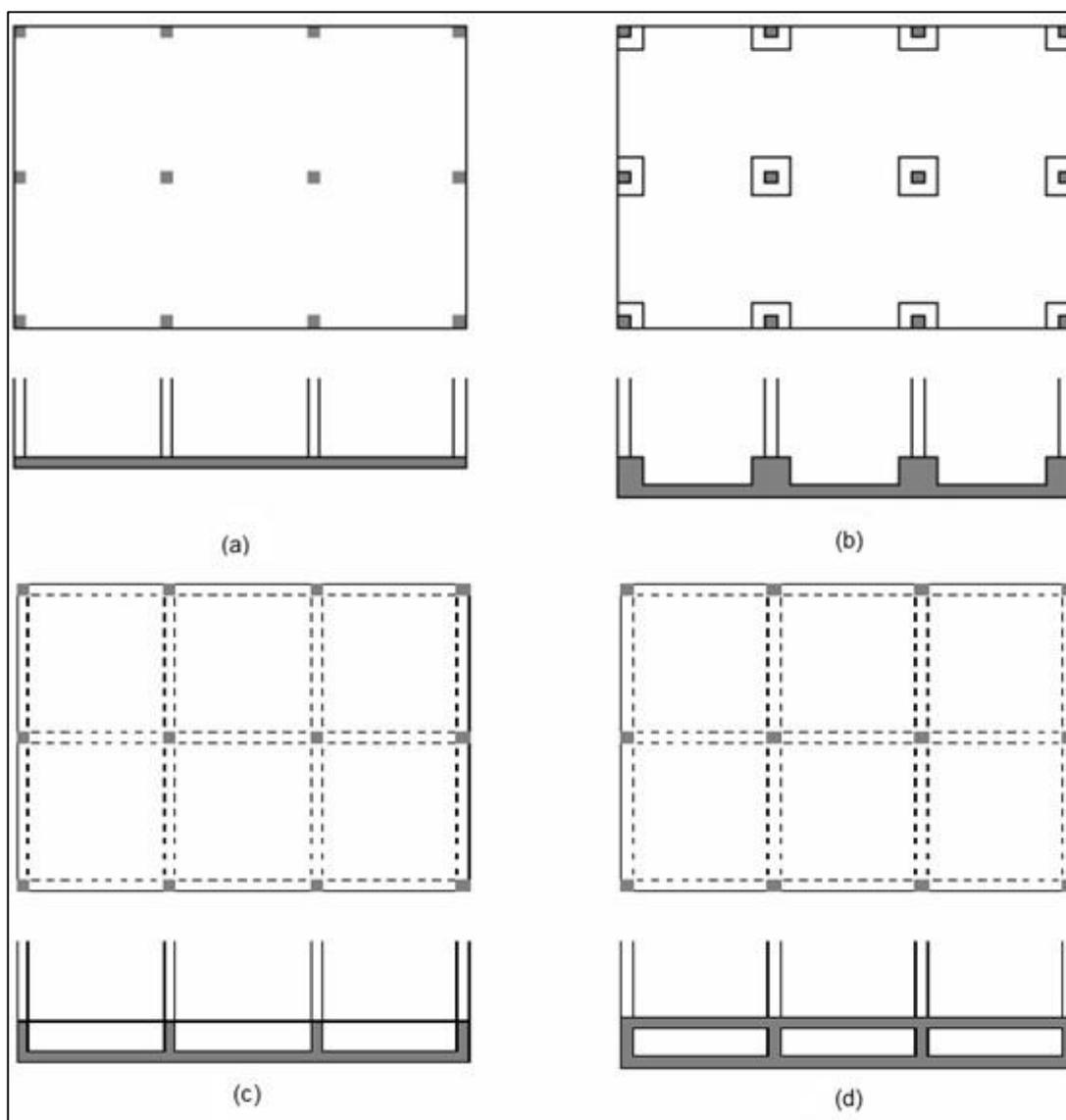
Os pilares constituintes do pavimento inicial atuam diretamente no *radier*. Dessa forma, a concentração de cargas em determinados pontos deve ser analisada através de softwares que contemplem a interação e superposição desses carregamentos.

Um elemento de fundação do tipo *radier* é utilizado quando existe a necessidade de atender uma ou mais das seguintes condições: eliminar grandes áreas de superposição de sapatas, uniformizar os recalques da estrutura global e/ou viabilizar a execução de edificações sobre solos com capacidade de carga reduzida [7].

Sua utilização muito ampla em edificações populares de pavimento único, acaba difundindo-se às estruturas em alvenaria estrutural e posteriormente aos empreendimentos em concreto convencional, multipavimentos, como o alvo deste estudo [7].

Por fim, uma série de concepções construtivas pode ser obtida através da utilização de *radiers*, conforme a Figura 3:

Figura 3: *Radiers* conforme a forma (a) liso, (b) com pedestais, (c) com vigas e (d) em caixão



Fonte: Adaptação [8]

Na Figura 3 estão apresentadas as classificações de um *radier* conforme os elementos que o constituem: (a) liso, (b) com pedestais (cogumelos), (c) com vigas e (d) em caixão.

As metodologias de cálculo baseiam-se em dois casos: “as pressões variam linearmente sob o *radier* e as pressões são uniformes nas áreas de influência dos pilares” [8]. Dessa forma, a simplificação de um elemento tipo *radier* para análise numérica pode ser feita considerando com faixas dispostas longitudinal e transversalmente, bem como através da área de influência de cada pilar recebido pelo *radier*.

No primeiro caso, o *radier* é tratado como um elemento rígido e as pressões de contato são calculadas em função do carregamento atuante, seguindo o modelo de Winkler.

Já, o segundo caso, considera a área de influência e o carregamento de cada um dos pilares atuantes sobre o *radier*. Após, a razão entre o carregamento e a área encontrados define a faixa de pressões atuantes ao longo de todo elemento de fundação. Finalmente, o *radier* é aproximado de uma laje apoiada por vigas e pilares e o elemento único final de fundação é dimensionado para tais solicitações.

### 2.1.1 Modelagem matricial

Os métodos matriciais de análise de estruturas fornecem uma linguagem matemática conveniente para descrever estruturas complexas e as manipulações matriciais necessárias podem ser realizadas facilmente por meio de computadores. As equações matriciais usuais não são manipuláveis por calculadoras, a menos que estejam sendo calculadas as estruturas mais elementares.

A análise matricial de estruturas é um tópico da análise estrutural em que as equações que regem os problemas a serem resolvidos são formuladas matricialmente, seja através de equações de equilíbrio de forças, seja pela compatibilidade das deformações. Dessa forma, a formulação do modelo a ser analisado é definido como idealização estrutural.

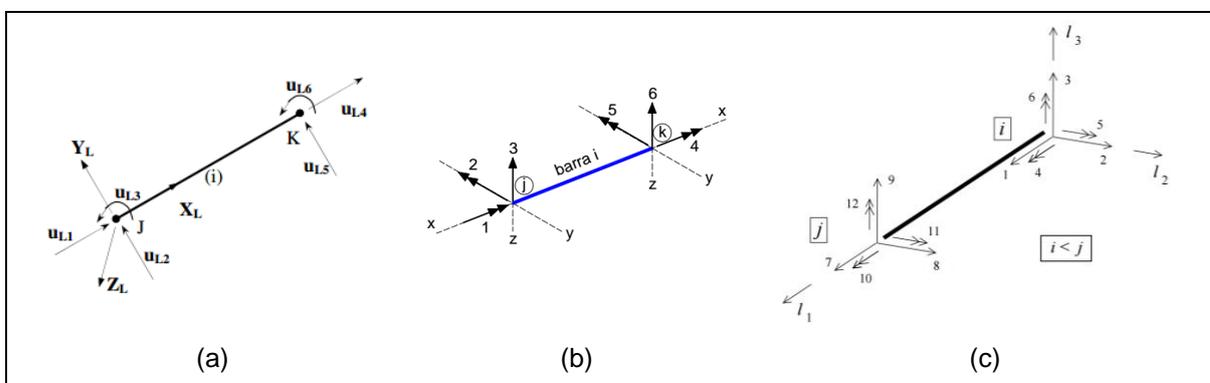
Os elementos componentes dos modelos apresentados nessa monografia apresentam dimensões finitas interligados entre si por pontos nodais (nós) onde ocorrem a concentração das forças de ligação entre os elementos. As ações e deslocamentos serão discretizados nos nós e a composição destes elementos para construir o modelo estrutural resultará em um sistema de equações algébricas tratado matricialmente.

O sistema de coordenadas em uma modelagem matricial pode ser global ou local. No sistema de coordenadas global a estrutura é tratada como um todo, ou seja, todos os elementos são considerados atuando simultaneamente; no sistema de coordenadas local, os graus de liberdade de cada elemento é analisado separadamente. Entende-se por graus de liberdade as variáveis, no método dos deslocamentos, referentes aos deslocamentos e rotações dos nós da estrutura. Dessa forma, as estruturas podem ser simplificadas a elementos de barras conectadas entre si por nós.

### 2.1.1.1 O elemento de barra

Um elemento de barra é responsável por conectar dois nós em uma estrutura. Um elemento de pórtico espacial apresenta 6 graus de liberdade para cada um dos nós ligados à extremidade de um elemento de barra, ou seja, 3 translações e 3 rotações: um pórtico plano, composto por barras, apresenta três graus de liberdade para cada um de seus nós: translações vertical e horizontal e uma rotação. Dessa forma, cada barra poderá apresentar 3 graus de liberdade em cada extremidade, conforme a Figura 4:

Figura 4: Elementos de barra



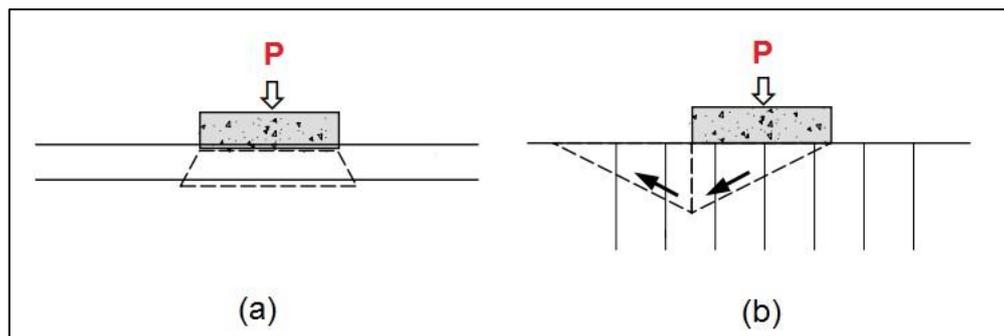
Fonte: [11]

Na Figura 4, o elemento (a) refere-se à barra de um pórtico plano, (b) à barra de uma grelha e (c) barra de um pórtico espacial [11].

## 2.2 Aspectos geotécnicos

O solo em contato com o elemento de fundação e suas camadas adjacentes, responsáveis por receber o bulbo de tensões, irão nortear o desempenho do sistema estrutural e os recalques oriundos da execução ou serviço da edificação. Solos com parcelas de coesão e ângulo de atrito com elevada distinção entre si podem apresentar diferentes formas de ruptura quando solicitados. Assim, aqueles com maior resistência e conseqüentemente menores graus de deformação rompem de forma geral, ou seja, o plano de ruptura é contínuo e bem definido. Em contrapartida, aqueles com maiores deformações e menos resistentes rompem por puncionamento: o elemento de fundação tende a penetrar gradativamente no solo e comprimir o maciço adjacente [15] [6], conforme observado na Figura 5:

Figura 5: Formas de ruptura de um maciço de solo



Fonte: Adaptação [16]

A ruptura do maciço do solo adjacente à fundação pode ser observada de formas equivalentes: ora por recalques acentuados através da eliminação e/ou redistribuição porosa da amostra de solos finos Figura 5(a), ora o rearranjo das partículas granulares contribui para o deslocamento e posterior ruína do elemento de fundação Figura 5(b).

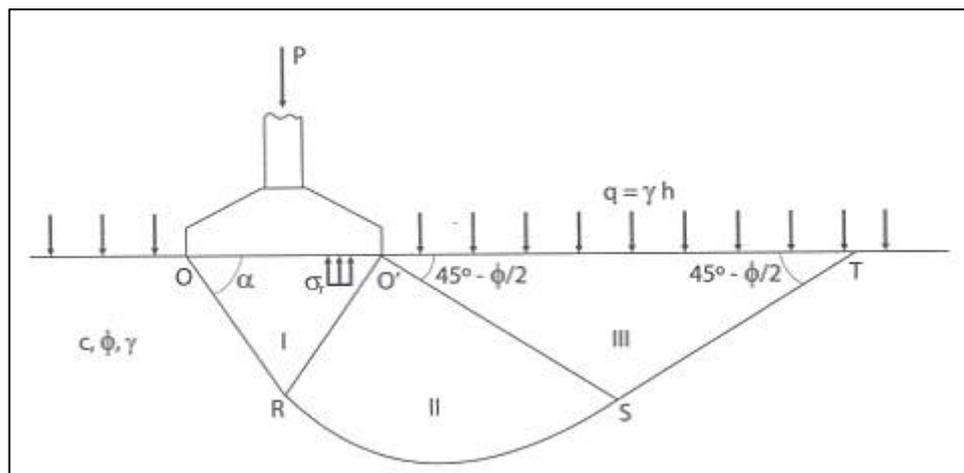
Diante do exposto, é possível afirmar que os recalques de um elemento de fundação ocorrem essencialmente pela interação solo-estrutura oriunda dos carregamentos atuantes. A aproximação do comportamento físico entre ambos pode ser estimada através da obtenção de parâmetros como os coeficientes de reação vertical e horizontal do solo. A utilização desses dados possibilita a simulação numérica do dimensionamento das estruturas.

Ainda, pela preposição de VESIC (1975) *apud* [15], a Equação ...(2) apresenta a forma geral para determinação da tensão admissível do maciço atuante sob o elemento de fundação superficial.

$$\sigma_r = c \cdot N_c \cdot S_c + q \cdot N_q \cdot S_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \quad \dots(2)$$

Os parâmetros da equação ...(2) relacionados a  $c$ ,  $q$  e  $\gamma$  referem-se às parcelas de coesão, sobrecarga e atrito, respectivamente. O fator  $N$  refere-se à capacidade de suporte do material e varia em função do ângulo de atrito do solo. A variável  $S$  está relacionada à geometria do elemento de fundação. A Figura 6 ilustra a contribuição dessas três parcelas.

Figura 6: Superfície potencial de ruptura



Fonte: [15]

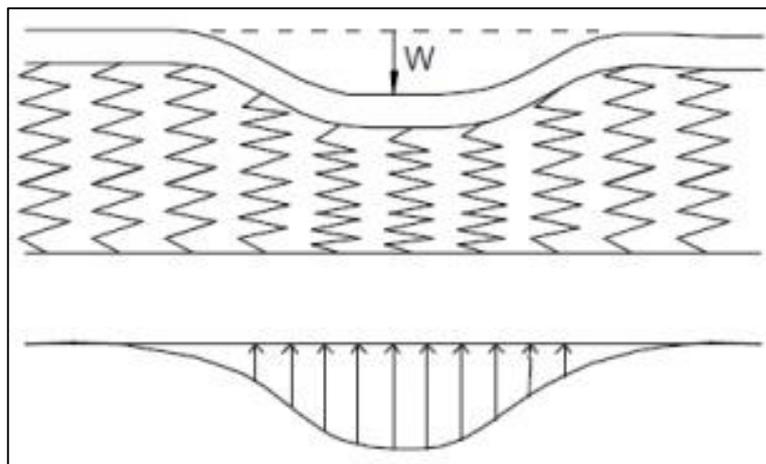
As parcelas I, II e III representam os parâmetros  $c$ ,  $q$  e  $\gamma$ , respectivamente, pela formulação de Terzaghi (1943) *apud* [15], ilustrados na Figura 6.

Largamente, os cálculos relativos ao dimensionamento de fundações, são considerados apoiados em pontos indeslocáveis [5]. A elaboração de projetos mais complexos, em cuja a interação solo estrutura é acentuada pela robustez dos elementos estruturais, exige o elenco das características do solo, tais como os coeficientes de reação vertical e horizontal, parâmetros básicos para determinação dos esforços atuantes sobre o elemento de fundação e os recalques aos quais é submetido.

### 2.2.1 A hipótese de Winkler

Considerando uma constante elástica na interação solo estrutura, Winkler (1867) propôs um modelo linear nas proporções tensão/deformação e rigidez do solo, conforme a Figura 7. Dessa forma, pela facilidade em sua aplicação, a formulação proposta é amplamente utilizada em problemas envolvendo as interações solo, fundação e estrutura [3] [4] [13] [14] [18].

Figura 7: A Teoria de Winkler



Fonte: [5]

A Figura 7 ilustra a teoria de Winkler no qual cada ponto de aplicação de carga responde de forma independente, ou seja, o efeito de continuidade do meio é desconsiderado, conforme a Equação ...(3):

$$k_v = \frac{q}{w} \quad \dots(3)$$

Na Equação ...(3)  $q$  é a tensão aplicada e  $w$  a deformação à qual o maciço de solo está submetido.

Salienta-se que nessa formulação a deformação da fundação fica restrita às regiões carregadas [19].

Algumas desvantagens são apresentadas para esse modelo, por exemplo: a dispersão da carga sobre uma área de influência que cresce gradualmente com o acréscimo de profundidade é desconsiderada pelo modelo idealizar o comportamento de tensão deformação linear. Ainda, a maior desvantagem reside na independência das molas, o que implica em desconsiderar a ligação coesiva entre as partículas contidas no meio solo [17].

### 2.2.2 Coeficiente de reação vertical (CRV)

Considerando que rigidez é a resistência ao deslocamento do maciço de solo imposto pela solicitação do carregamento da superestrutura, o CRV atua na teoria de

Winkler de maneira equivalente a constante elástica em um sistema massa mola, ou seja, a rigidez do solo será representada por essa variável [26].

O CRV pode ser obtido através três maneiras distintas: valores padronizados, ensaios de campo ou estimativa de recalques.

### 2.2.2.1 Métodos para determinação do CRV

A determinação do CRV está diretamente relacionada aos materiais constituintes do solo. No entanto, o grau de adensamento e ou compactação das camadas influi fortemente na sua mensuração. Algumas metodologias são utilizadas para a obtenção do CRV:

a) Valores padronizados: trata-se de valores característicos para cada material relacionados por Béton – Kalender (1962) *apud* [20], conforme a Tabela 1:

Tabela 1: Valores do coeficiente de reação vertical ( $k_v$ )

Valores $k_v$ em $\text{kg/cm}^3$	
Turfa leve-solo pantanoso	0,50 a 1,00
Turfa pesada-solo pantanoso	1,00 a 1,50
Areia fina de praia	1,00 a 1,50
Aterro de silte, de areia e de cascalho	1,00 a 2,00
Argila molhada	2,00 a 3,00
Argila úmida	4,00 a 5,00
Argila seca	6,00 a 8,00
Argila seca endurecida	10,00
Silte compacto com areia e pedra	8,00 a 10,00
Silte compacto com areia e muita pedra	10,00 a 12,00
Cascalho miúdo com areia fina	8,00 a 12,00
Cascalho médio com areia fina	10,00 a 12,00
Cascalho grosso com areia grossa	12,00 a 15,00
Cascalho grosso com pouca areia	15,00 a 20,00
Cascalho grosso com pouca areia compacta	20,00 a 25,00

Fonte: [20]

As aproximações constantes na Tabela 1 consideram fatores como tensão admissível das camadas presentes no bulbo de tensões, índice SPT (*Standard Penetration Test*), características distintas entre solos granulares ou argilosos, dimensões da superfície e contato e características do carregamento aplicado [3] [20].

Ainda, a determinação do CRV pode ser realizada através da correlação empírica direta com a tensão admissível ( $s$ ) obtida através do ensaio SPT (*Standard Penetration Test*). Inicialmente, “ $s$ ” é obtida através da Equação ...(4):

$$s = 0,20 \cdot SPT_{\text{médio}} \quad \dots(4)$$

Em seguida é apresentada na Tabela 2:

Tabela 2: Correlação da tensão admissível e o kv (kgf/cm<sup>2</sup>)

Tensao admissível (s)	Kv	Tensao admissível (s)	Kv
0,25	0,65	2,25	4,50
0,50	1,30	2,50	5,00
0,75	1,75	2,75	5,50
1,00	2,20	3,00	6,00
1,25	2,65	3,25	6,50
1,50	3,10	3,50	7,00
1,75	3,55	3,75	7,50
2,00	4,00	4,00	8,00

Fonte: Adaptação de SAFE, MORRISON (1993) *apud* [21]

A Tabela 2 é o referencial para a correlação entre a tensão admissível obtida pela Equação ... (4) e a constante vertical de reação (kv).

Acrescenta-se, ainda, uma terceira preposição para determinação de kv conforme a Equação ... (5):

$$k_v = \frac{E_0}{f \cdot \sqrt{F}} \quad \dots(5)$$

Através da Equação ... (5) pode ser determinado kv (tf/m<sup>3</sup>). Os parâmetros  $E_0, f, F$  são o módulo edométrico do solo (tf/m<sup>2</sup>), a superfície da fundação (m<sup>2</sup>) e o coeficiente adimensional, que depende da superfície da fundação, adotado 0,4. Os valores de  $E_0$  podem ser obtidos na Tabela 3:

Tabela 3: Valores do módulo edométrico  $E_0$

Solo	$E_0$		
Turfa	10	a	50
Argila molhada	150	a	400
Argila plástica	400	a	800
Argila endurecida - plástica	800	a	1500
Argila solta	1000	a	2000
Areia compacta	5000	a	8000

Fonte: Adaptação [3]

Apesar do ensaio de placa ser o melhor método para obtenção do kv, os valores padronizados e correlações empíricas são amplamente utilizados quando o referido ensaio não é viável. As aproximações obtidas são satisfatórias, no entanto, na simulação finita de elementos de fundação, a utilização de diferentes CRV's pode levar a obtenção de resultados significativamente distintos nas simulações realizadas [22].

b) Ensaio de placa: consiste na aplicação de um carregamento sobre uma placa de dimensões conhecidas, a exemplo da Figura 8:

Figura 8: Ilustração do ensaio de placa em campo

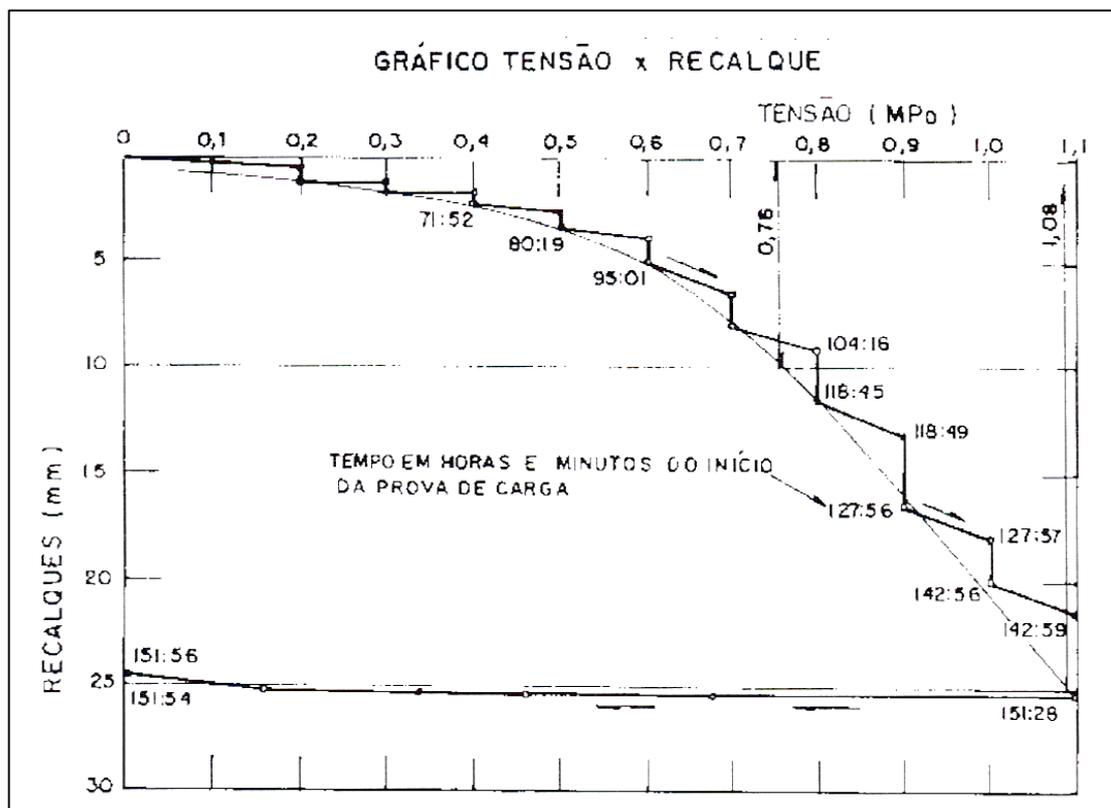


Fonte: [23]

Os deslocamentos do local de aplicação da carga, centro da placa, e as adjacências podem ser mensurados com extensômetros elétricos de deslocamento (LVDT), conforme a Figura 8.

Ainda, a forma do elemento de fundação pode exigir equações para a correção do CRV, como pode ser verificado nas formulações de TERZAGHI (1955) *apud* [3]. Um exemplo dos resultados obtidos no ensaio é representado pela Figura 9:

Figura 9: Gráfico tensão x recalque

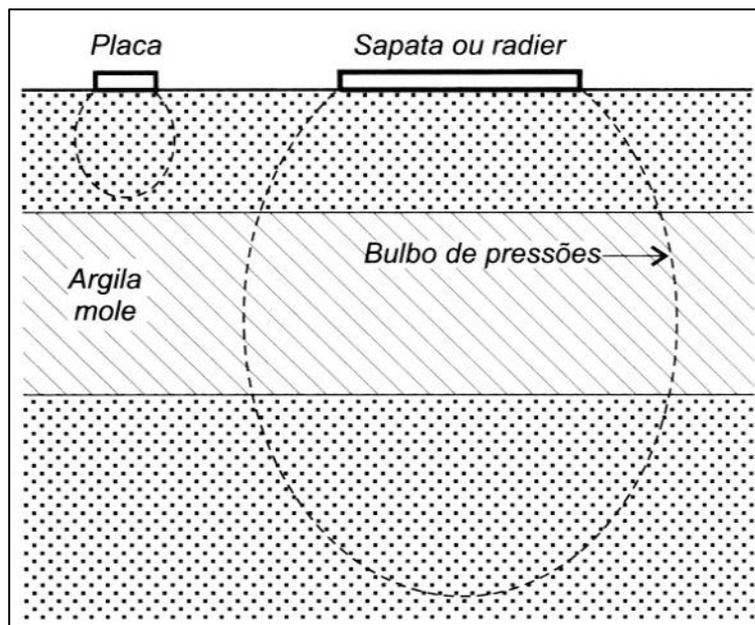


Fonte: [24]

As tensões aplicadas e os recalques obtidos estão apresentados na Figura 9. Através das dimensões conhecidas da placa, as tensões podem ser obtidas juntamente com seu deslocamento no interior do maciço de solo. O ensaio de placa apresenta-se como a melhor forma de obtenção do CRV.

Alguns cuidados devem ser tomados na execução dos ensaios de placa como a heterogeneidade do horizonte que receberá o elemento de fundação (Figura 10).

Figura 10: Bulbo de tensões dos ensaios de placa e fundações superficiais



Fonte: [8]

A Figura 10 ilustra a propagação das tensões oriundas do ensaio de placa e a simulação de um elemento de fundação superficial. A dissipação das tensões em solos estratificados deve ser objeto alvo de especial atenção na interpretação dos resultados oriundos do ensaio de placa, ou seja, amostras muito estratificadas podem dificultar e ou diferir entre camadas os parâmetros obtidos pela propagação do bulbo de tensões. Esse fenômeno pode interferir significativamente nas estimativas dos recalques e coeficientes verticais de reação.

Salienta-se a confiabilidade no ensaio de placa cujos resultados aproximam-se consideravelmente da realidade encontrada em campo [21].

Deve ser considerada ainda a distinção entre as dimensões da placa e do elemento de fundação [9]. A correção no coeficiente de reação vertical pode ser realizada através do método ACI (1998) *apud* [3] apresentado na Equação ...(6):

$$(K_S^v)_{Fundação} = (K_S^v)_{Placa} \left(\frac{b}{B}\right)^n \quad \dots(6)$$

Onde  $n$  é um coeficiente variável entre 0,5 e 0,7,  $B$  é a menor dimensão da fundação e  $b$  é a menor dimensão da placa.

c) Recalque vertical estimado: considera a teoria da elasticidade e relaciona os coeficientes de Poisson e os módulos de elasticidade individuais das camadas presentes no bulbo de tensões.

O deslocamento (d) de uma placa retangular com carga uniformemente constante pode ser obtido através da Equação ...(7):

$$d = \frac{p \cdot b}{E} \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left( A - \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \cdot B \right) \quad \dots(7)$$

Onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson obtido na Tabela 4, A calculado pela Equação ...(8),  $p$  é a carregamento uniformemente distribuído e  $b$  é a menor largura do elemento de fundação.

$$A = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \ln \left( \frac{\sqrt{1 + m^2 + n^2} + m^2}{\sqrt{1 + m^2 + n^2} - m^2} \right) \right] + m \cdot \ln \left( \frac{\sqrt{1 + m^2 + n^2} + 1}{\sqrt{1 + m^2 + n^2} - 1} \right) \quad \dots(8)$$

Ainda, as variáveis  $B$ ,  $m$ ,  $n$  e  $E$  são obtidas através das Equações ...(9), ...(10), ...(11) e ...(12), respectivamente:

$$B = \frac{n}{2\pi} \cdot \left( \arctg \frac{m}{n \cdot \sqrt{1 + m^2 + n^2}} \right) \quad \dots(9)$$

$$m = \frac{L}{b} \quad \dots(10)$$

$$n = \frac{z}{b} \quad \dots(11)$$

$$E = \alpha \cdot K \cdot SPT \quad \dots(12)$$

Os coeficientes de Poisson indicados estão descritos na Tabela 4:

Tabela 4: Valores sugeridos para coeficientes de Poisson do solo

Descrição do tipo de solo	$\nu$
Argila conforme SPT	*
Areia conforme SPT	*
Areia fofa (SPT≤4)	0,30
Areia pouco compacta (SPT 5 a 8)	0,29
Areia mediamente compacta (SPT 9 a 18)	0,28
Areia compacta (SPT 19 a 40)	0,27
Areia muito compacta (SPT>40)	0,26
Argila muito mole (SPT≤2)	0,24
Argila mole (SPT 2 a 5)	0,23
Argila média (SPT 6 a 10)	0,22
Argila rija (SPT 11 a 19)	0,21
Argila dura (SPT>19)	0,21

Fonte: [3]

O método acima descrito relaciona a resistência de ponta (K), o número SPT e o coeficiente  $\alpha$ . adotado: 3 para areias, 5 para siltes e 7 para argilas; para obtenção do módulo de elasticidade (E) através da Equação ... (12).

Para tanto, através da Equação ... (3) é possível obter-se o  $k_v$  através dos deslocamentos e carregamentos obtidos no método acima descrito.

d) Método de Boussinesq: o CRV estimado por essa metodologia considera uma placa circular rígida submetida a uma pressão constante, sendo obtido através da Equação ... (13):

$$k_v = \frac{2 \cdot E_0}{R \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2)} \quad \dots(13)$$

A formulação considera o módulo edométrico do solo (Tabela 5), o raio da placa de fundação (R) e o coeficiente de Poisson da amostra ( $\nu$ ) [20].

Tabela 5: Valores do módulo edométrico

Descrição do tipo de solo	$E_0$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
Turfa	1 a 5
Argila molhada	15 a 40
Argila plástica	40 a 80
Argila endurecida – plástica	80 a 150
Areia solta	100 a 200
Areia compacta	500 a 800

Fonte: [3]

Apesar da vasta utilização do ensaio de placa, sua precisão e facilidade na obtenção dos resultados, os demais métodos apresentam-se como alternativas para situações nas quais ensaios *in situ* sejam inviáveis.

Atualmente, existem metodologias com aproximações relevantes para a determinação dos recalques e coeficientes de reação vertical [3], no entanto, o ensaio de placa é aquele mais empregado para obtenção destes parâmetros.

### 2.2.3 Coeficiente de reação horizontal (CRH)

O coeficiente de reação horizontal (CRH) é um parâmetro de difícil equacionamento por tratar-se de um problema típico de contato [3].

TENG (1962) *apud* [21] propõe formas distintas para obtenção do CRH para solos arenosos e argilosos conforme as Equações ...(14) e ...(15).

$$k_h = k_1 \frac{z}{B} \quad \dots(14)$$

$$k_h = 0,2 \cdot \frac{k_1}{B} \quad \dots(15)$$

Tabela 6: Valores de  $k_1$  para solos arenosos (kgf/cm<sup>3</sup>)

	Areia fofa	Areia média	Areia compacta
Seca ou saturada	0,2	0,7	1,8
Submersa	0,1	0,4	1,1

Fonte: TENG (1962) *apud* [21]

Tabla 7: Valores de  $k_1$  para solos argilosos (kgf/cm<sup>3</sup>)

	Argila mole	Argila média	Argila rija	Argila dura
Seca ou saturada	0,0 a 1,5	2,0	5,0	10,0

Fonte: TENG (1962) *apud* [21]

As Equações ...(14) e ...(15) ilustram o modelo de cálculo para solos arenosos e argilosos, nas Tabela 6 e Tabela 7 onde são apresentados os coeficientes  $k_1$ , respectivamente.

#### 2.2.4 Estimativa dos recalques verticais

A magnitude do carregamento em uma amostra de solo é responsável pelo seu rearranjo e conseqüentemente recalque do elemento de fundação que repousa sobre esse maciço, ou seja, recalque pode ser definido como a diferença entre o deslocamento da parcela de solo solicitada e a parcela adjacente indeslocável isenta de esforços da estrutura. As teorias aceitas hoje pela comunidade científica desconsideram os deslocamentos oriundos pela quebra de grãos e idealizam o solo como uma camada homogênea, ou seja, todos os esforços são transmitidos entre as partículas adjacentes de forma equivalente, permitindo a definição de parâmetros, como o coeficiente de reação vertical. Entre os fatores responsáveis pelos recalques estão a eliminação de ar ou água presentes na estrutura indeformada do solo, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson das camadas constituintes do horizonte solicitado [3].

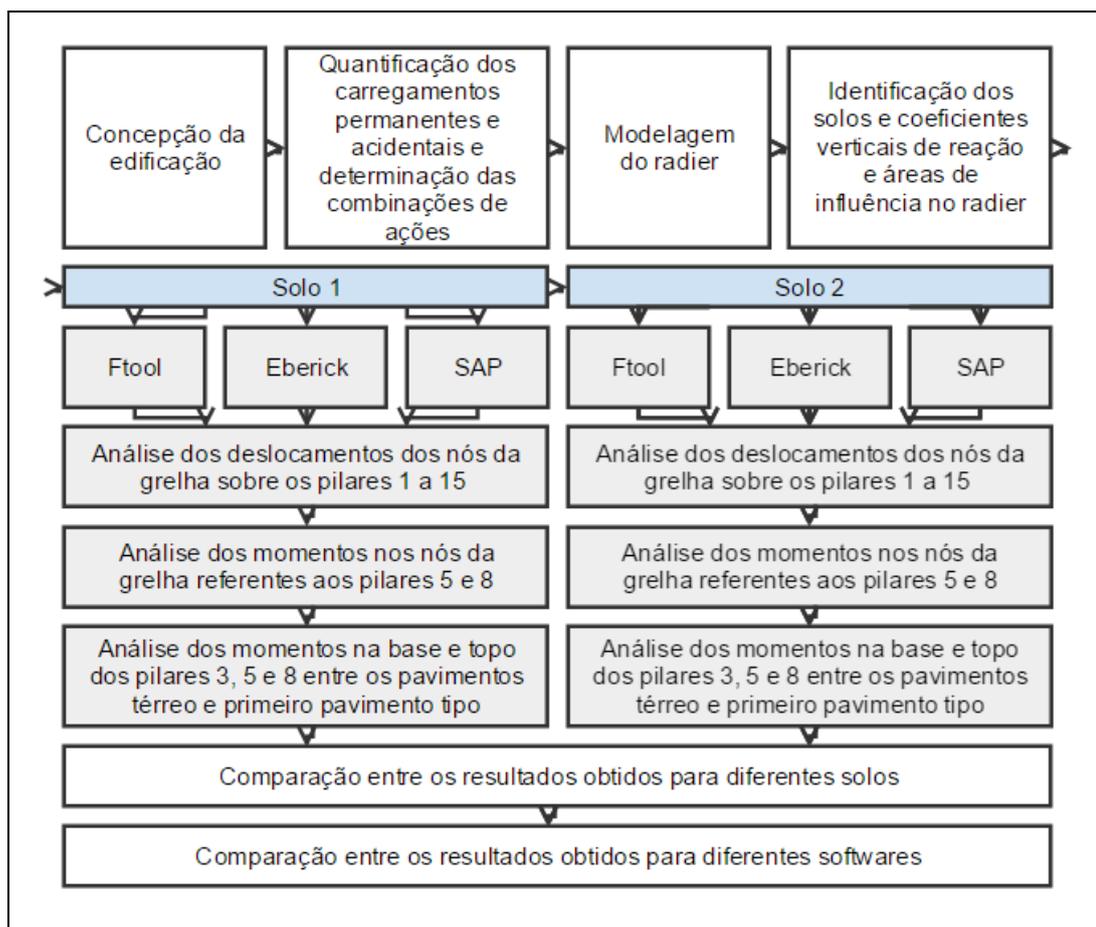
A determinação dos recalques está diretamente associada à disposição das solicitações da superestrutura. Os deslocamentos dos elementos de fundação podem elevar as tensões estruturais a níveis críticos não considerados em projetos, visto que o número de pavimentos está diretamente associado à rigidez estrutural. Dessa forma, durante o processo construtivo, o aumento da rigidez, obtido com a construção dos pavimentos, produz uma uniformização no arranjo dos recalques [3].

Embora muitos métodos sejam utilizados para estimar os recalques iniciais, as variáveis intrínsecas à solicitação e à composição do solo podem interferir significativamente nos valores encontrados. Acrescenta-se que os recalques podem ocorrer de duas formas: recalques construtivos, obtido pela soma dos recalques imediatos e dos recalques por recompressão primária; e os recalques de longo prazo, são aqueles cujo acontecimento ocorre pela acomodação e ou rearranjo da estrutura do maciço de solo solicitado oriundos da soma do adensamento primário virgem e da compressão secundária [31].

### 3 METODOLOGIA

A sequência das atividades realizadas neste trabalho podem ser resumidas no fluxograma da Figura 11.

Figura 11: Fluxograma de atividades



Fonte: Elaboração própria

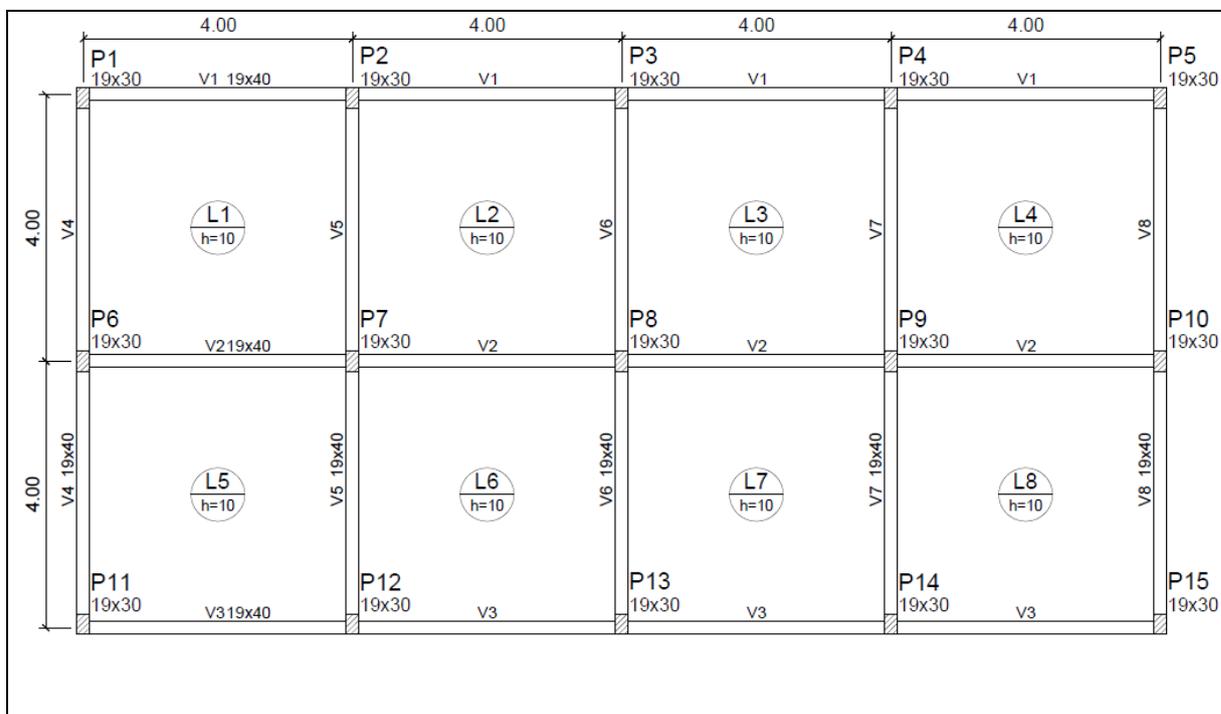
As etapas referentes à concepção da edificação, quantificação e combinação dos carregamentos, modelagem do *radier* e identificação dos solos e seus coeficientes de reação vertical, apresentadas na Figura 11, ocorrem sequencialmente até o ponto onde foram definidos os solos 1 e 2 para análise. A partir disto, algumas etapas se sobrepõem. A conclusão das verificações é dada pelas comparações entre os resultados obtidos para os dois solos e para os três softwares.

### 3.1 Concepção da edificação

A edificação apresentada na Figura 12 foi usada para o desenvolvimento deste estudo. Trata-se de um edifício hipotético, com estrutura em concreto armado convencional composto por 1 pavimento térreo, 3 pavimentos tipo e 1 pavimento de cobertura.

As dimensões de todos os pilares são de 19x30cm e de todas as vigas 19x40cm. A espessura das lajes é de 10cm, exceto o *radier*, com 35cm, conforme Figura 12. O pé direito adotado é de 3 metros e a altura total da edificação foi definida proporcionalmente ao pré-dimensionamento estrutural.

Figura 12: Planta do pavimento tipo (Escala 1:50)



Fonte: Elaboração própria

O pré-dimensionamento foi realizado de maneira que, para os carregamentos aplicados, todos os elementos tivessem armaduras executáveis na realidade do canteiro de obras, além de garantir que o coeficiente  $Gama_Z$  não superasse 1,3 para nenhuma das direções  $x$  e  $y$ .

### 3.2 Quantificação dos carregamentos permanentes e acidentais e determinação das combinações de ações

Os carregamentos considerados são de natureza permanente e acidental. Os carregamentos permanentes são resultado da consideração do peso-próprio de todos os elementos que compõem a estrutura, paredes e revestimentos. Os carregamentos acidentais são os provados pela utilização da estrutura. No presente estudo considerou-se a carga de ocupação e o vento como carregamentos acidentais.

O concreto utilizado tem resistência característica de cálculo ( $f_{ck}$ ) de 25 MPa, módulo de elasticidade inicial ( $E_{ci}$ ) de 28000 MPa e as armaduras serão constituídas de aço CA 50 (500MPa) e módulo de elasticidade ( $E$ ) igual a 210000 MPa.

Quanto à não linearidade física, respeita-se a consideração de aproximação da NBR 6118/2014 (item 15.7.3) atribuindo os fatores redutores de rigidez 0,4; 0,5 e 0,8, respectivamente, para vigas, lajes e pilares.

Não foi realizada análise de segunda ordem global nesse estudo.

#### 3.2.1 Combinações de ações

No estado limite último, combinação normal, estão as quantificações de carregamentos, ponderados conforme os coeficiente prescritos na NBR 6120/1980 corrigida em 2000.

Para fins de análise e comparação, todos os carregamentos foram combinados usando as combinações normais apresentadas na NBR 6118/2014. Como utiliza-se dois tipos de carregamentos acidentais, sendo que o vento atua em duas direções, foram testadas 5 combinações de ações:

A – Cargas permanentes e acidentais principais sem a ação do vento:  $(1,4G + 1,4Q)$ ;

B – Cargas permanentes e acidentais principais com vento a 0 grau secundário:  $1,4G + 1,4(Q + 0,6V_x)$ ;

C – Cargas permanentes e acidentais principais com vento a 90 graus secundário:  $1,4G + 1,4(Q + 0,6V_y)$ ;

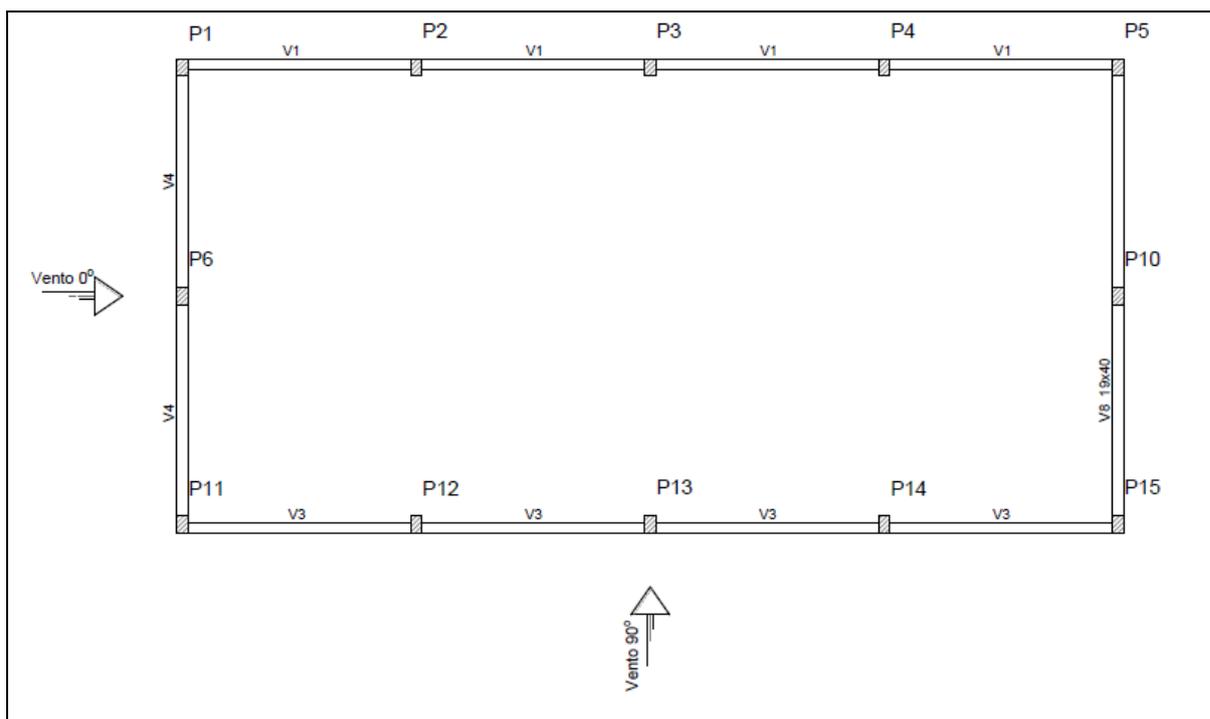
D – Cargas permanentes e de vento a 0 grau principais com cargas acidentais secundárias:  $1,4G + 1,4(V_x + 0,5Q)$ ;

E – Cargas permanentes e de vento a 90 graus principais com cargas acidentais secundárias:  $1,4G + 1,4(V_y + 0,5Q)$ ;

Nas equações acima apresentadas,  $G$  são os carregamentos de origem permanente,  $Q$  os carregamentos de origem accidental e  $V_x$  e  $V_y$  o vento atuando, respectivamente, a 0 e 90 graus.

As considerações de vento estão ilustradas na Figura 13:

Figura 13: Fachadas de incidência do vento



Fonte: Elaboração própria

Nas considerações de vento, da Figura 13, o eixo de vento a 0 grau coincide com a menor dimensão da edificação vista em planta, composta pela prumadas dos pilares 1, 6 e 11. Conseqüentemente, o vento a 90 graus atua junto à maior dimensão da edificação vista em planta, pilares 11, 12, 13, 14 e 15.

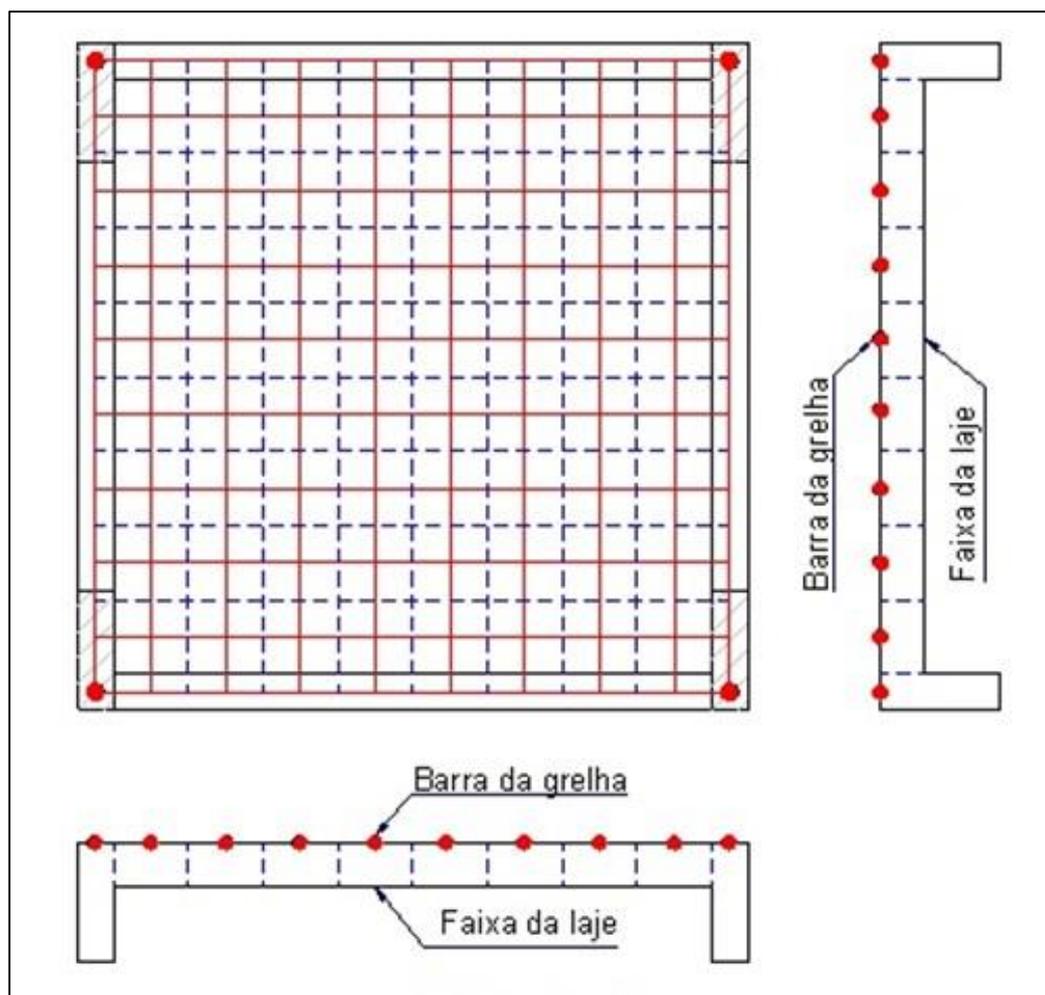
Os esforços e deslocamentos obtidos nas análises foram para as combinações últimas normais. As análises ficaram restritas ao estado limite último.

### 3.3 Modelagem do *radier*

O *radier* de fundação tem as dimensões de 16m x 8m x 0,35m e recebe o carregamento de todos os pilares. A espessura do elemento foi adotada de maneira a resultar em armaduras exequíveis para os esforços máximos observados. No entanto, o dimensionamento e detalhamento das armaduras não será abordado neste trabalho.

A simulação numérica do *radier* tem sua malha discretizada em uma grelha, Figura 14, composta por barras horizontais e verticais equidistantes a cada 0,25m. Nessas barras atuam os carregamentos permanentes do *radier* e os carregamentos aplicados pelos pilares.

Figura 14: Reticulado do *radier*

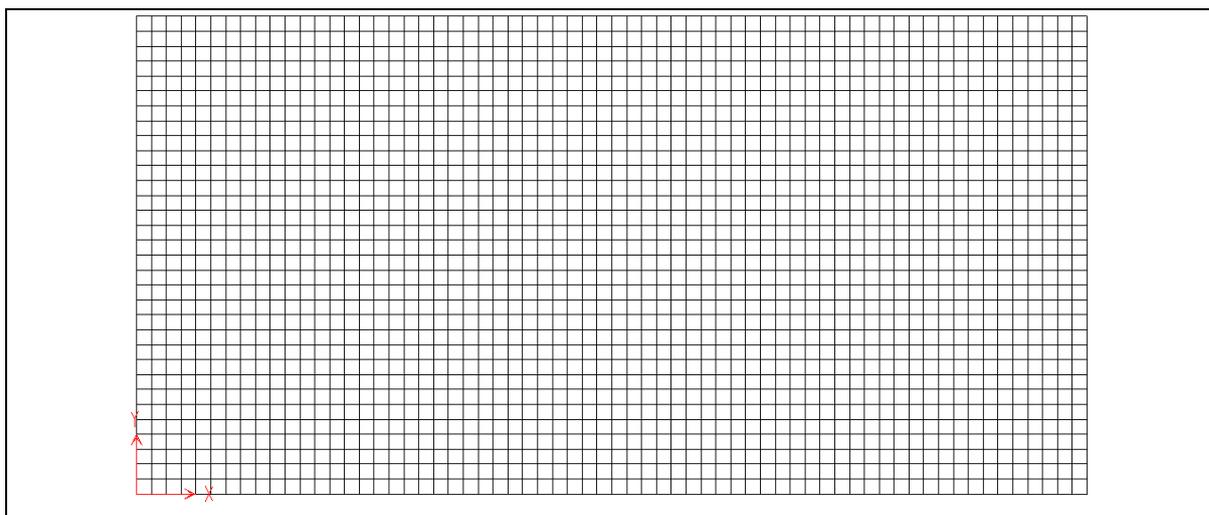


Fonte: Tutoriais Eberick®

A matriz reticulada da Figura 14 idealiza a disposição de faixas paralelas cujos nós representam suas propriedades físicas e geométricas compondo uma grelha.

A inserção da malha no software SAP, nas dimensões de 8 x 16m, está apresentada na Figura 15:

Figura 15: Apresentação da grelha no software SAP



Fonte: Elaboração própria através do software SAP®

### 3.3.1 Modelos estruturais testados

Foram testados dois softwares comerciais e um acadêmico. O Eberick V9 e o SAP 2000 V12, são programas disponíveis no mercado e usados na prática de projetos de estruturas. Já o Ftool é um programa com cunho acadêmico que propicia a análise de estruturas bidimensionais.

O primeiro é voltado à análise de estruturas de concreto armado e baseia-se no princípio da análise matricial de estruturas para a solução da estrutura. As lajes são discretizadas em barras formando uma grelha que é resolvida separadamente do restante da estrutura. Os elementos de grelha tem três graus de liberdade, duas rotações e uma translação em cada extremidade da barra. Com os esforços obtidos na grelha, o restante da estrutura é analisado como pórtico espacial. Pilares, vigas e *radier* de fundação são modelados como um todo, usando barras com seis graus de liberdade em cada nó. Essa proposta visa otimizar a solução da estrutura, demandando menor tempo de processamento.

O SAP 2000 V12, por sua vez, é um programa voltado a análise estrutural via método dos elementos finitos. O software permite modelar os mais diversos tipos de estruturas, com diferentes materiais, carregamentos e condicionantes. Não é um programa voltado para algum tipo de material específico, como o Eberick é para o concreto. No caso do modelo testado, todas as barras foram modeladas como elemento de barra, com seis graus de liberdade por nó. No caso deste elemento, há a sobreposição do método dos elementos finitos com a análise matricial, pois não há integração interna no elemento.

Por fim, o terceiro software testado foi o Ftool. Programa acadêmico para análise de estruturas planas, sua utilização foi proposta em diferentes componentes curriculares do curso de engenharia civil da Unipampa. A proposta foi de simular via pórticos associados o mesmo tipo de análise realizada nos outros dois softwares. Talvez assim, propondo uma metodologia de análise de interação solo-estruturas de entendimento mais simples e que possa ser apresentada em sala de aula.

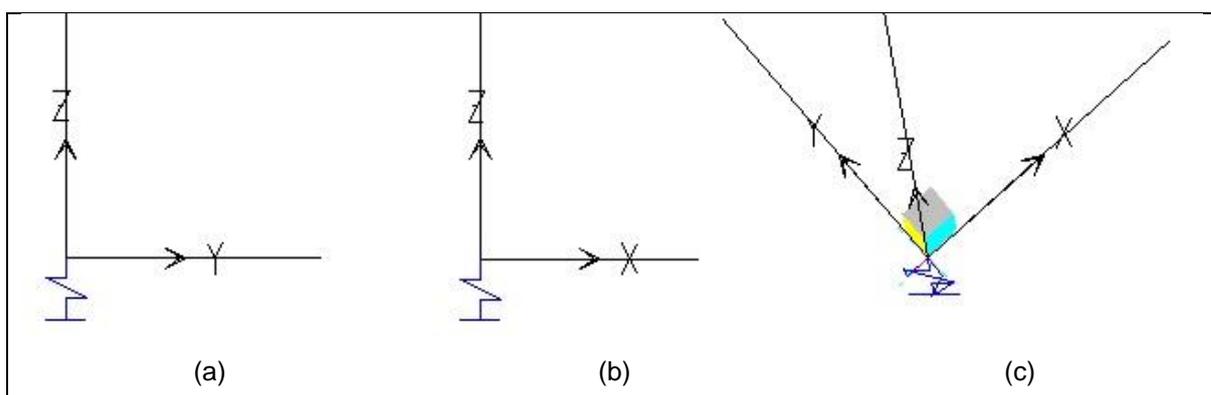
### 3.4 Identificação dos solos e coeficientes verticais de reação e áreas de influência no *radier*

Analisou-se o comportamento estrutural do modelo sobre dois diferentes tipos de solo. Foram adotados dois solos com coeficientes de reação vertical dispostos na Tabela 1.

Os solos utilizados são areias: uma mediamente compacta (solo 1) e fofa (solo 2) com coeficientes de reação vertical 42000 e 13000 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Ou seja, buscou-se analisar o comportamento da estrutura utilizando o método de Winkler, sobre dois solos que representam rigidezes de mola bastante distintas. O método de correção dos coeficientes verticais de reação é prescrito pela ACI (1998) [3]. Dessa forma, os coeficientes obtidos para as amostras de solo 1 e 2 são, respectivamente, 5.830,26 e 1.804,60 kN/m<sup>3</sup>. A Figura 16 ilustra a inserção das molas:

Figura 16: Molas atuando em um ponto qualquer da grelha



Fonte: Elaboração própria através do software SAP®

A identificação das molas que simulam a elasticidade do solo de Winkler está representada na Figura 16 os planos (a) z-y, (b) z-x e em (c) 3d.

### 3.4.1 Área de influência das molas

A malha usada nos modelos do Eberick e Sap foi de barras a cada 25cm, ou seja, cada nó interior da grelha estava sujeito a uma área de influência de 0,0625 m<sup>2</sup>. Os nós das bordas tinham uma área de influência igual a metade desta primeira, 0,03125 m<sup>2</sup> e os cantos 0,01562 m<sup>2</sup>.

A aplicação do módulo de reação do solo sobre a estrutura se dá pela multiplicação do módulo pela área de influência de cada nó. Assim, em cada nó é aplicada uma mola com rigidez que função da área de influência e do módulo de reação do solo.

No programa Eberick não é possível variar o tipo de solo sob o *radier*. O módulo de reação é único para toda a estrutura. O usuário fornece o valor do módulo de reação e o programa aplica nos nós da grelha do *radier* a mola correspondente.

No SAP 2000 é o usuário que aplica diretamente o valor da mola em cada nó, apesar de mais trabalhoso, seria possível variar as propriedades do solo sob a edificação, se fosse o caso.

Por fim, no Ftool usou-se uma área de influência nos nós da fundação igual a meia distância entre pilares na direção transversal ao pórtico analisado e igual a um metro na outra direção. O uso de distâncias menores que um metro dificultava em demasia a visualização dos resultados.

## 3.5 Comparação dos resultados obtidos com coeficientes de reação distintos

### 3.5.1 Simulação no Ftool

Definidas a geometria dos elementos estruturais, são inseridos pórticos planos agrupados e associados no Ftool.

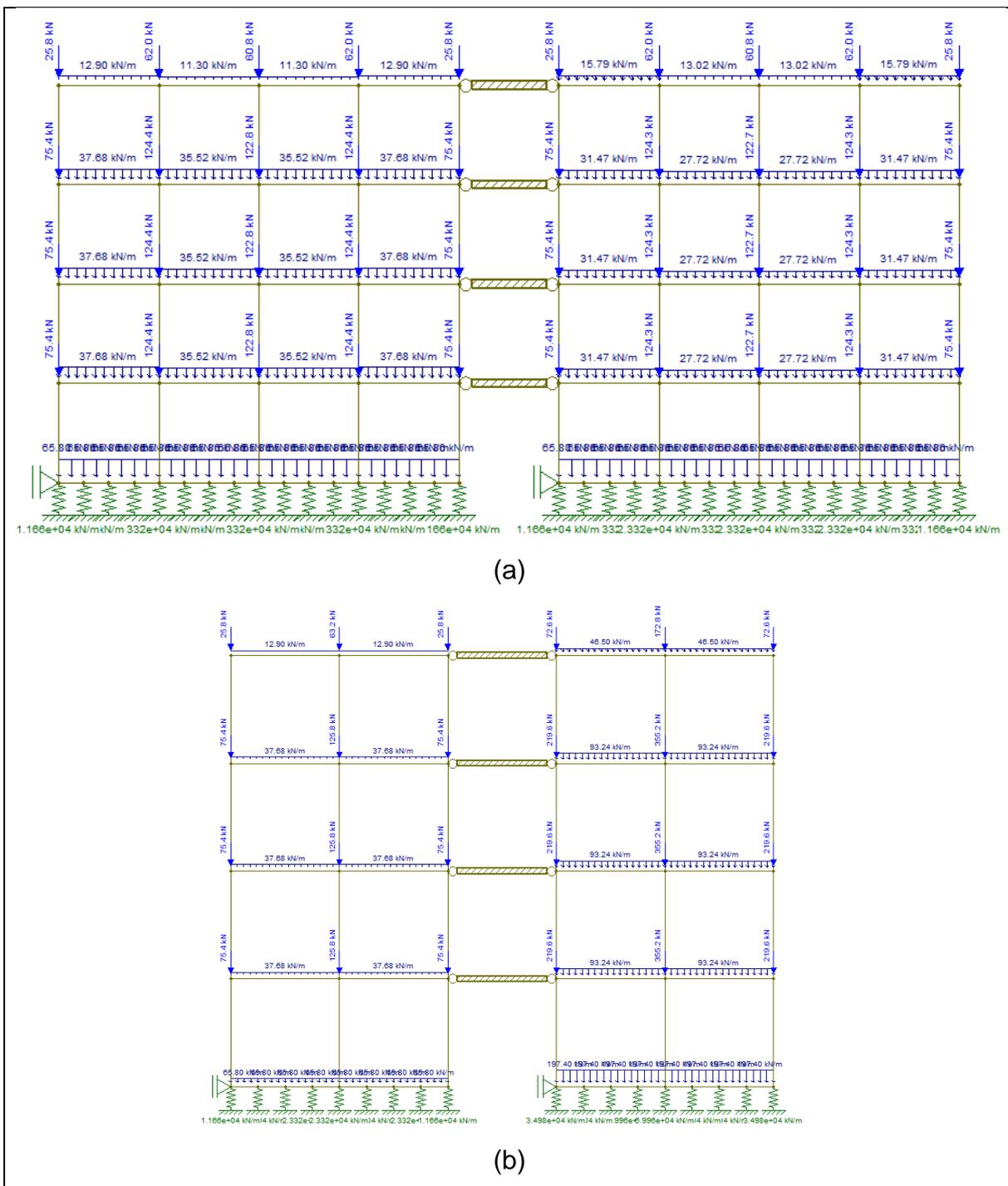
O método dos pórticos associados é uma pratica comum para a análise global de estruturas reticuladas. A inovação proposta aqui está na mistura desse método com o de pórticos equivalentes usado para o cálculo de *radiers* de fundação, levando em consideração a interação solo-estrutura.

Na Figura 17(a) estão dispostas as considerações dos pórticos planos para as combinações A, B e D, bem como na Figura 18 está a disposição dos pórticos. Considerando a simetria da edificação, os pórticos externos (pórtico vento0 1 e pórtico vento0 3) estão representados agrupados à esquerda do conjunto, prosseguidos pelo

pórtico central (pórtico vento0 2). Ao agrupar dois pórticos a dimensão dos elementos transversal ao plano é somada.

A Figura 17(b) apresenta a associação dos pórticos para as combinações C e D. Igualmente, o agrupamento dos pórticos externos (pórtico vento90 1 e pórtico vento90 5) e internos (pórtico vento90 2, pórtico vento90 3 e pórtico vento90 4) realizou-se pela igualdade ou equivalência dos carregamentos atuantes. A Figura 17 auxilia a ilustração dos pórticos constituintes da edificação:

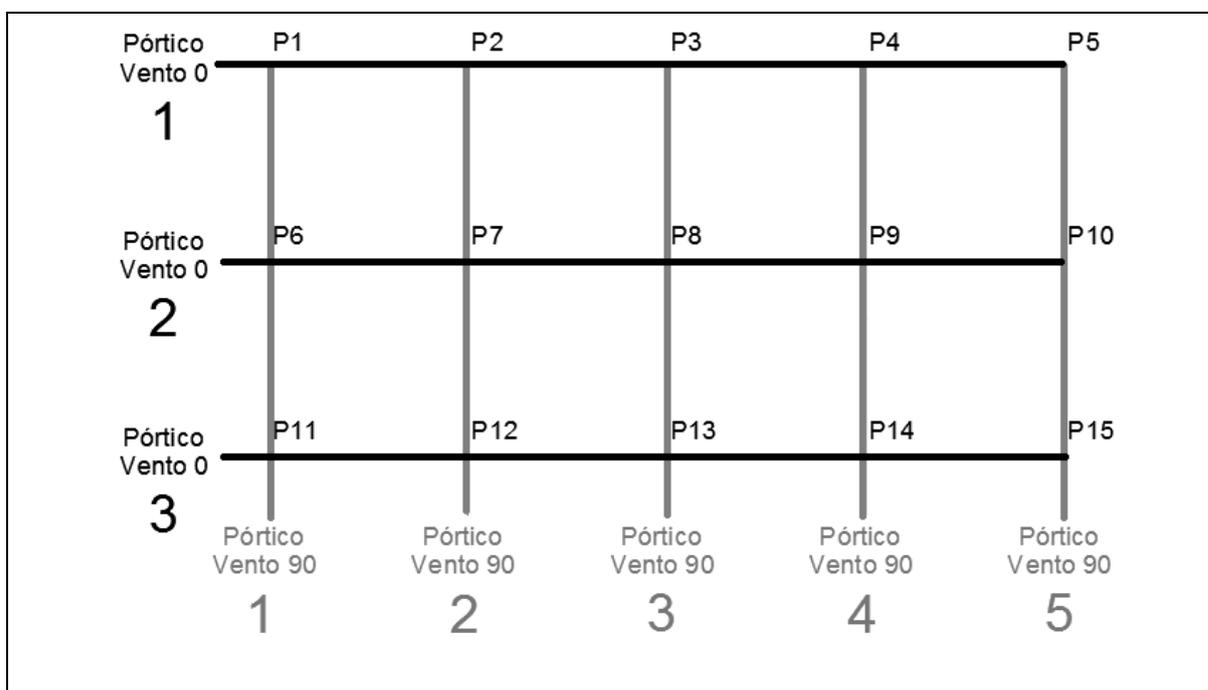
Figura 17: Disposição dos pórticos no Ftool



Fonte: Elaboração própria através do software Ftool

A Figura 18 apresenta os pórticos em função, afim de ilustração, da angulação considerada para os ventos (vento 0 e vento 90).

Figura 18: Disposição dos pórticos, em função da consideração do ângulo de incidência dos ventos



Fonte: Elaboração própria

### 3.5.2 Simulação no Eberick

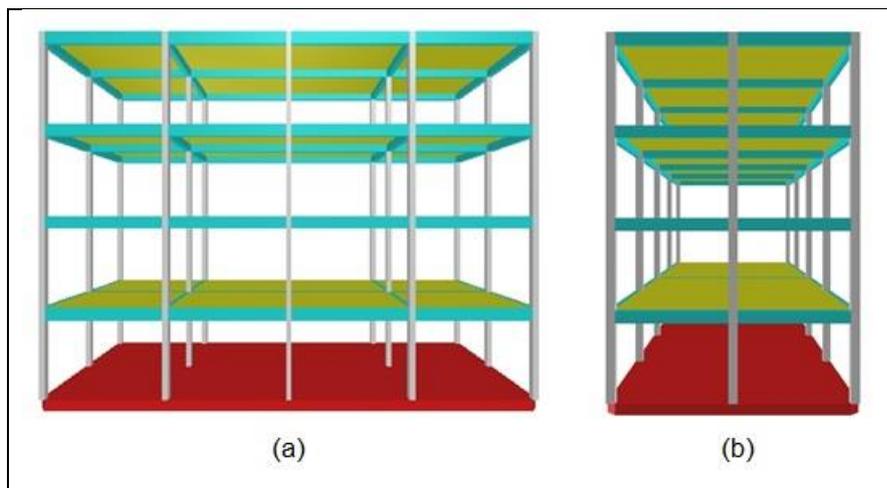
A simulação neste software partiu da inserção da concepção construtiva em formato DXF criado no AutoCAD 2016, incluindo os níveis da edificação: térreo, tipo e cobertura.

Em seguida, definidas as dimensões dos pilares, das vigas e espessura das lajes, considerando as dimensões mínimas prescritas pela NBR 6118 (2014), bem como estabelecidas as vinculações necessárias [30].

Os carregamentos das paredes foi obtido através das dimensões já determinadas (pé direito e espessura) com o peso específico citado na NBR 6120 (1980) [33].

Foram considerados os carregamentos de vento, nas as análises estruturais, para uma edificação localizada no município do município de Alegrete/RS. A inserção da estrutura no software está ilustrada na Figura 19:

Figura 19: Projeções (a) frontal e (b) lateral da edificação em estudo



Fonte: Elaboração própria através do software Eberick

A Figura 17 ilustra o modelo da estrutura já inserida no software Eberick®, apresentando os elementos estruturais: *radier* em vermelho, pilares cinzas, lajes amarelas e vigas em azul. As projeções da Figura 19(a) e Figura 19(b) representam, respectivamente, as vistas frontal e lateral da edificação.

### 3.5.3 Simulação no SAP

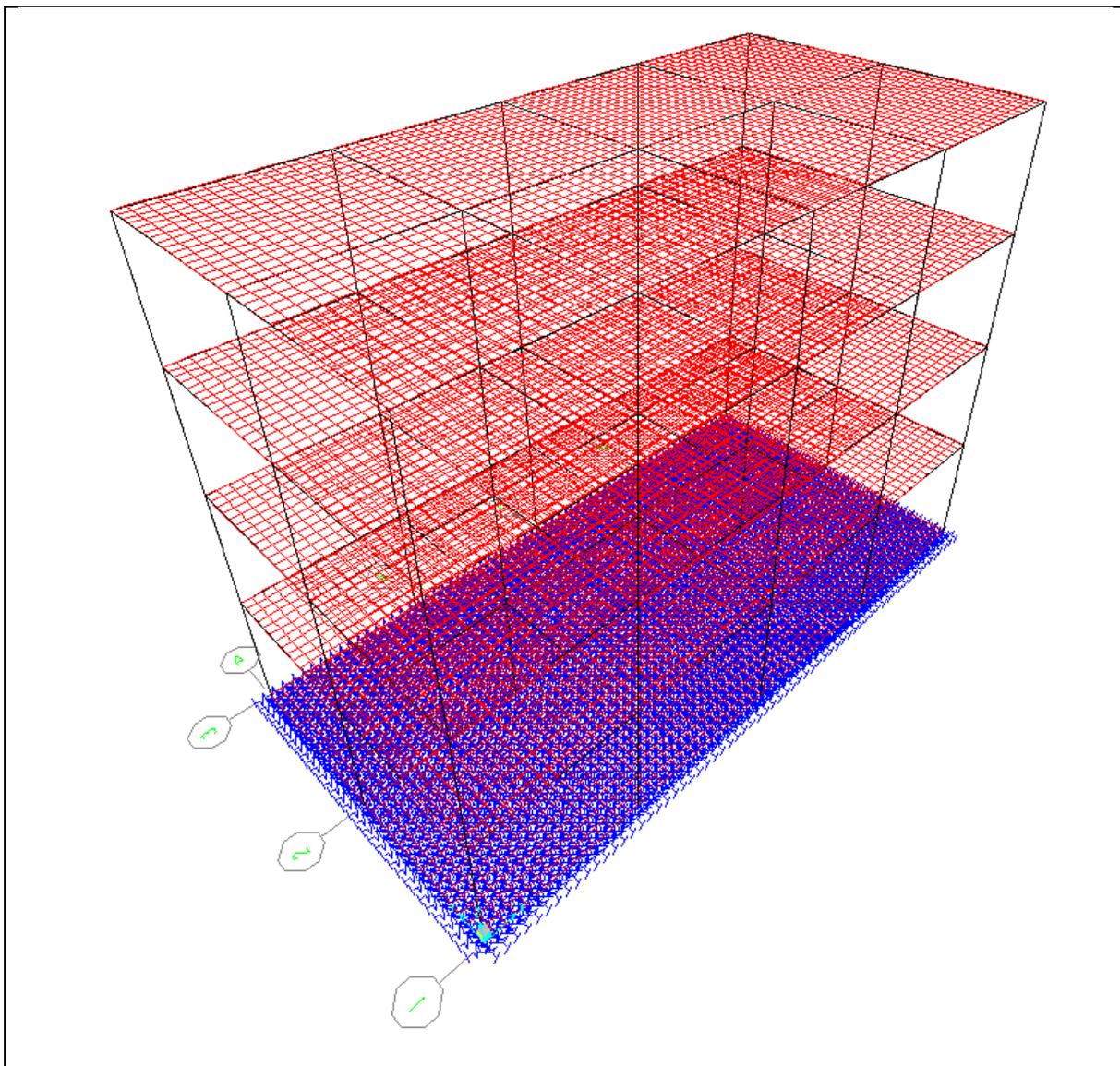
A estrutura foi modelada no SAP toda com elementos de barra (frames), assim foram definidas propriedades para 4 tipos de barras, barras de viga, de pilar e barras para as grelhas de laje e de *radier*. As reduções para consideração da não linearidade física foram aplicadas as barras criadas conforme já citado. Foi especificado as características do material concreto anteriormente citadas para serem especificados para as barras criadas. As dimensões utilizadas para as barras foram as mesmas utilizadas no software Eberick.

Os carregamentos de peso próprio da estrutura são automaticamente lançados pelo SAP, já os carregamentos acidentais foram lançados nos nós da grelha em função adas suas áreas de influência. Os carregamentos das paredes foram lançados como cargas distribuídas nas barras nas quais suportavam paredes. Os carregamentos de vento foram lançados em função das forças de arrasto calculadas e das áreas de influência. Foram geradas no SAP as mesmas combinações já descritas anteriormente.

Após gerada a estrutura e as malhas de grelha das lajes e do *radier*, foram adicionadas as molas que representam o solo a ser simulado (solo 1 e solo 2). Para

cada nó da grelha do *radier* foram adicionadas 3 molas á translação com relação aos 3 eixos principais, conforme descrito anteriormente. A Figura 20 ilustra a estrutura inserida no software:

Figura 20: Modelo no software SAP



Fonte: Elaboração própria através do software SAP

As barra que constituem o modelo estão representadas por vermelho com referências às lajes, pretas para os pilares e os elementos em azul referem-se às molas.

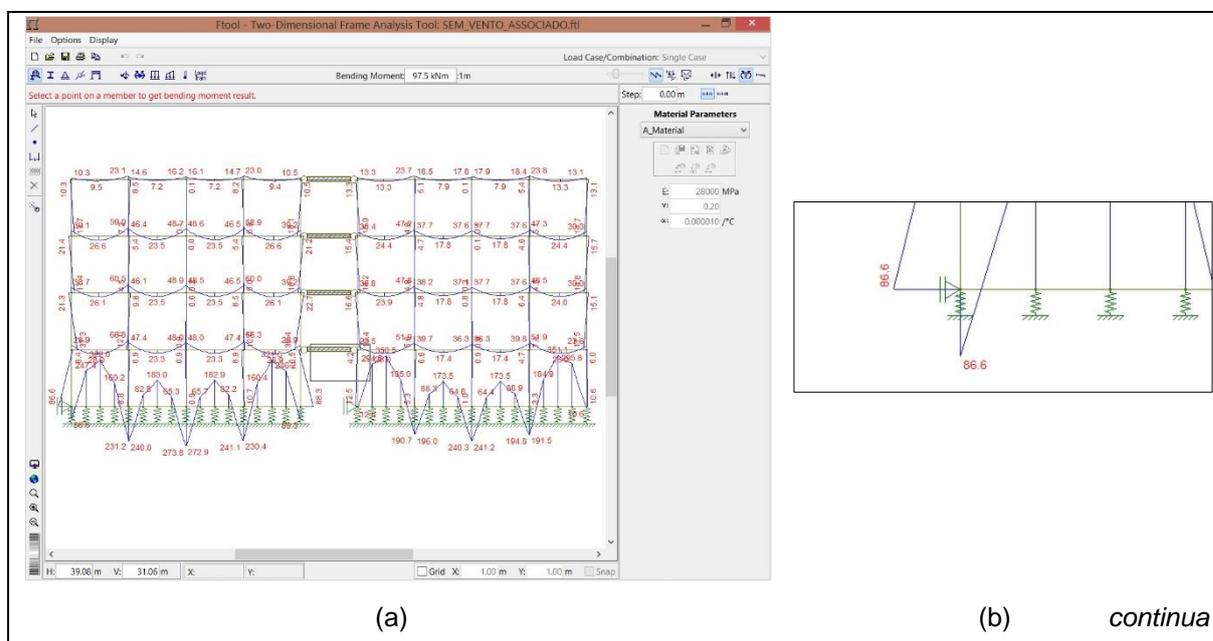
### 3.5.4 Análise dos deslocamentos

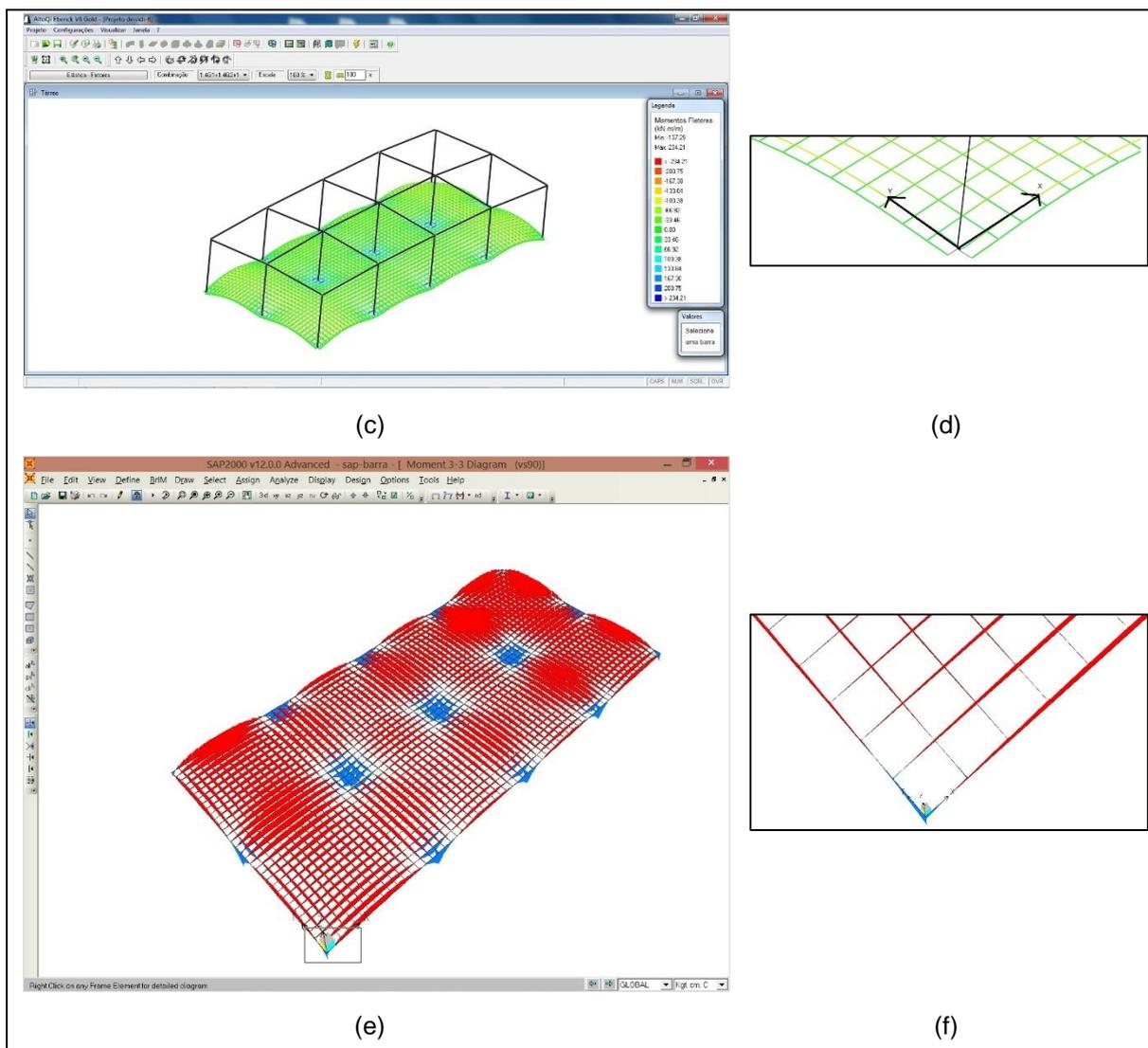
Os nós correspondentes aos pilares sofrem deslocamentos ao considerar a base na qual o *radier* está apoiado como elástica. Dessa forma, mensura-se e discute-se os deslocamentos obtidos para os diferentes softwares e solos nos nós correspondentes a esses 15 pilares atuantes no *radier*. Destaca-se que as ações foram combinadas para proporcionar os estados limites últimos nos elementos de fundação, mesmo na análise dos deslocamentos.

### 3.5.5 Análise dos momentos nos nós da grelha

Foram selecionados dois pilares: o P5 e o P8 para análise dos momentos fletores na grelha do *radier*. O P5 por ser um pilar de canto, na extremidade oposta às faces aonde foram aplicados os carregamento de vento, ou seja, no canto mais comprimido da fundação. E o P8 por ser um pilar interno e central. A grelha e as barras contribuintes para cada um dos pilares pode ser analisada na Figura 21:

Figura 21: Grelha do radier e detalhe nas barras abaixo dos pilares, respectivamente, para os softwares (a) e (b) Ftool, (c) e (d) Eberick e (e) e (f) SAP.





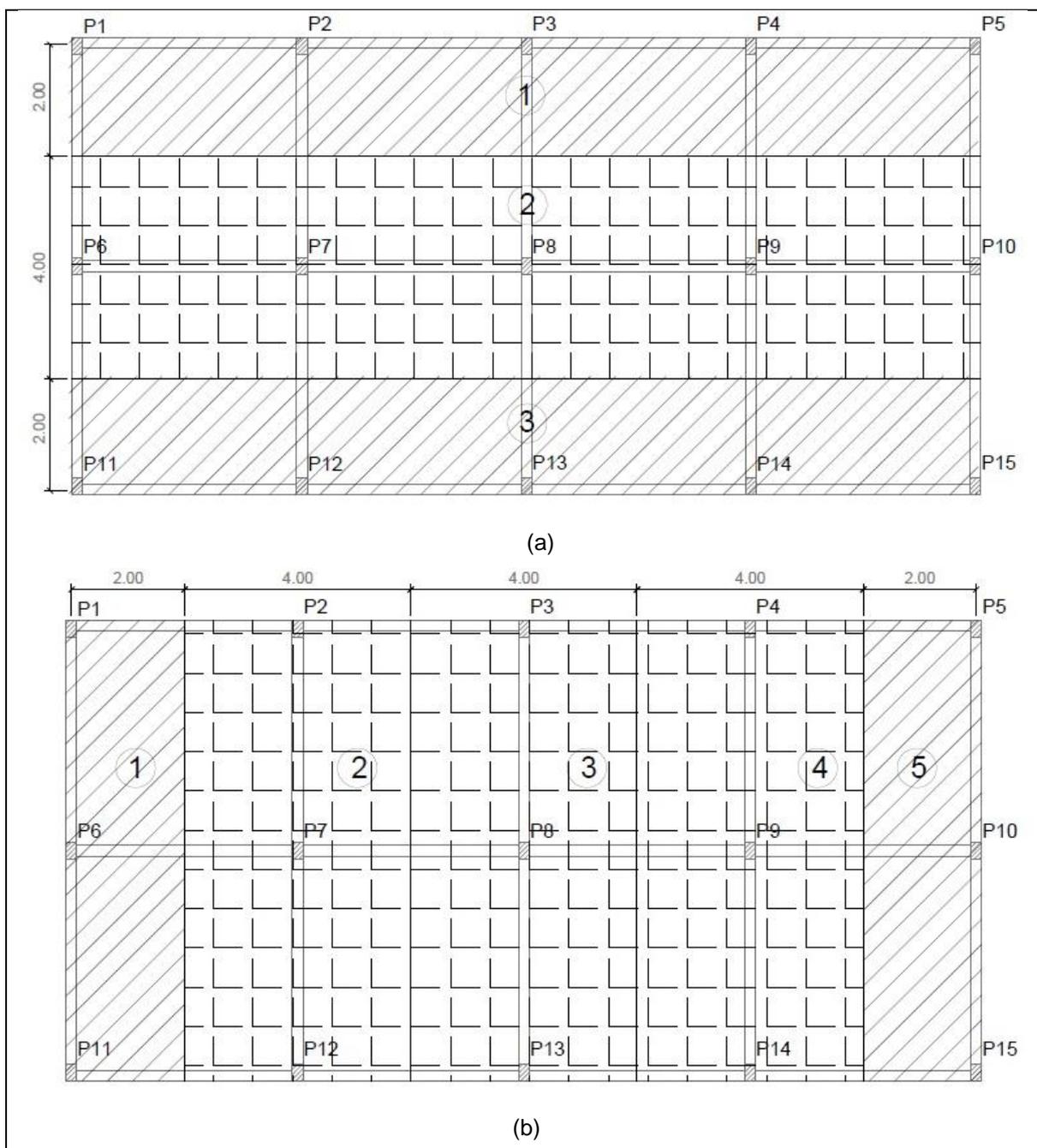
Fonte: Elaboração própria através dos softwares Ftool, Eberick e SAP

Considera-se diagramas de momento ilustrados na Figura 21 atuantes ao longo dos eixos  $x$ , condizente com a maior dimensão do *radier* e  $y$ , junto à menor dimensão do elemento de fundação.

A forma de obtenção e análise dos momentos na grelha sob o pilar não é direta pois os modelos numéricos tendem a apresentar picos nos nós aonde acontece a ligação do pilar com a grelha. Estes picos desconsideram a real dimensão do pilar e a distribuição dos esforços em mais de uma barra da grelha. Ainda, no Eberick, os esforços em cada barra são divididos pelo espaçamento da grelha. No caso do SAP o valor apresentado é direto o da barra. E no Ftool os momentos são para uma largura de faixa igual a meia distância entre pórticos. Assim, para comparar os valores é preciso uniformizar a forma de apresentação. Foi adotado o procedimento descrito na sequência. A quantificação é dada de três formas:

- Ftool: A inserção dos pórticos no ftool foi efetuada através das áreas de influências dos pilares apresentada na Figura 22:

Figura 22: Consideração dos pórticos associados e agrupados para os ventos a (a) 0 grau e (b) 90 graus.



Fonte: Elaboração própria.

As considerações dos momentos fletores nos nós referentes aos pilares considerou as áreas de influência de cada pórtico, ou seja, os esforços foram

distribuídos pela largura das faixas consideradas, bem como o agrupamento dos pórticos;

- Eberick: os momentos são expressos em kN.m/m, portanto, os momentos para os nós situados nas extremidades do *radier* são a média entre os momentos nas extremidades das quatro barras paralelas partindo do nó considerado em direção ao interior do *radier*; já, para os nós analisados no interior da grelha, quantifica-se os momentos através da média dos momentos nas extremidades das duas barras paralelas posteriores, duas barras paralelas anteriores e a barra imediatamente abaixo do pilar analisado;

- SAP: analogamente ao Eberick, as considerações referentes à disposição das extremidades das barras é mantida, porém, a quantificação dos momentos é dada pela soma dos momentos atuantes em quatro extremidades de barras consecutivas pois esse esforço no software considerado é dado em kN.m. A soma de quatro barras é justificada pelo comprimento de cada barra ser de 0,25m, totalizando 1m quatro barras e permitindo a expressão dos momentos fletores em kN.m/m.

### 3.5.6 Momentos nos pilares 3, 5 e 8

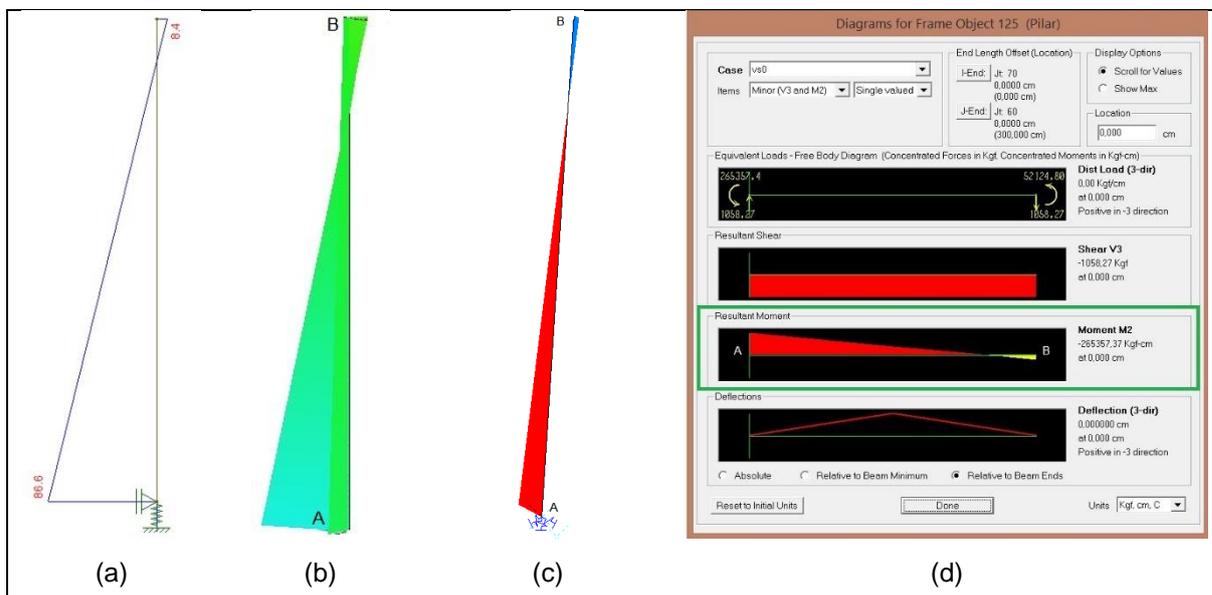
Foram escolhidos os pilares P3, P5 e P8 para análise dos momentos nos tramos dos pilares. Os momentos foram analisados no topo e na base destes pilares já que não foi realizada análise de segunda ordem da estrutura.

A escolha destes três pilares em específico se justifica pelo pilar P5 ser de canto, no encontro das faces opostas a aplicação dos carregamentos de vento, ou seja, será o pilar mais comprimido da edificação.

O pilar P8 é central, intermediário em ambas direções analisadas. E o pilar P3 é de extremidade, fica no meio de uma das faces e na extremidade da outra.

A Figura 23 ilustra os diagramas de momento fletor para os softwares Ftool, Eberick e SAP.

Figura 23: Momentos atuantes nos pilares obtidos através (a) do Ftool, (b) do Eberick, (c) do SAP e (d) da janela propriedades da seleção do SAP



Fonte: Imagens obtidas através dos softwares Eberick e SAP

Através da Figura 23 pode ser estabelecida a convenção dos sinais dos momentos atuantes nos tramos dos pilares para (a) Ftool, (b) Eberick e (c) SAP. No exemplo da Figura 23(d), na extremidade A, atua um momento fletor em sentido anti-horário negativo, tracionando as fibras superiores e comprimindo as fibras inferiores da barra analisada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência do capítulo serão apresentados os deslocamentos do nós da grelha de *radier*, momentos nas barras da grelha e momento nos tramos dos pilares inferiores para os dois tipos de solo considerados, usando os três softwares diferentes.

### 4.1 Análise dos deslocamentos no nós da grelhas referente aos pilares 1 ao 15

Na consideração dos deslocamentos dos nós da grelha o eixo z positivo foi considerado com sentido do pavimento térreo para o topo do edifício. Assim, todos os deslocamentos apresentados são negativos.

Foram apresentados e discutidos aqui apenas os deslocamentos dos nós localizados sob os pilares.

As combinações A, B, C, D e E, constantes em todas análises, estão apresentadas no item 3.2.1 – Combinações de ações.

#### 4.1.1 Solo 1: areia mediamente compacta

Os deslocamentos dos nós das grelhas, na posição dos pilares, foram obtidos para os três modelos e estão apresentados na Tabela 8:

Tabela 8: Deslocamentos em centímetros para o solo 1

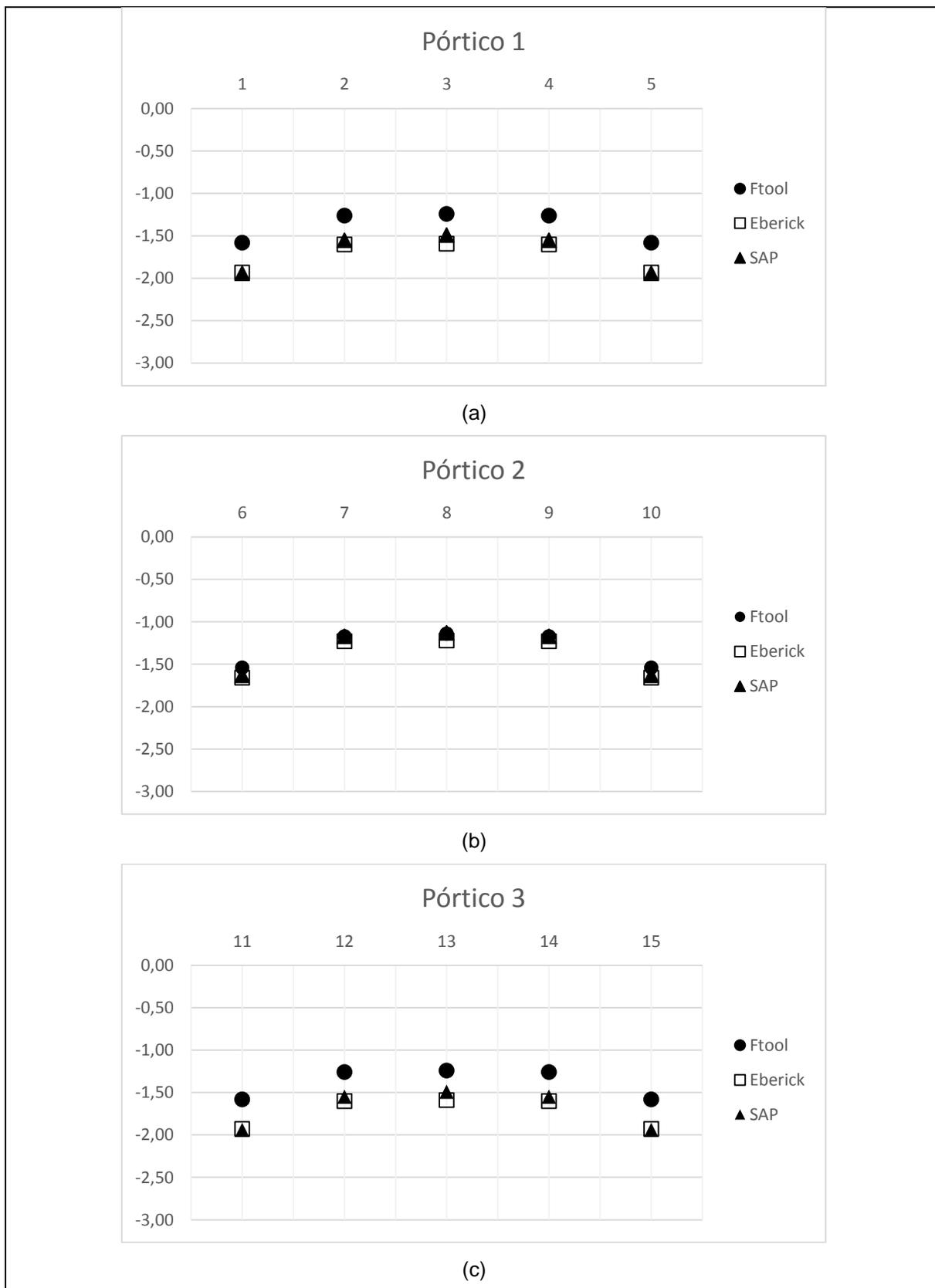
Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	-1,58	-1,46	-1,84	-1,32	-1,89	-1,93	-1,87	-2,10	-1,72	-2,10	-1,94	-1,86	-2,13	-1,70	-2,14
2	-1,26	-1,26	-1,65	-1,16	-1,66	-1,60	-1,60	-1,72	-1,49	-1,69	-1,55	-1,54	-1,69	-1,43	-1,67
3	-1,24	-1,24	-1,65	-1,15	-1,66	-1,59	-1,61	-1,69	-1,48	-1,66	-1,49	-1,49	-1,62	-1,38	-1,59
4	-1,26	-1,27	-1,65	-1,18	-1,66	-1,60	-1,60	-1,72	-1,50	-1,69	-1,55	-1,56	-1,69	-1,45	-1,67
5	-1,58	-1,68	-1,84	-1,65	-1,89	-1,93	-1,98	-2,10	-1,91	-2,10	-1,94	-2,01	-2,13	-1,94	-2,14
6	-1,54	-1,49	-1,26	-1,34	-1,22	-1,66	-1,62	-1,66	-1,49	-1,55	-1,63	-1,58	-1,63	-1,43	-1,52
7	-1,17	-1,17	-1,14	-1,06	-1,08	-1,23	-1,23	-1,23	-1,13	-1,13	-1,17	-1,17	-1,17	-1,08	-1,08
8	-1,14	-1,15	-1,14	-1,04	-1,08	-1,22	-1,22	-1,22	-1,12	-1,12	-1,13	-1,13	-1,13	-1,03	-1,03
9	-1,17	-1,17	-1,14	-1,07	-1,08	-1,23	-1,23	-1,23	-1,13	-1,13	-1,17	-1,18	-1,17	-1,08	-1,08
10	-1,54	-1,60	-1,26	-1,52	-1,22	-1,66	-1,70	-1,66	-1,62	-1,55	-1,63	-1,69	-1,63	-1,62	-1,52
11	-1,58	-1,46	-1,30	-1,33	-1,06	-1,93	-1,87	-1,75	-1,72	-1,53	-1,94	-1,86	-1,74	-1,70	-1,50
12	-1,26	-1,26	-1,35	-1,16	-1,16	-1,60	-1,60	-1,49	-1,49	-1,30	-1,55	-1,55	-1,41	-1,43	-1,22
13	-1,24	-1,24	-1,35	-1,15	-1,16	-1,59	-1,59	-1,48	-1,48	-1,30	-1,49	-1,49	-1,37	-1,38	-1,17
14	-1,26	-1,27	-1,35	-1,18	-1,16	-1,60	-1,60	-1,49	-1,50	-1,30	-1,55	-1,56	-1,41	-1,45	-1,22
15	-1,58	-1,68	-1,30	-1,65	-1,06	-1,93	-1,98	-1,75	-1,91	-1,53	-1,94	-2,01	-1,74	-1,95	-1,50

Os deslocamentos obtidos para cada um dos softwares testados foram diferentes. O maior deslocamento foi no pilar 5, modelo SAP, combinação E. Especificamente, o pilar 5, apresenta-se como o mais desfavorável em relação as incidências de vento em ambas direções analisadas. Dessa forma, mesmo quando analisado na direção de vento incidente a 0 grau, combinações B e D, os deslocamentos no nó referente ao pilar 5 são os mais acentuados.

Ainda, pode-se perceber que a região central da edificação é aquela na qual os recalques tem menor intensidade, apresentando os menores deslocamentos para o nó referente ao pilar 8, centro do *radier*.

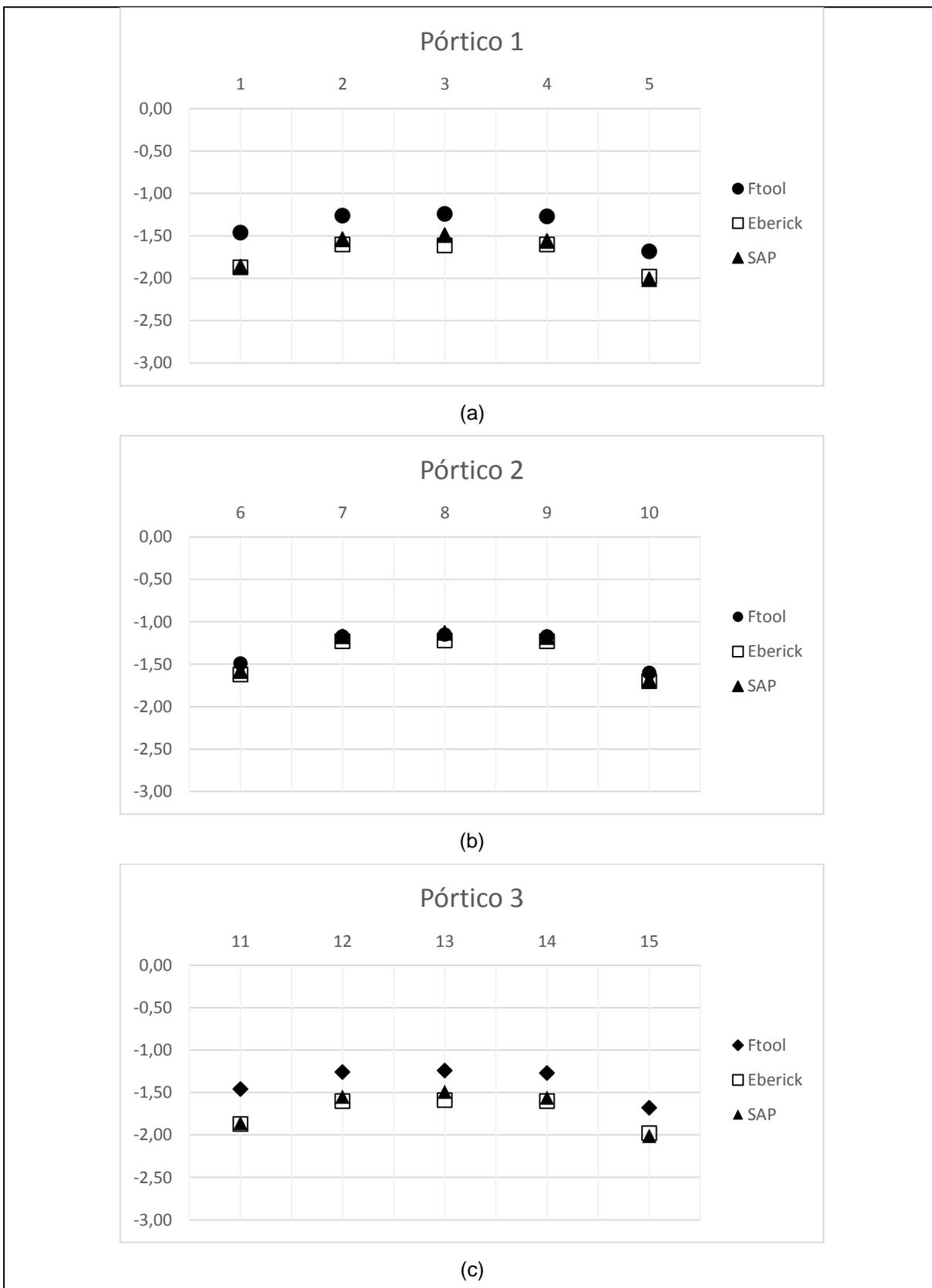
As comparações dos deslocamentos, entre os três modelos analisados, para os nós da grelha referentes aos pilares 1 a 15 são ilustrados: nas Figura 24, Figura 25 e Figura 26 para os pórticos na direção a 0 grau (eixo x) e nas Figura 27 e Figura 28 para os pórticos a 90 graus (eixo y).

Figura 24: Deslocamentos, combinação A, pórticos (a) 1, (b) 2 e (c) 3



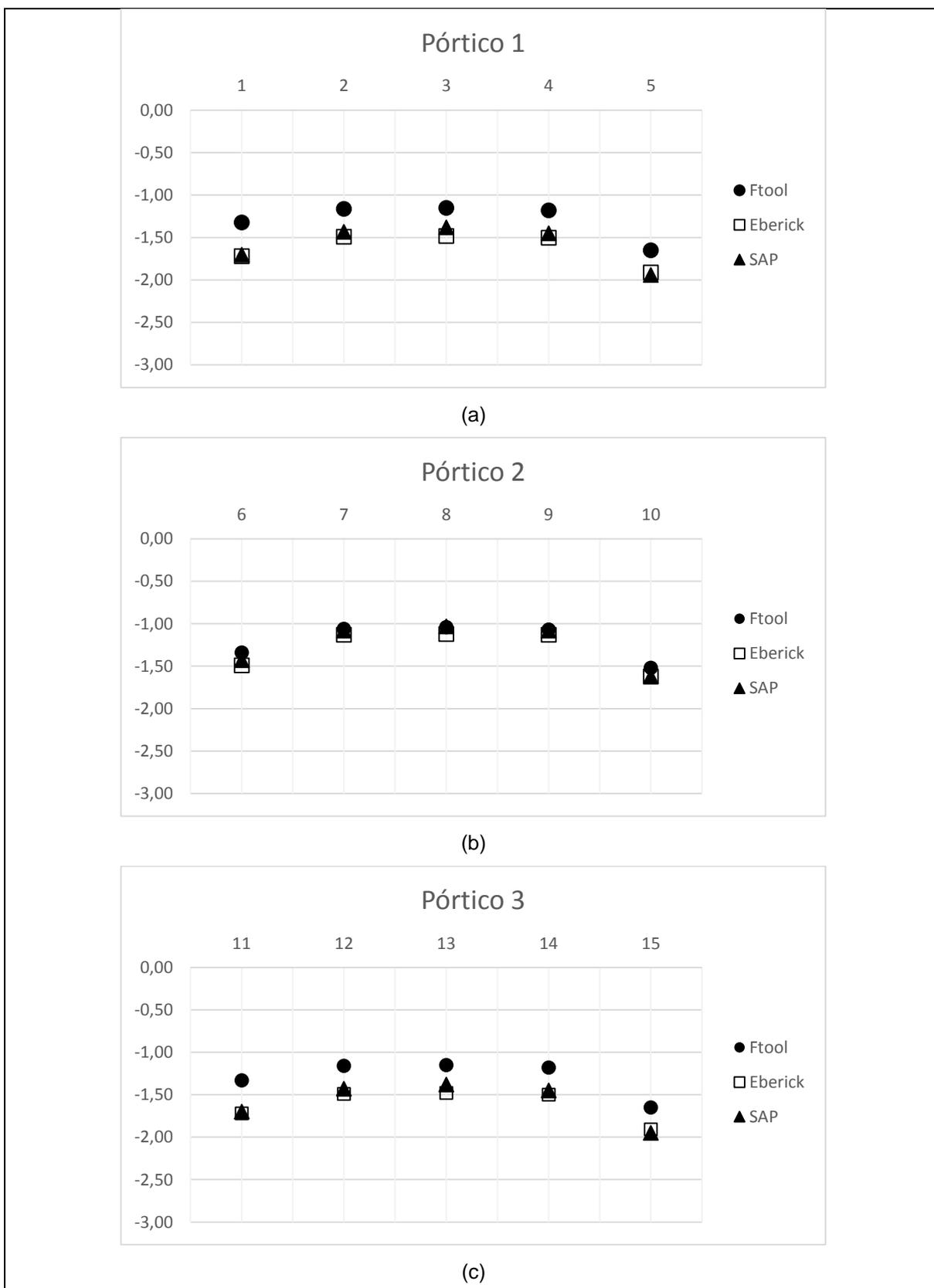
Fonte: Elaboração própria

Figura 25: Deslocamentos, combinação B, pórticos (a) 1, (b) 2 e (c) 3



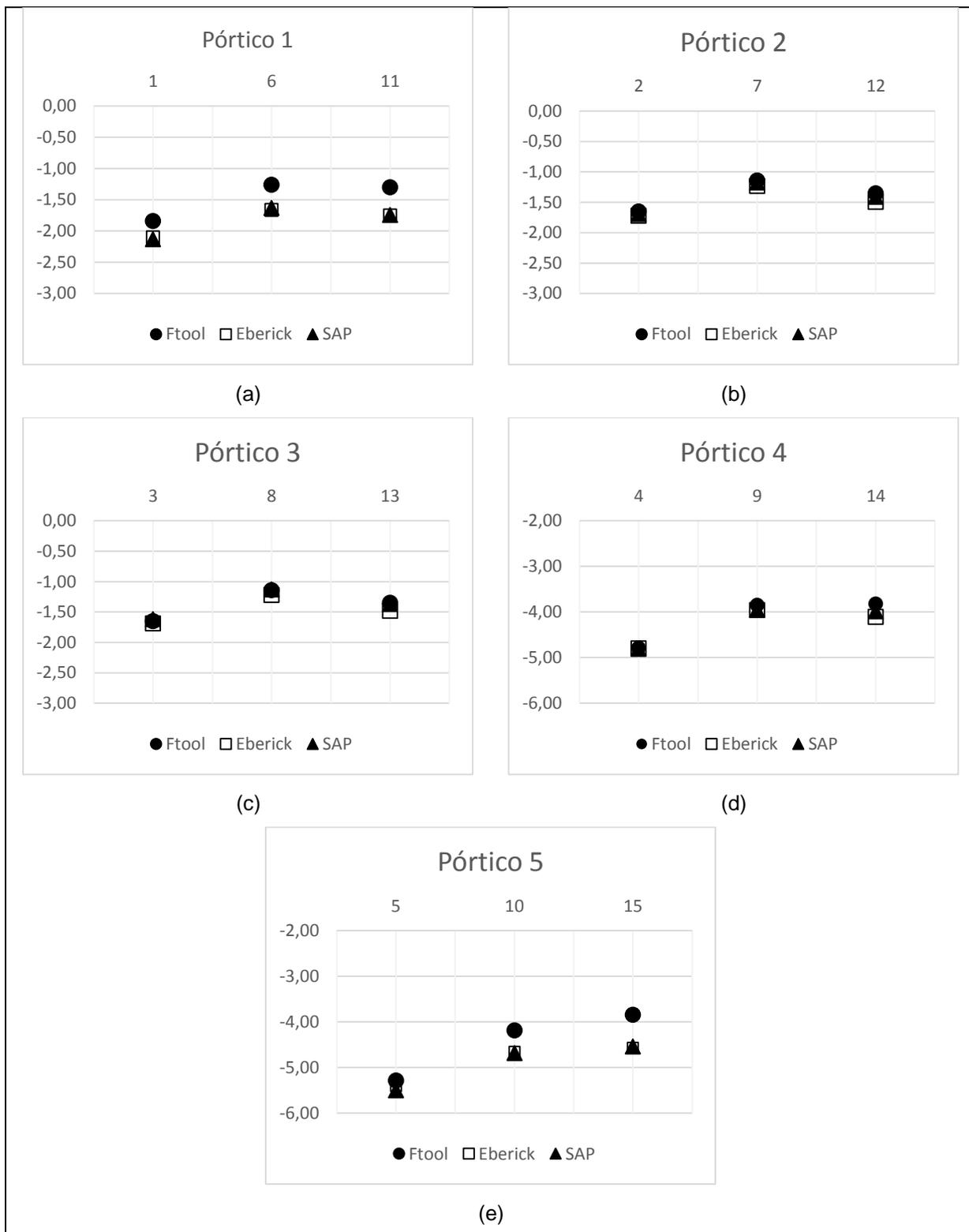
Fonte: Elaboração própria

Figura 26: Deslocamentos, combinação D, pórticos (a) 1, (b) 2 e (c) 3



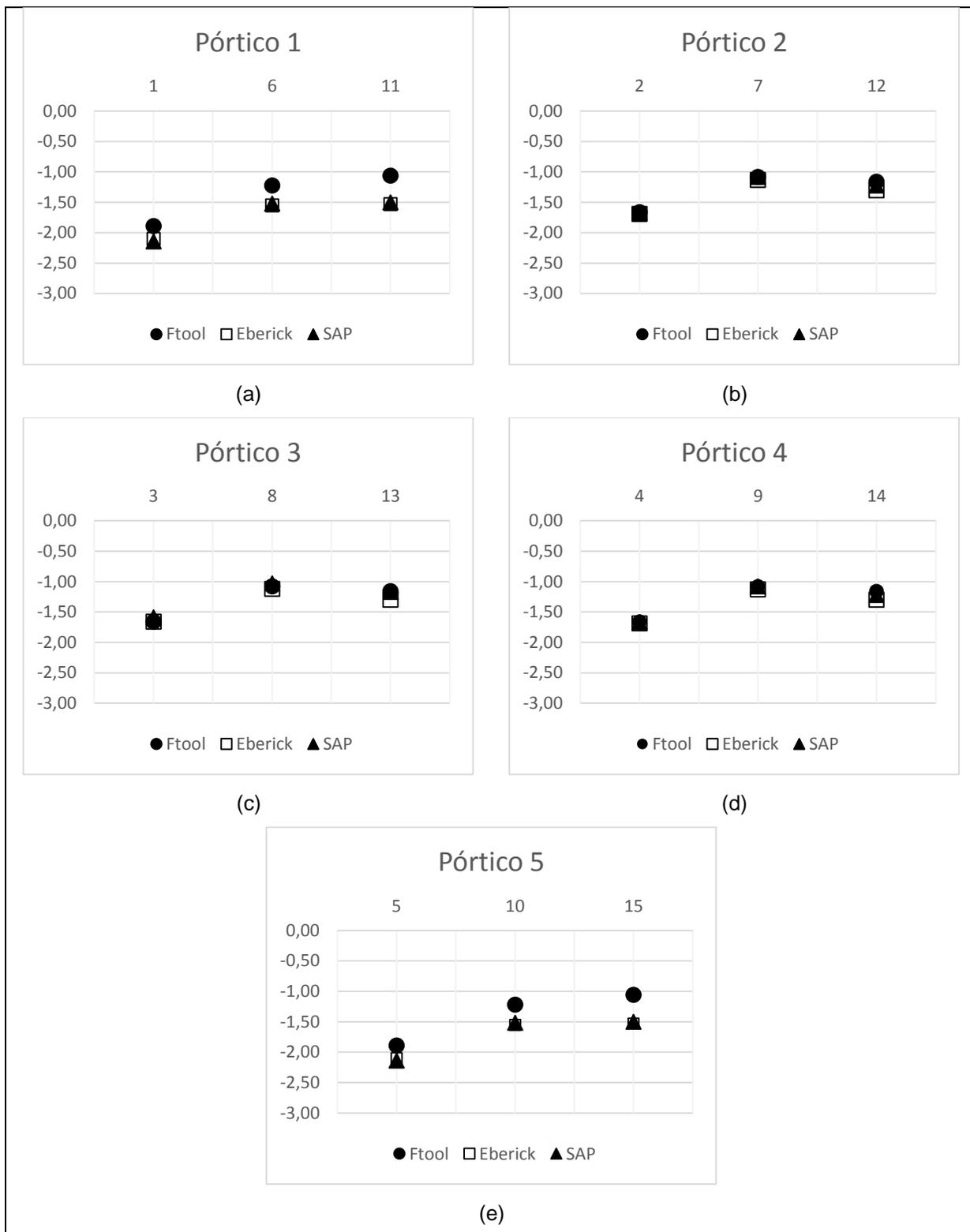
Fonte: Elaboração própria

Figura 27: Deslocamentos, combinação C, pórticos (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5



Fonte: Elaboração própria

Figura 28: Deslocamentos, combinação E, pórticos (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5



Fonte: Elaboração própria

A simetria nos carregamentos e a análise através da Figura 24(a) permitem verificar que na combinação onde não há a ação do vento, os deslocamentos verticais são iguais entre os pilares 1 – 5 e 2 – 4, como já esperado; ainda, na Figura 24(b) o mesmo ocorre para os pilares 6 – 10 e 7 – 9; por fim, na Figura 24(c), a mesma situação ocorre para os pilares 11 – 15, 12 – 14.

De maneira a poder comparar os resultados obtidos para cada um dos softwares, fez-se a razão entre os deslocamentos para os pares fez-se a comparação dos deslocamentos para os pares: Eberick/Ftool, Eberick/SAP e SAP/Ftool. Esta razão está apresentada na Tabela 9:

Tabela 9: Razão entre os deslocamentos para o solo 1

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	1,22	1,28	1,14	1,30	1,11	0,99	1,01	0,99	1,01	0,98	1,23	1,27	1,16	1,29	1,13
2	1,27	1,27	1,04	1,28	1,02	1,03	1,04	1,02	1,04	1,01	1,23	1,22	1,02	1,23	1,01
3	1,28	1,30	1,02	1,29	1,00	1,07	1,08	1,04	1,07	1,04	1,20	1,20	0,98	1,20	0,96
4	1,27	1,26	1,04	1,27	1,02	1,03	1,03	1,02	1,03	1,01	1,23	1,23	1,02	1,23	1,01
5	1,22	1,18	1,14	1,16	1,11	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	1,23	1,20	1,16	1,18	1,13
6	1,08	1,09	1,32	1,11	1,27	1,02	1,03	1,02	1,04	1,02	1,06	1,06	1,29	1,07	1,25
7	1,05	1,05	1,08	1,07	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,00	1,00	1,03	1,02	1,00
8	1,07	1,06	1,07	1,08	1,04	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	0,99	0,98	0,99	0,99	0,95
9	1,05	1,05	1,08	1,06	1,05	1,05	1,04	1,05	1,05	1,05	1,00	1,01	1,03	1,01	1,00
10	1,08	1,06	1,32	1,07	1,27	1,02	1,01	1,02	1,00	1,02	1,06	1,06	1,29	1,07	1,25
11	1,22	1,28	1,35	1,29	1,44	0,99	1,01	1,01	1,01	1,02	1,23	1,27	1,34	1,28	1,42
12	1,27	1,27	1,10	1,28	1,12	1,03	1,03	1,06	1,04	1,07	1,23	1,23	1,04	1,23	1,05
13	1,28	1,28	1,10	1,29	1,12	1,07	1,07	1,08	1,07	1,11	1,20	1,20	1,01	1,20	1,01
14	1,27	1,26	1,10	1,27	1,12	1,03	1,03	1,06	1,03	1,07	1,23	1,23	1,04	1,23	1,05
15	1,22	1,18	1,35	1,16	1,44	0,99	0,99	1,01	0,98	1,02	1,23	1,20	1,34	1,18	1,42

Comparando os três programas percebe-se que os resultados do Eberick e SAP foram muito próximos. A maior diferença entre os deslocamentos entre os dois foi de 11%. Sendo que os deslocamentos do Eberick foram em sua maioria maiores que o do SAP.

Já a comparação dos resultados do Ftool com os outros dois softwares aponta que os deslocamentos deste foram sempre menores que o dos outros dois, sendo a maior diferente entre os deslocamentos em 44%.

## 4.1.2 Solo 2: areia fofa

Os deslocamentos dos nós das grelhas, na posição dos pilares, foram obtidos para os três modelos e estão apresentados na Tabela 10:

Tabela 10: Deslocamentos em centímetros para o solo 2

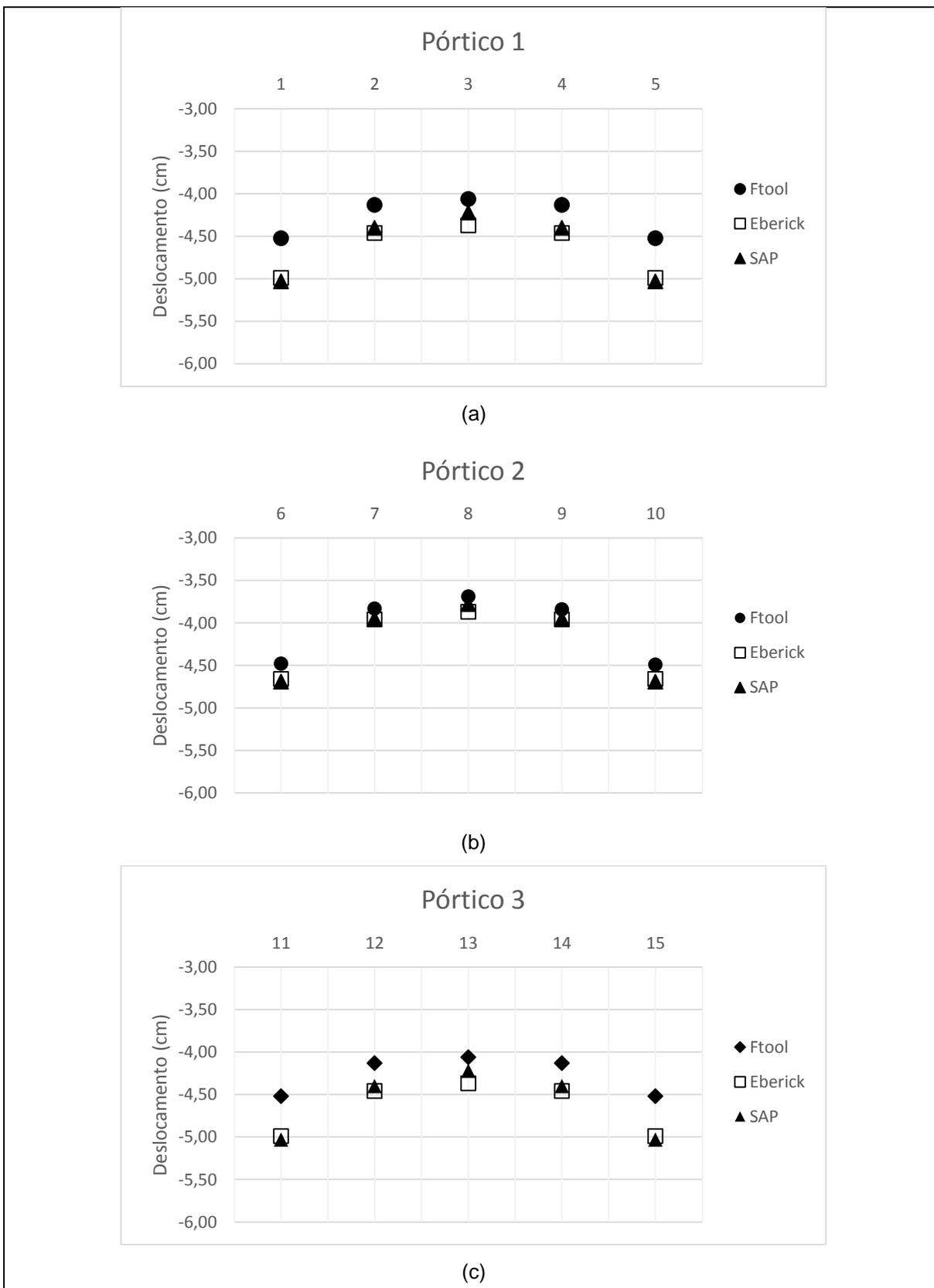
Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	-4,52	-4,27	-5,29	-3,91	-5,46	-4,99	-4,88	-5,41	-4,48	-5,37	-5,03	-4,87	-5,51	-4,44	-5,50
2	-4,13	-4,06	-4,79	-3,83	-4,85	-4,46	-4,44	-4,80	-4,11	-4,71	-4,40	-4,36	-4,81	-4,02	-4,76
3	-4,06	-4,06	-4,79	-3,91	-4,85	-4,37	-4,37	-4,69	-4,04	-4,59	-4,22	-4,22	-4,62	-3,91	-4,56
4	-4,13	-4,20	-4,79	-4,15	-4,85	-4,46	-4,48	-4,80	-4,17	-4,71	-4,40	-4,43	-4,81	-4,14	-4,76
5	-4,52	-4,76	-5,29	-4,93	-5,46	-4,99	-5,10	-5,41	-4,86	-5,37	-5,03	-5,18	-5,51	-4,95	-5,50
6	-4,48	-4,39	-4,19	-4,08	-4,05	-4,66	-4,56	-4,66	-4,18	-4,34	-4,69	-4,56	-4,69	-4,15	-4,37
7	-3,83	-3,85	-3,85	-3,58	-3,65	-3,96	-3,95	-3,96	-3,63	-3,65	-3,95	-3,92	-3,95	-3,60	-3,65
8	-3,69	-3,69	-3,85	-3,48	-3,65	-3,87	-3,87	-3,87	-3,56	-3,56	-3,78	-3,78	-3,78	-3,48	-3,48
9	-3,84	-3,86	-3,85	-3,66	-3,65	-3,96	-3,98	-3,96	-3,68	-3,65	-3,95	-3,98	-3,95	-3,70	-3,65
10	-4,49	-4,58	-4,19	-4,42	-4,05	-4,66	-4,75	-4,66	-4,50	-4,34	-4,69	-4,82	-4,69	-4,59	-4,37
11	-4,52	-4,27	-3,85	-3,91	-3,25	-4,99	-4,88	-4,57	-4,48	-3,97	-5,03	-4,87	-4,54	-4,44	-3,90
12	-4,13	-4,06	-3,82	-3,83	-3,26	-4,46	-4,44	-4,11	-4,11	-3,56	-4,40	-4,36	-3,99	-4,02	-3,39
13	-4,06	-4,06	-3,82	-3,91	-3,26	-4,37	-4,37	-4,04	-4,04	-3,49	-4,22	-4,22	-3,83	-3,91	-3,25
14	-4,13	-4,20	-3,82	-4,15	-3,26	-4,46	-4,48	-4,11	-4,17	-3,56	-4,40	-4,43	-3,99	-4,14	-3,39
15	-4,52	-4,76	-3,85	-4,93	-3,25	-4,99	-5,10	-4,57	-4,86	-3,97	-5,03	-5,18	-4,54	-4,95	-3,90

Considerando a capacidade de suporte do solo 2 inferior ao solo 1, maiores deslocamentos verticais eram esperados e foram constatados, conforme a Tabela 10. Em todas as combinações, para os três modelos analisados, foram constatados recalques para todos os pilares superiores em relação ao solo 1.

Equivalente ao solo 1, o nó da grelha referente ao pilar foi aquele que apresentou maiores deslocamentos. Igualmente, o nó referente ao pilar 8 é aquele cujos deslocamentos são os menores observados, exceto para a simulação no Ftool.

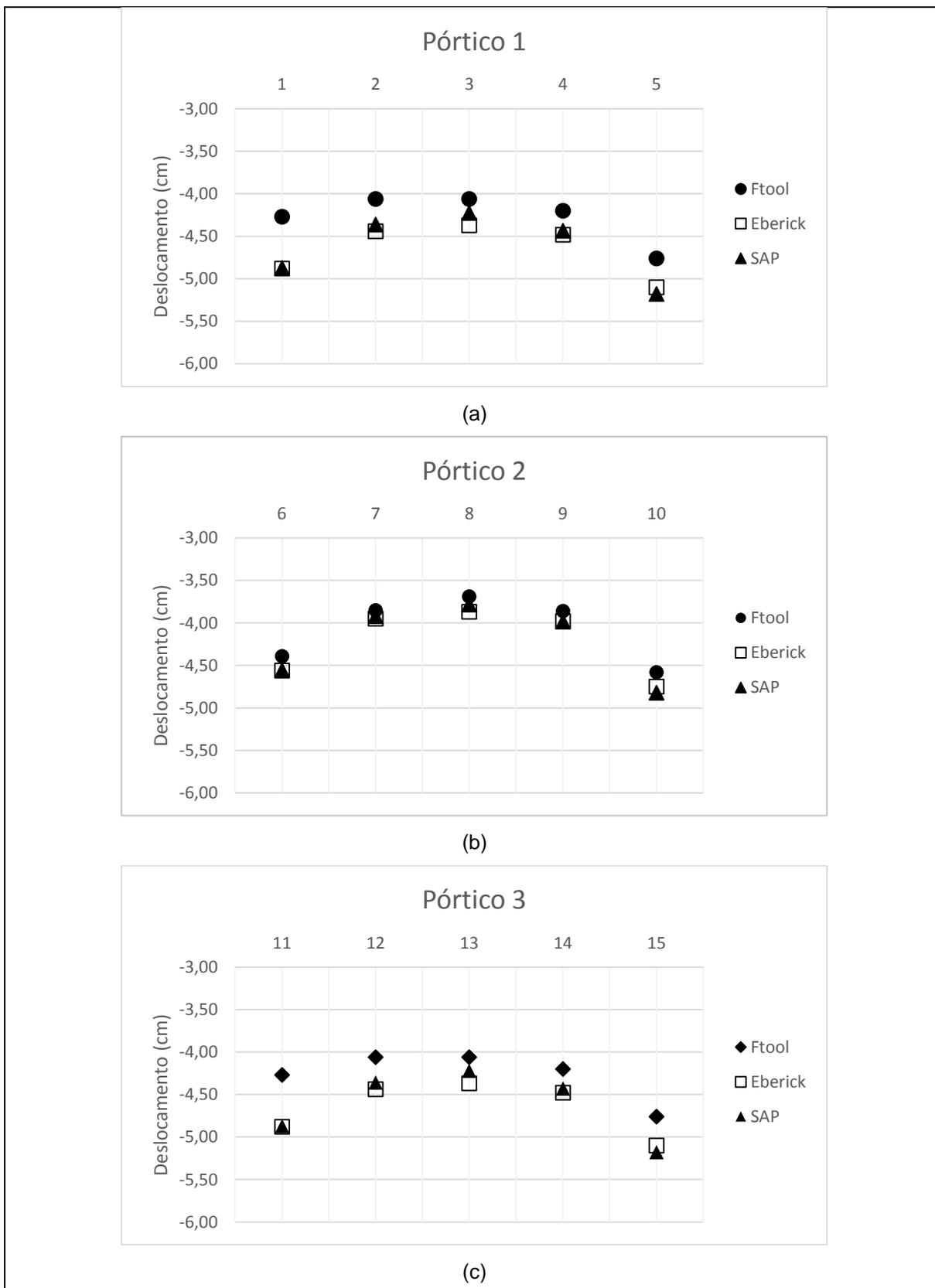
As comparações dos deslocamentos, entre os três modelos analisados, para os nós da grelha referentes aos pilares 1 a 15 são ilustrados: na Figura 29, Figura 30 e Figura 31 para os pórticos na direção 0 grau (eixo x) e nas Figura 32 e a Figura 33 para os pórticos a 90 graus (eixo y).

Figura 29: Deslocamentos, combinação A, pórticos (a) 1, (b) 2 e (c) 3



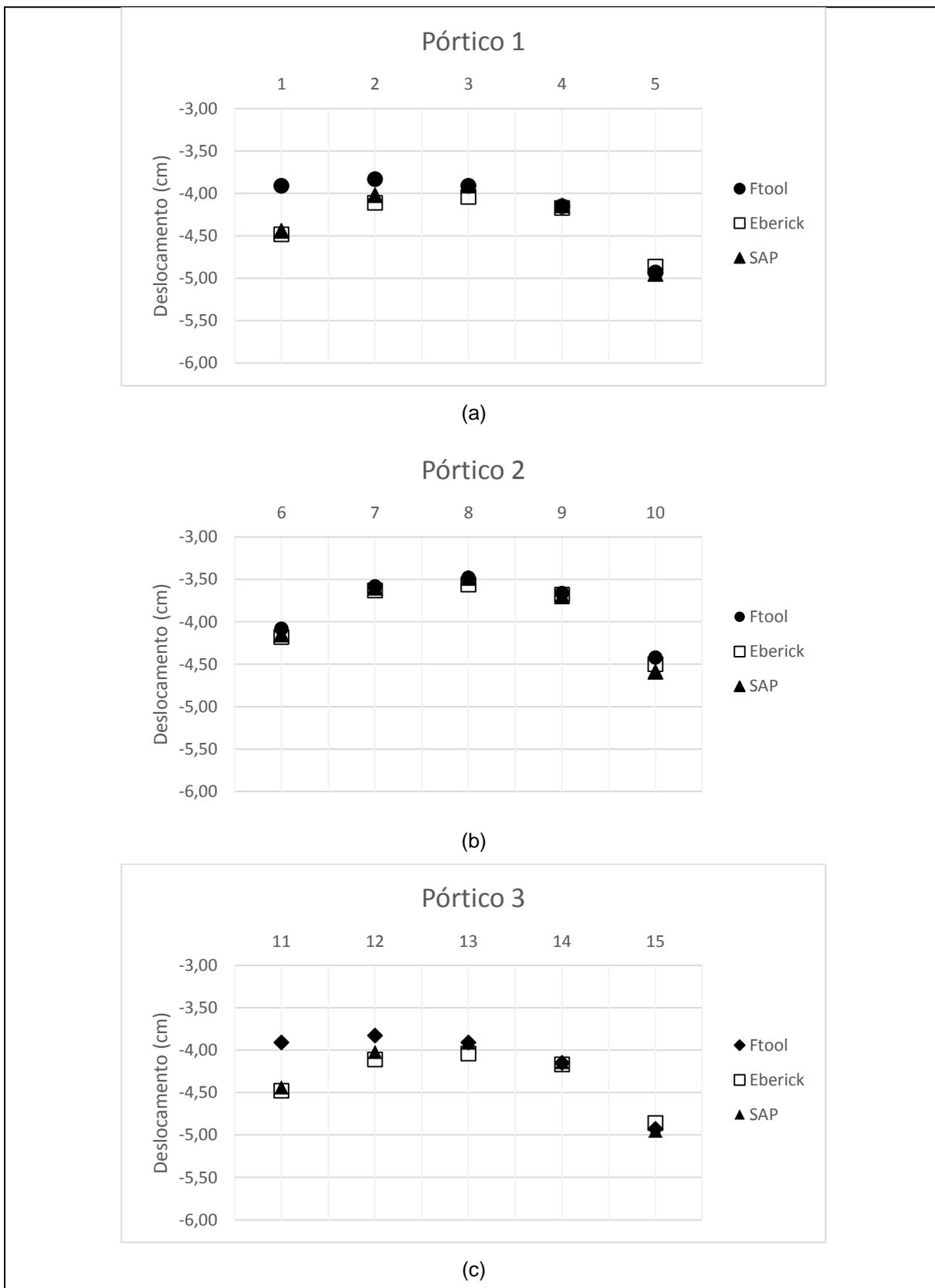
Fonte: Elaboração própria

Figura 30: Deslocamentos, combinação B, pórticos (a) 1, (b) 2 e (c) 3



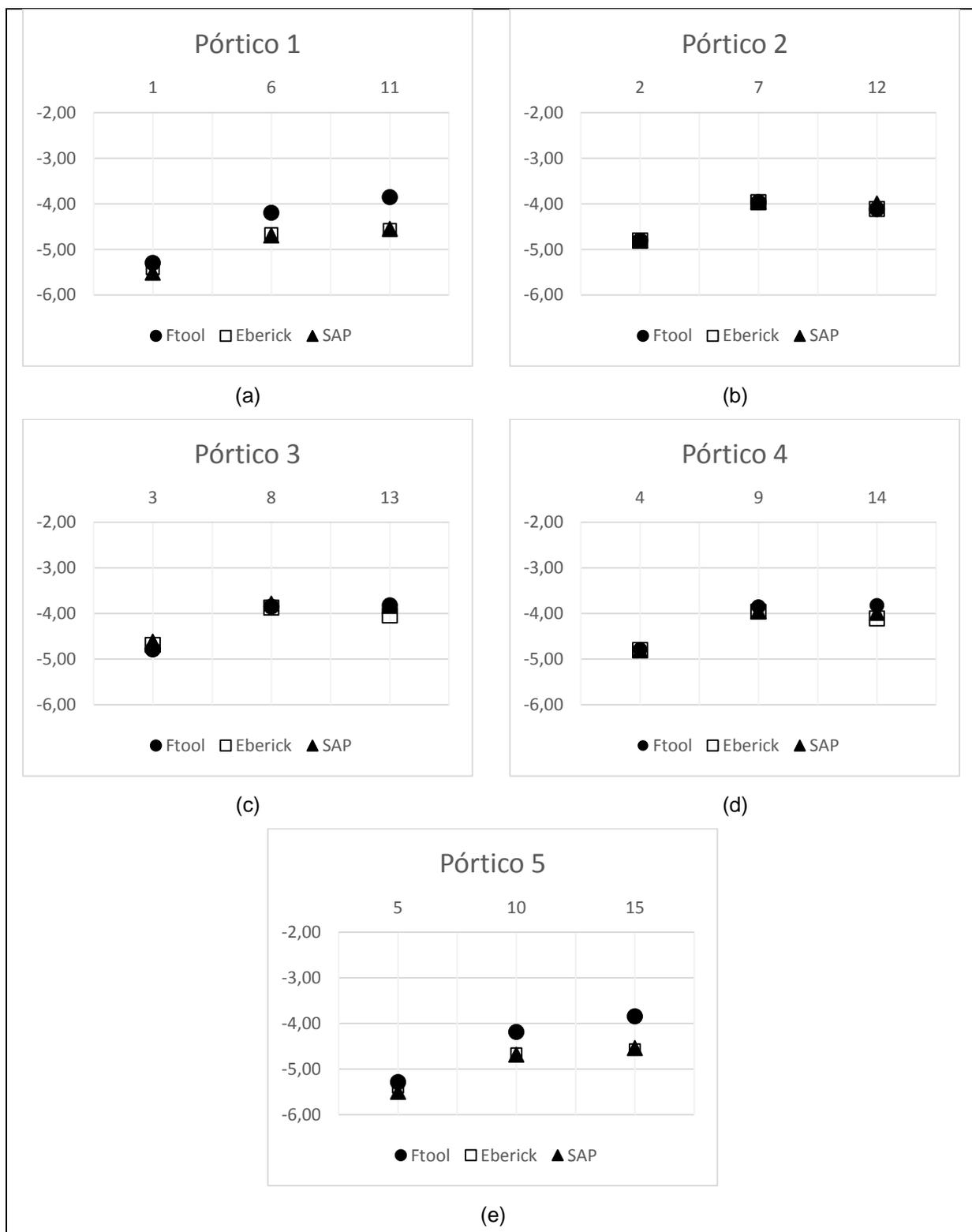
Fonte: Elaboração própria

Figura 31: Deslocamentos, combinação D, pórticos (a) 1, (b) 2 e (c) 3



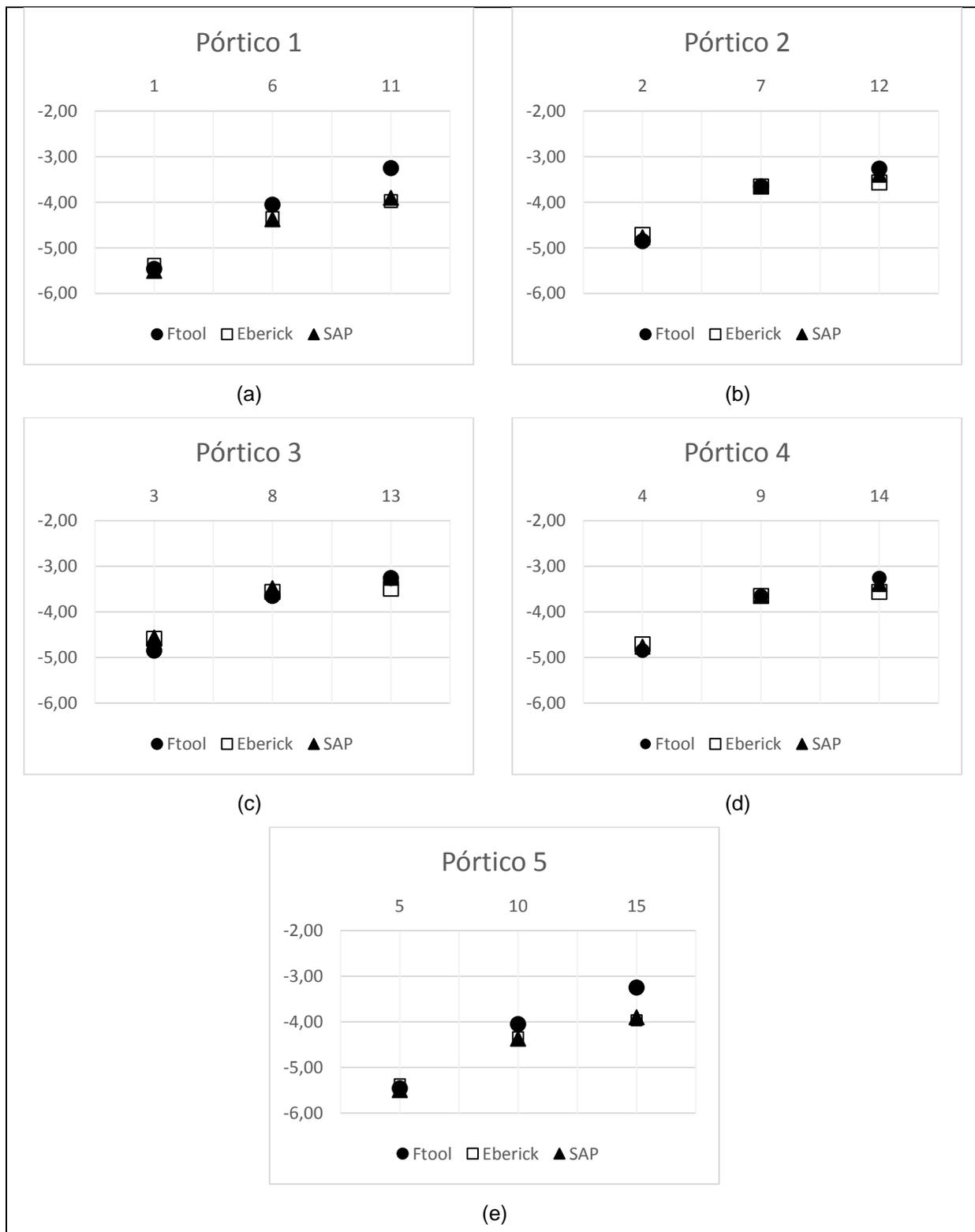
Fonte: Elaboração própria

Figura 32: Deslocamentos, combinação C, pórticos (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5



Fonte: Elaboração própria

Figura 33: Deslocamentos, combinação E, pórticos (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4 e (e) 5



Fonte: Elaboração própria

Igualmente ao solo 1, a simetria nos carregamentos permite a observação, através da Figura 29(a), onde não há ação do vento, de deslocamentos verticais iguais para os pilares 1 – 5 e 2 – 4; na Figura 29(b) o mesmo ocorre para os pilares 6 – 10 , 7 – 9; por fim, na Figura (c), os pilares 11 – 15 e 12 – 14.

A razão entre os deslocamentos Eberick/Ftool, Eberick/SAP e SAP/Ftool está apresentada na Tabela 11:

Tabela 11: Razão entre os deslocamentos para o solo 2

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	1,10	1,14	1,02	1,15	0,98	0,99	1,00	0,98	1,01	0,98	1,11	1,14	1,04	1,14	1,01
2	1,08	1,09	1,00	1,07	0,97	1,01	1,02	1,00	1,02	0,99	1,07	1,07	1,00	1,05	0,98
3	1,08	1,08	0,98	1,03	0,95	1,04	1,03	1,02	1,03	1,01	1,04	1,04	0,96	1,00	0,94
4	1,08	1,07	1,00	1,00	0,97	1,01	1,01	1,00	1,01	0,99	1,07	1,06	1,00	1,00	0,98
5	1,10	1,07	1,02	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	1,11	1,09	1,04	1,00	1,01
6	1,04	1,04	1,11	1,02	1,07	0,99	1,00	0,99	1,01	0,99	1,05	1,04	1,12	1,02	1,08
7	1,03	1,03	1,03	1,01	1,00	1,00	1,01	1,00	1,01	1,00	1,03	1,02	1,03	1,00	1,00
8	1,05	1,05	1,01	1,02	0,98	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	0,98	1,00	0,95
9	1,03	1,03	1,03	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,03	1,03	1,03	1,01	1,00
10	1,04	1,04	1,11	1,02	1,07	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	1,04	1,05	1,12	1,04	1,08
11	1,10	1,14	1,19	1,15	1,22	0,99	1,00	1,01	1,01	1,02	1,11	1,14	1,18	1,14	1,20
12	1,08	1,09	1,08	1,07	1,09	1,01	1,02	1,03	1,02	1,05	1,07	1,07	1,04	1,05	1,04
13	1,08	1,08	1,06	1,03	1,07	1,04	1,04	1,05	1,03	1,07	1,04	1,04	1,00	1,00	1,00
14	1,08	1,07	1,08	1,00	1,09	1,01	1,01	1,03	1,01	1,05	1,07	1,05	1,04	1,00	1,04
15	1,10	1,07	1,19	0,99	1,22	0,99	0,98	1,01	0,98	1,02	1,11	1,09	1,18	1,00	1,20

Através da Tabela 11 observa-se que a maior divergência entre a razão dos deslocamentos está na relação entre o Eberick/Ftool, combinação E, pilares 11 e 15, onde o valor é de 1,20. Ainda, na mesma combinação, houveram deslocamentos que igualaram-se para diferentes pilares e combinações. O desvio padrão para essa comparação foi de 0,05.

Uma divergência máxima, da ordem de 1,07, foi obtida para a comparação entre os modelos Eberick/SAP. A maior aproximação foi de 1,00, ou seja, diferentes pilares para diferentes combinações tiveram seus deslocamentos igualados em ambos softwares. O desvio padrão obtido foi de 0,01, apontando os resultados como os mais próximos para as três análises em estudo na Tabela 11.

A razão entre os modelos SAP/Ftool resultou em 1,20 para os pilares 11, 14 e 15, ambos na combinação E. Valores exatos, cuja razão igualou-se a 1, foram

constatados em diferentes pilares e combinações. O desvio padrão calculado foi de 0,05.

As divergências maiores na razão Eberick/Ftool e SAP/Ftool devem-se, provavelmente, à aproximação realizada para o emprego do Ftool. Como os pórticos são colocados em linha (associados) e agrupados em função da posição e geometria, a resposta do modelo tende a ser um pouco diferente. Contudo, percebeu-se a regularidade nos deslocamentos menores para o Ftool. Isto indica que o modelo neste software resultou mais rígido que nos outros dois.

#### 4.1.3 Comparação entre os solos 1 e 2

A Tabela 12 apresenta a razão entre os deslocamentos sofridos pelos nós grelha entre os solos 2 e 1:

Tabela 12: Razão entre os solos 2 e 1 para os deslocamentos

Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	2,86	2,92	2,88	2,96	2,89	2,59	2,61	2,58	2,60	2,56	2,59	2,62	2,58	2,61	2,57
2	3,28	3,22	2,90	3,30	2,92	2,79	2,78	2,79	2,76	2,79	2,84	2,83	2,85	2,81	2,85
3	3,27	3,27	2,90	3,40	2,92	2,75	2,71	2,78	2,73	2,77	2,83	2,84	2,85	2,83	2,87
4	3,28	3,31	2,90	3,52	2,92	2,79	2,80	2,79	2,78	2,79	2,84	2,84	2,85	2,86	2,85
5	2,86	2,83	2,88	2,99	2,89	2,59	2,58	2,58	2,54	2,56	2,59	2,58	2,58	2,55	2,57
6	2,91	2,95	3,33	3,04	3,32	2,81	2,81	2,81	2,81	2,80	2,88	2,89	2,88	2,90	2,88
7	3,27	3,29	3,38	3,38	3,38	3,22	3,21	3,22	3,21	3,23	3,38	3,35	3,38	3,33	3,38
8	3,24	3,21	3,38	3,35	3,38	3,17	3,17	3,17	3,18	3,18	3,35	3,35	3,35	3,38	3,38
9	3,28	3,30	3,38	3,42	3,38	3,22	3,24	3,22	3,26	3,23	3,38	3,38	3,38	3,43	3,38
10	2,92	2,86	3,33	2,91	3,32	2,81	2,79	2,81	2,78	2,80	2,88	2,85	2,88	2,83	2,88
11	2,86	2,92	2,96	2,94	3,07	2,59	2,61	2,61	2,60	2,59	2,59	2,62	2,61	2,61	2,60
12	3,28	3,22	2,83	3,30	2,81	2,79	2,78	2,76	2,76	2,74	2,84	2,81	2,83	2,81	2,78
13	3,27	3,27	2,83	3,40	2,81	2,75	2,75	2,73	2,73	2,68	2,83	2,83	2,80	2,83	2,78
14	3,28	3,31	2,83	3,52	2,81	2,79	2,80	2,76	2,78	2,74	2,84	2,84	2,83	2,86	2,78
15	2,86	2,83	2,96	2,99	3,07	2,59	2,58	2,61	2,54	2,59	2,59	2,58	2,61	2,54	2,60

Considerando a razão entre os deslocamentos dos solos 1 e 2, evidencia-se a grande influência nos deslocamentos sofridos pela grelha após a incidência dos carregamentos. No software Ftool foi obtida uma média de deslocamentos de 3,11, para o Eberick de 2,81 e para o SAP a média foi igual para todas as combinações igualando-se a 2,88.

## 4.2 Análise dos momentos nos nós da grelha referente aos pilares 5 e 8

Como exposto na metodologia, para a comparação dos esforços na grelha foi necessário uniformizar os resultados obtidos. No Eberick o programa apresenta para cada barra da grelha o momento já uniformizado em kNm/m. No SAP os valores eram o resultado para apenas aquela barra (kNm). E para o Ftool os momentos eram para a largura da faixa considerada. Assim, em função da quantidade de dados a coletar e uniformizar, optou-se por analisar os resultados apenas sob os pilares P5 e P8 por serem representativos do comportamento do conjunto.

A título de esclarecimento, todas as colunas esquerdas das Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16, Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20 com o título Grelha/Pilar, referem-se ao nó imediatamente inferior ao número do pilar ali indicado.

### 4.2.1 Solo 1: areia mediamente compacta

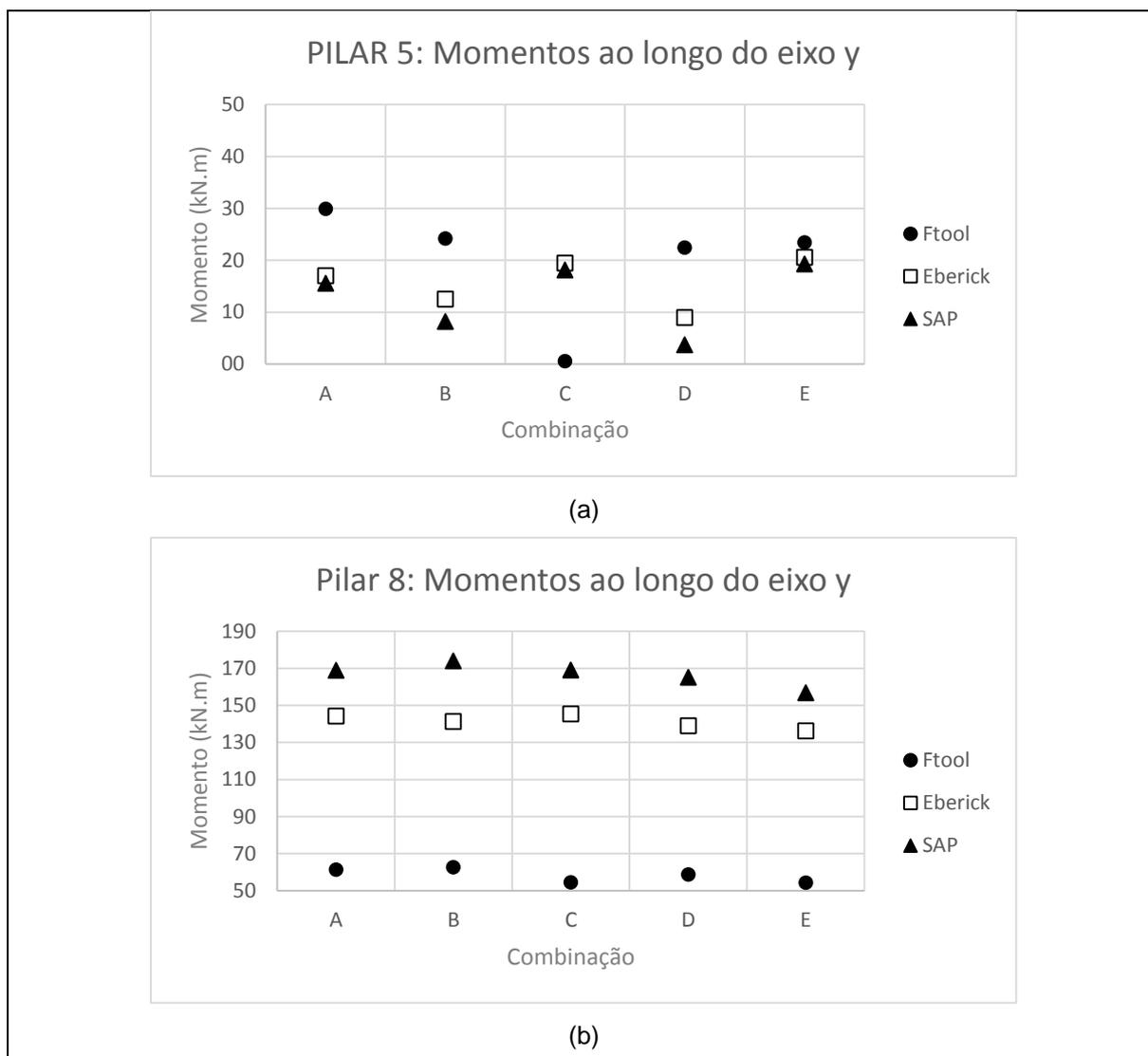
A Tabela 13 apresenta os momentos no eixo y para os três modelos analisados utilizando no solo 1:

Tabela 13: Momentos em kN.m no eixo y

Grelha/ Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	29,9	24,2	0,6	22,5	23,5	17,0	12,5	19,5	9,0	20,6	15,6	8,2	18,2	3,7	19,3
8	61,4	62,6	54,6	58,7	54,4	144,3	141,4	145,5	139,1	136,2	169,0	174,0	169,0	165,2	156,8

Os dados constantes na Tabela 13 e plotados na Figura 34 demonstram uma correlação entre os modelos simulados no Ftool, no Eberick e no SAP. Para o Ftool os valores dos esforços foram significativamente diferentes. Os momentos obtidos com o Eberick são ligeiramente superiores àqueles do SAP.

Figura 34: Momentos (eixo y) em kN.m para os nós dos pilares (a)5 e (b)8



Fonte: Elaboração própria

As razões entre os momentos em y encontradas nos três modelos analisados estão apresentadas na Tabela 14:

Tabela 14: Razão entre os momentos y para o solo 1

Grelha/ Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	0,6	0,5	35,5	0,4	0,9	1,1	1,5	1,1	2,4	1,1	0,5	0,3	33,0	0,2	0,8
8	2,3	2,3	2,7	2,4	2,5	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	2,8	2,8	3,1	2,8	2,9

Na Tabela 14, a comparação entre os softwares Eberick/Ftool, apresenta divergências expressivas, a exemplo da combinação C, Pilar 5, cuja razão é da ordem

de 35,5. Todavia, o mesmo pilar para a combinação E, tem razão igual a 0,9. Foi obtido 10,75 como desvio padrão, ou seja, uma divergência significativa.

Na comparação Eberick/SAP, a maior divergência está no nó referente ao pilar 5 para a combinação D igual a 2,4. As considerações para o pilar 8, cujas razões entre os momentos estão mostradas na Tabela 14, apresentaram divergências menores em relação ao pilar 5. O desvio padrão calculado é de 0,49, mostrando-se como a melhor relação entre as comparações da Tabela 14.

Sendo SAP/Ftool a terceira comparação, com desvio padrão de 9,95, valores expressivos divergentes podem ser observados na razão dos momentos para a combinação C, pilar 5.

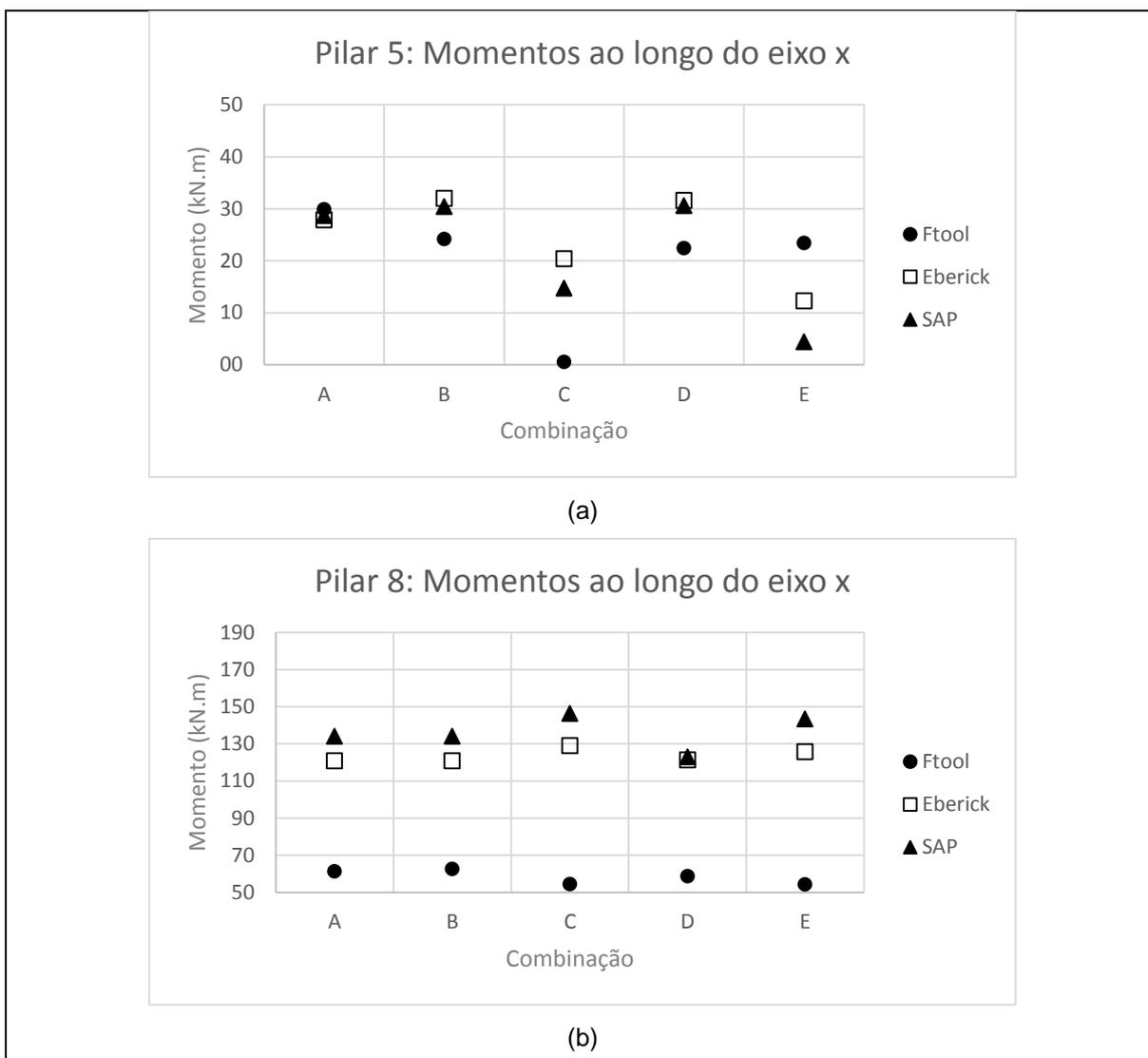
A Tabela 15 apresenta os momentos no eixo x para os três modelos analisados utilizando no solo 1:

Tabela 15: Momentos em kN.m no eixo x

Grelha/ Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	29,9	24,2	0,6	22,5	23,5	27,9	32,1	20,4	31,7	12,3	28,7	30,5	14,8	30,6	4,4
8	61,4	62,6	54,6	58,7	54,4	120,9	120,9	129,0	121,4	125,7	134,1	134,1	146,4	123,0	143,4

Os dados constantes na Tabela 15 foram plotados na Figura 35 para os modelos simulados no Ftool, no Eberick e no SAP. Os momentos obtidos com o Eberick são ligeiramente superiores àqueles do SAP. Já, para os valores referentes ao Ftool, não houve aproximação com os outros dois, mais uma vez.

Figura 35: Momentos (eixo x) em kN.m para os nós dos pilares (a)5 e (b)8



Fonte: Elaboração própria

As razões entre os momentos em y encontradas nos três modelos analisados estão apresentadas na Figura 15:

Tabela 16: Razão entre os momentos x para o solo 1

Grelha/ Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	0,9	1,3	37,2	1,4	0,5	1,0	1,1	1,4	1,0	2,8	1,0	1,3	26,8	1,4	0,2
2	2,0	1,9	2,4	2,1	2,3	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	2,2	2,1	2,7	2,1	2,6

Na Tabela 16, a comparação entre os softwares Eberick/Ftool, apresenta divergências expressivas, a exemplo da combinação C, Pilar 5, cuja razão é da ordem

de 37,2. Todavia, o mesmo pilar para a combinação A, tem razão igual a 0,9. Foi obtido 11,25 como desvio padrão, ou seja, uma divergência significativa.

Na comparação Eberick/SAP, a maior divergência está no nó referente ao pilar 5 para a combinação E igual a 2,8. As considerações para o pilar 8, cujas razões entre os momentos estão mostradas na Tabela 16, apresentaram divergências menores em relação ao pilar 5. O desvio padrão calculado é de 0,58, mostrando-se como a melhor relação entre as comparações da Tabela 16.

Sendo SAP/Ftool a terceira comparação, com desvio padrão de 7,97, valores expressivos divergentes podem ser observados na razão dos momentos para a combinação C, pilar 5. No entanto, maiores aproximações foram obtidas para os demais nós em diferentes combinações.

#### 4.2.2 Solo 2: areia fofa

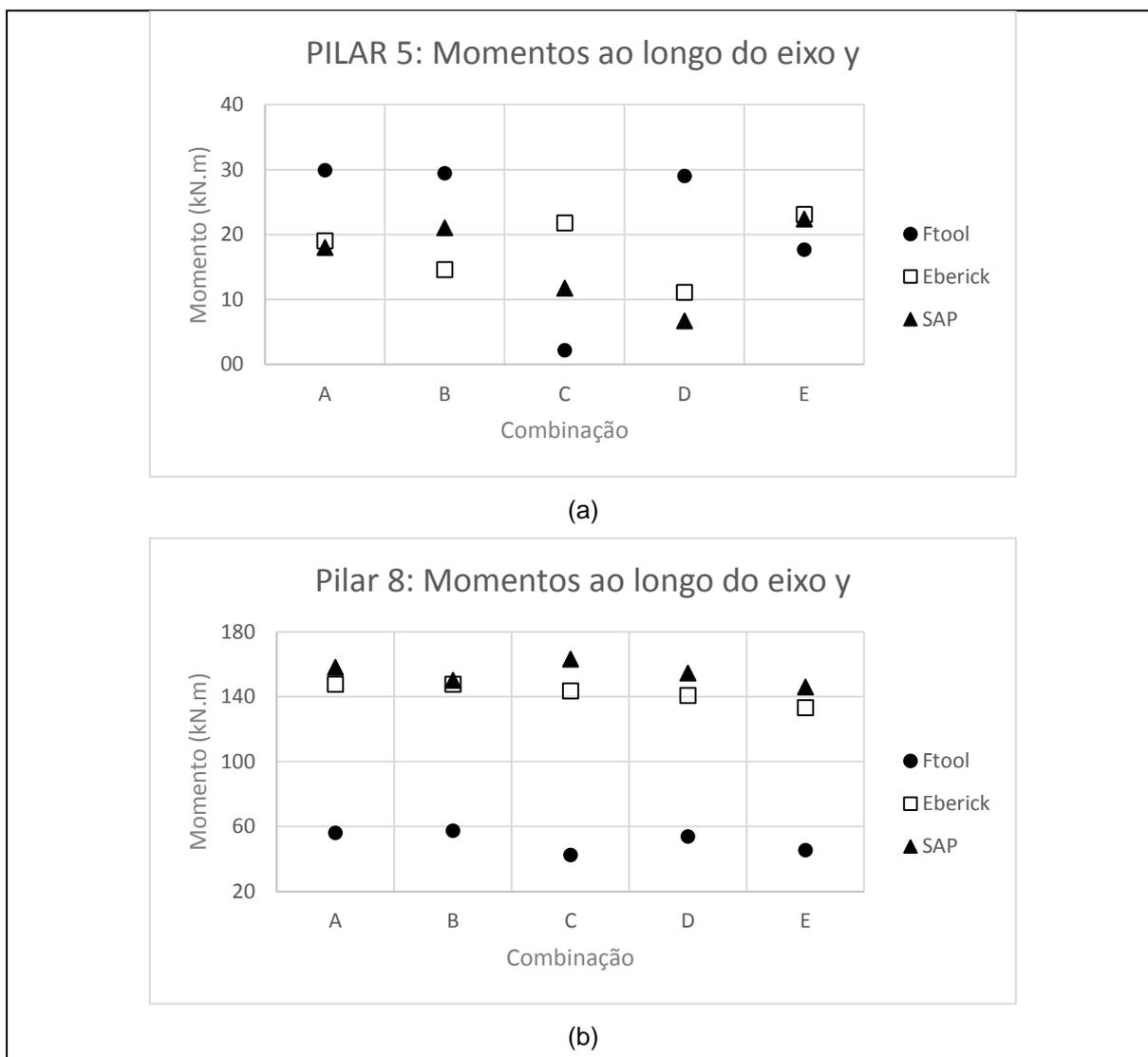
A Tabela 17 apresenta os momentos no eixo y para os três modelos analisados utilizando no solo 2:

Tabela 17: Momentos em kN.m no eixo y

Grelha/ Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	29,9	29,5	2,2	29,0	17,7	19,0	14,6	21,8	11,1	23,1	18,0	21,1	11,8	6,7	22,4
8	56,2	57,6	42,5	53,8	45,5	147,6	147,8	143,6	140,9	133,4	158,2	150,2	163,3	154,6	146,1

Os dados constantes na Tabela 17 e plotados na Figura 37 apresentam uma correlação entre os modelos simulados no Ftool, no Eberick e no SAP. Os momentos obtidos com o SAP são majoritariamente superiores àqueles do Eberick. Já, para os valores referentes ao Ftool, não foi constatada convergência para o nó referente ao pilar 5 e para o pilar 8 os momentos foram sempre menores.

Figura 36: Momentos (eixo y) em kN.m para os nós dos pilares (a)5 e (b)8



Fonte: Elaboração própria

As razões entre os momentos em y encontradas nos três modelos analisados estão apresentadas na Tabela 18:

Tabela 18: Razão entre os momentos y para o solo 2

Grelha/ Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	0,6	0,5	9,9	0,4	1,3	1,1	0,7	1,9	1,7	1,0	0,6	0,7	5,4	0,2	1,3
8	2,6	2,6	3,4	2,6	2,9	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	2,8	2,6	3,8	2,9	3,2

Na Tabela 18, a comparação entre os softwares Eberick/Ftool, apresenta divergências expressivas, a exemplo da combinação C, Pilar 5, cuja razão é da ordem

de 9,9. Todavia, o mesmo pilar para a combinação E, tem razão igual a 1,3. Foi obtido 2,77 como desvio padrão, ou seja, uma divergência significativa.

Na comparação Eberick/SAP, a maior divergência está no nó referente ao pilar 5 para a combinação C igual a 1,9. As considerações para o pilar 8, cujas razões entre os momentos estão mostradas na Tabela 18, apresentaram divergências menores em relação ao pilar 5.

Sendo SAP/Ftool a terceira comparação, com desvio padrão de 1,63, valores expressivos divergentes podem ser observados na razão dos momentos para a combinação C, pilar 5.

A Tabela 19 apresenta os momentos no eixo x para os três modelos analisados utilizando no solo 2:

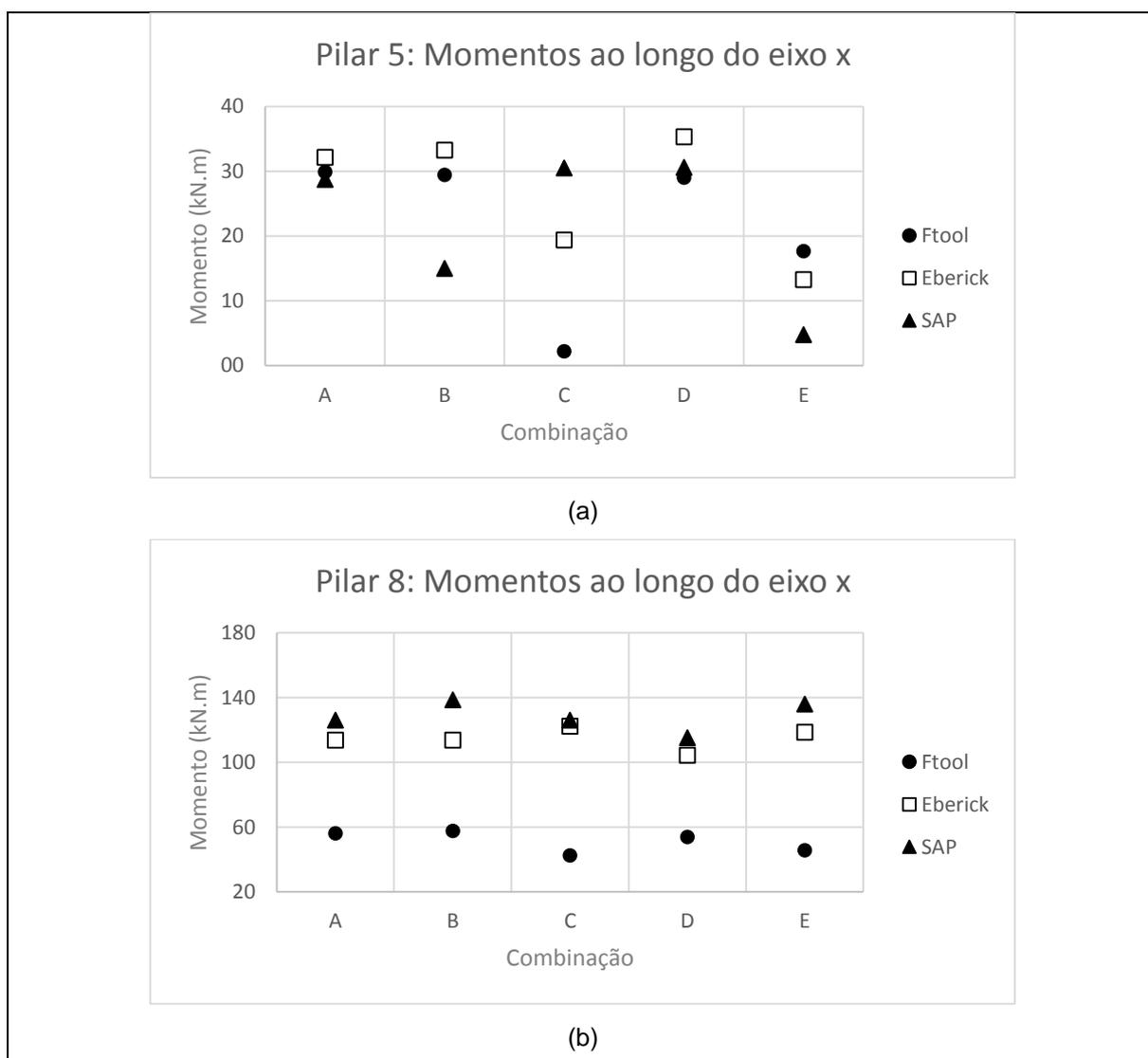
Tabela 19: Momentos em kN.m no eixo x

Grelha/ Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	29,9	29,5	2,2	29,0	17,7	32,2	33,3	19,4	35,3	13,3	28,8	15,0	30,5	30,6	4,8
8	56,2	57,6	42,5	53,8	45,5	113,6	113,6	122,2	104,2	118,5	125,9	138,4	125,9	115,0	135,9

A Figura 37 apresenta os momentos obtidos para os dois pilares e os três softwares.

Os momentos obtidos com o Eberick, para o pilar 5, são majoritariamente superiores àqueles apresentados pelo SAP; para o pilar 8, todos os momentos obtidos através do SAP são ligeiramente superiores aos do Eberick. Mais uma vez, os valores referentes ao Ftool diferiram significativamente dos demais.

Figura 37: Momentos (eixo x) em kN.m para os nós dos pilares (a)5 e (b)8



Fonte: Elaboração própria

As razões entre os momentos em x encontradas nos três modelos analisados estão apresentados na Tabela 20:

Tabela 20: Razão entre os momentos x para o solo 2

Grelha/ Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	1,1	1,1	8,8	1,2	0,8	1,1	2,2	0,6	1,2	2,8	1,0	0,5	13,9	1,1	0,3
8	2,0	2,0	2,9	1,9	2,6	0,9	0,8	1,0	0,9	0,9	2,2	2,4	3,0	2,1	3,0

Na Tabela 20, a comparação entre os softwares Eberick/Ftool, apresenta divergências expressivas, mais uma vez.

Na comparação Eberick/SAP, a maior divergência está no nó referente ao pilar 5 para a combinação E igual a 2,8.

#### 4.2.3 Comparação entre os solos 1 e 2

Nas Tabela 21 e Tabela 22 estão as razões entre os momentos nos nós da grelha referente aos pilares 5 e 8.

Tabela 21: Razão entre os solos 1 e 2 para os momentos y

Grelha/ Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	1,0	0,8	0,3	0,8	1,3	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,4	1,5	0,6	0,9
8	1,1	1,1	1,3	1,1	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,0	1,1	1,1

Tabela 22: Razão entre os solos 1 e 2 para os momentos x

Grelha/ Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	1,0	0,8	0,3	0,8	1,3	0,9	1,0	1,1	0,9	0,9	1,0	2,0	0,5	1,0	0,9
8	1,1	1,1	1,3	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	1,1	1,0	1,2	1,1	1,1

Grande aproximação nas comparações entre os solos 1 e 2 pode ser visualizada nas Tabela 21 e Tabela 22. As comparações entre o pilar 8 para todas as situações apresentaram grande proximidade nas razões estabelecidas e para o pilar 5 a precisão obtida foi um pouco inferior

### 4.3 Análise dos momentos na base e topo dos pilares 3, 5 e 8 entre os pavimentos térreo e primeiro pavimento tipo

Na sequência são apresentados os momentos nos primeiros tramos dos pilares P3, P5 e P8, no topo e na base do pilar.

#### 4.3.1 Solo 1: areia mediamente compacta

As Tabela 23, Tabela 25, Tabela 27 e Tabela 29 apresentam os momentos atuantes na base e topo dos pilares 5, 8 e 3, respectivamente nas Tabela 24, Tabela 26, Tabela 28 e Tabela 30 estão as razões entre os momentos dos modelos. As comparações são feitas entre: Eberick/Ftool, Eberick/SAP e SAP/Ftool:

Tabela 23: Momentos em kN.m na base dos pilares no eixo y

Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	-59,9	24,2	-1,1	-44,9	23,5	-14,1	-8,9	-15,7	-5,0	-16,4	-11,2	-3,7	-12,9	-1,5	-13,7
8	1,2	2,5	35,2	17,8	82,7	0,0	7,5	0,0	12,5	0,0	0,0	10,3	0,0	17,2	0,0
3	0,6	13,8	6,3	48,1	11,0	0,0	7,3	0,0	-12,1	0,0	0,0	10,1	0,0	16,7	0,0

Tabela 24: Razão entre os momentos, na base dos pilares, no eixo y para o solo 1

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	0,2	0,4	14,3	0,1	-0,7	1,3	2,4	1,2	3,4	1,2	0,2	0,2	11,7	0,0	0,6
8	0,0	3,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7	0,0	0,0	4,1	0,0	1,0	0,0
3	0,0	0,5	0,0	0,3	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7	0,0	0,0	0,7	0,0	0,3	0,0

Tabela 25: Momentos em kN.m no topo dos pilares no eixo y

Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	9,6	-7,5	-9,9	-8,0	-5,0	2,3	-2,1	3,3	-4,8	4,1	1,7	-4,6	2,6	-8,5	3,5
8	1,2	-8,1	26,4	-13,2	-34,1	0,0	-6,8	0,0	-11,3	0,0	0,0	-9,5	0,0	-15,8	0,0
3	0,6	-11,3	-16,6	-20,2	-5,4	0,0	-6,7	0,0	-11,1	0,0	0,0	-9,1	0,0	-15,2	0,0

Tabela 26: Razão entre os momentos, no topo dos pilares, no eixo y para o solo 1

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	0,2	0,3	0,3	0,6	0,8	1,3	0,5	1,3	0,6	1,2	0,2	0,6	-0,3	1,1	-0,7
8	0,0	0,8	0,0	0,9	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7	0,0	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0
3	0,0	0,6	0,0	0,5	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7	0,0	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0

Tabela 27: Momentos em kN.m na base dos pilares no eixo x

Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	-59,9	24,2	-1,1	-44,9	23,5	-28,2	-29,3	-14,8	-29,0	-4,8	-24,5	-26,0	-9,4	-26,2	1,6
8	1,2	2,5	35,2	17,8	82,7	0,0	0,0	23,9	0,0	39,8	0,0	0,0	25,2	0,0	42,0
3	0,6	13,8	6,3	48,1	11,0	-31,0	-31,0	-14,1	-29,9	-1,7	-24,2	-24,2	-5,4	-23,4	7,9

Tabela 28: Razão entre os momentos, na base dos pilares, no eixo x para o solo 1

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	0,5	1,2	13,4	0,6	0,2	1,2	1,1	1,6	1,1	3,0	0,4	1,1	8,5	0,6	0,1
8	0,0	0,0	0,7	0,0	0,5	0,0	0,0	0,9	0,0	0,9	0,0	0,0	0,7	0,0	0,5
3	56,3	2,2	2,2	0,6	0,2	1,3	1,3	2,6	1,3	-0,2	43,9	1,8	0,9	-0,5	0,7

Tabela 29: Momentos em kN.m no topo dos pilares no eixo x

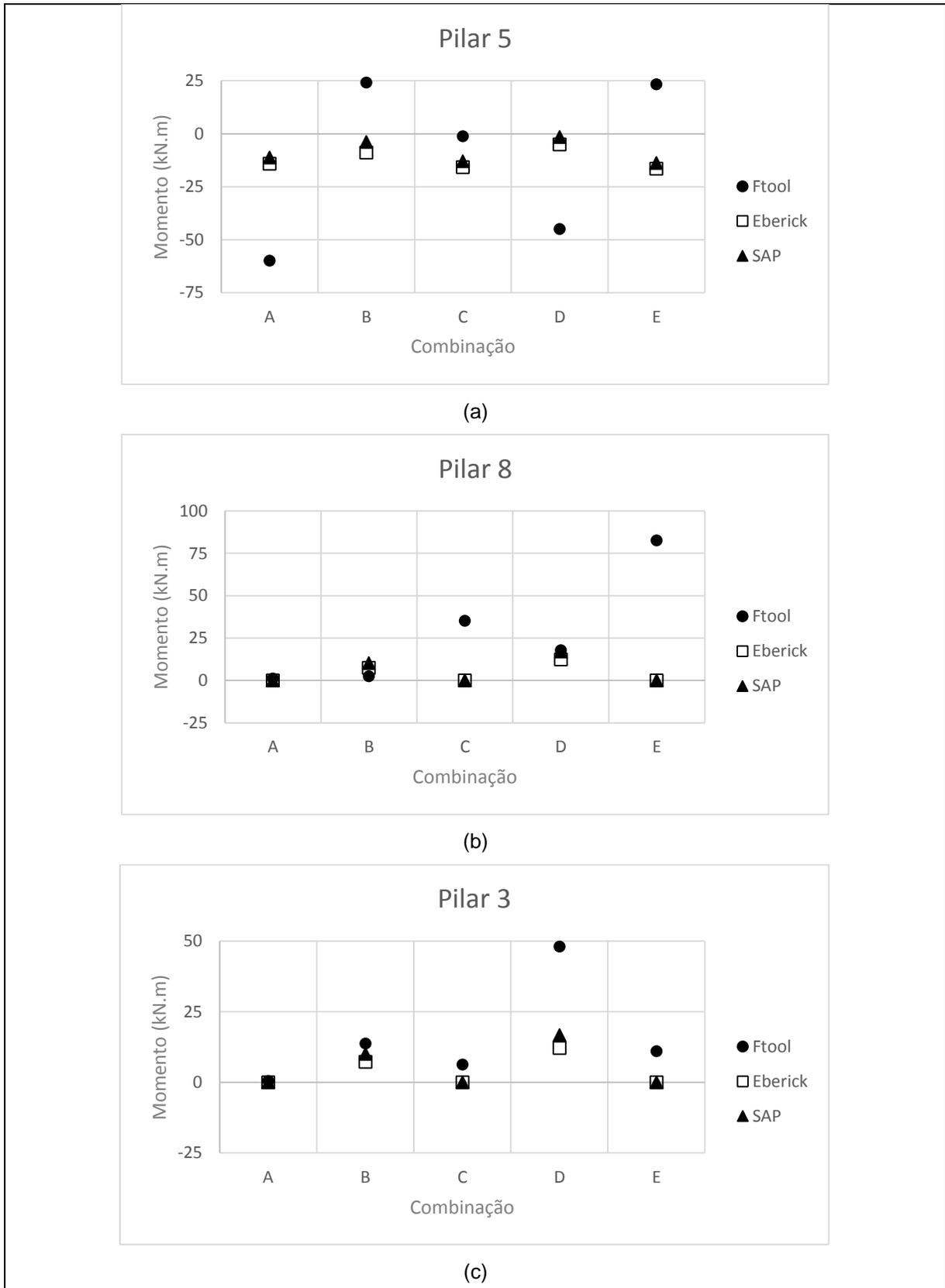
Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	9,6	-7,5	-9,9	-8,0	-5,0	5,8	6,4	-3,7	6,8	-10,1	4,5	5,1	-6,3	5,7	-13,3
8	1,2	-8,1	26,4	-13,2	-34,1	0,0	0,0	-19,0	0,0	-31,7	0,0	0,0	-21,0	0,0	-35,0
3	0,6	-11,3	-16,6	-20,2	-5,4	-4,4	-4,4	-7,0	-5,0	-14,0	2,6	2,6	-11,0	3,2	-19,4

Tabela 30: Razão entre os momentos, no topo dos pilares, no eixo x para o solo 1

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	0,6	0,9	0,4	0,9	2,0	1,3	1,3	0,6	1,2	0,8	0,5	0,7	0,6	0,7	2,7
8	0,0	0,0	0,7	0,0	0,9	0,0	0,0	0,9	0,0	0,9	0,0	0,0	0,8	0,0	1,0
3	7,4	0,4	0,4	0,2	2,6	1,7	1,7	0,6	1,5	0,7	4,3	0,2	0,7	-0,2	3,6

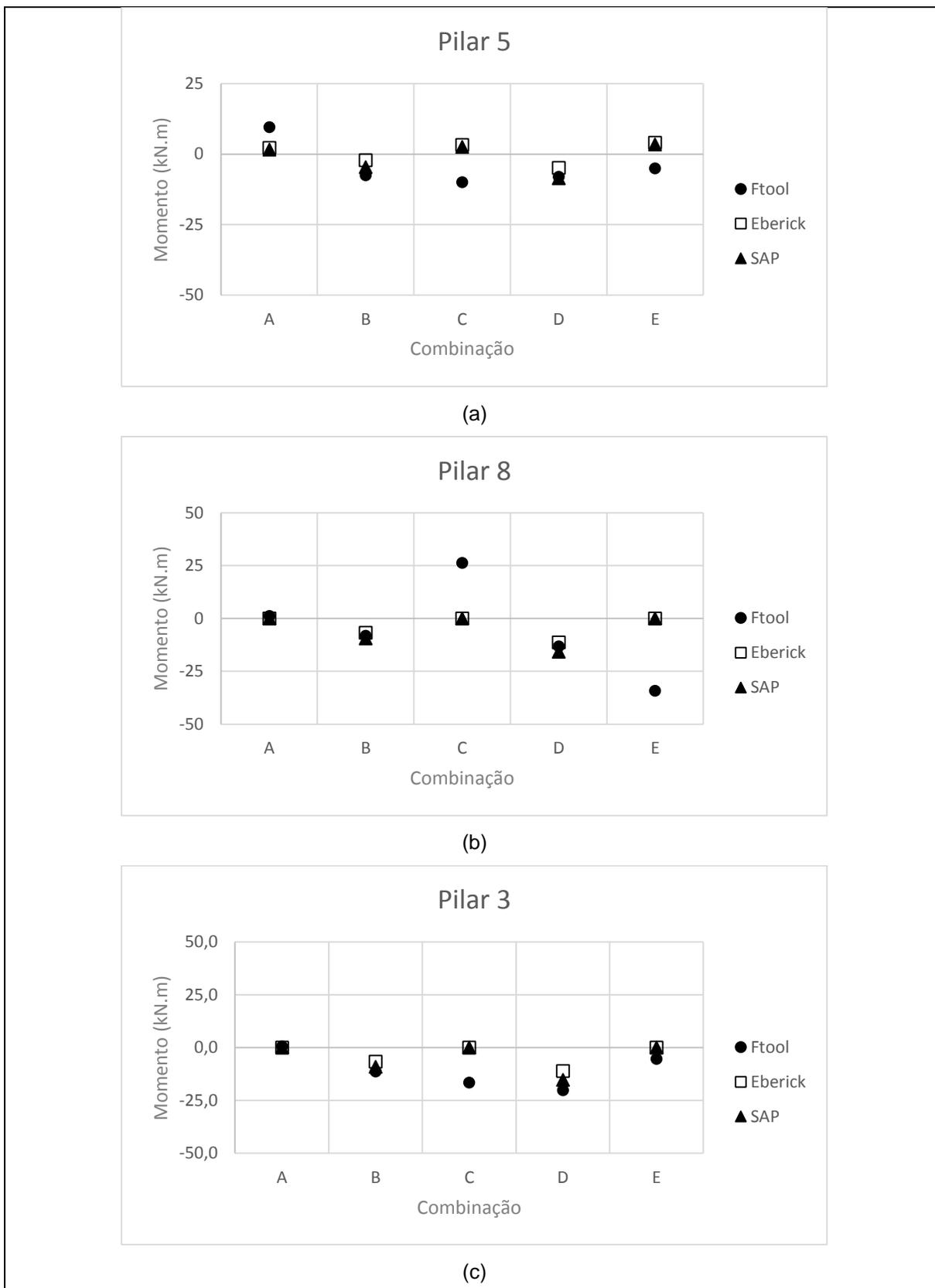
Nas Figura 38 e Figura 39 estão a plotagem para os momentos atuantes no eixo y, respectivamente para a base e topo dos pilares 5, 8 e 3. Os momentos atuantes no eixo x, para a base e topo dos mesmos pilares, estão apresentados, respectivamente, nas Figura 40 e Figura 41.

Figura 38: Momentos na base dos pilares no eixo y para o pilar (a)5, (b)8 e (c)3



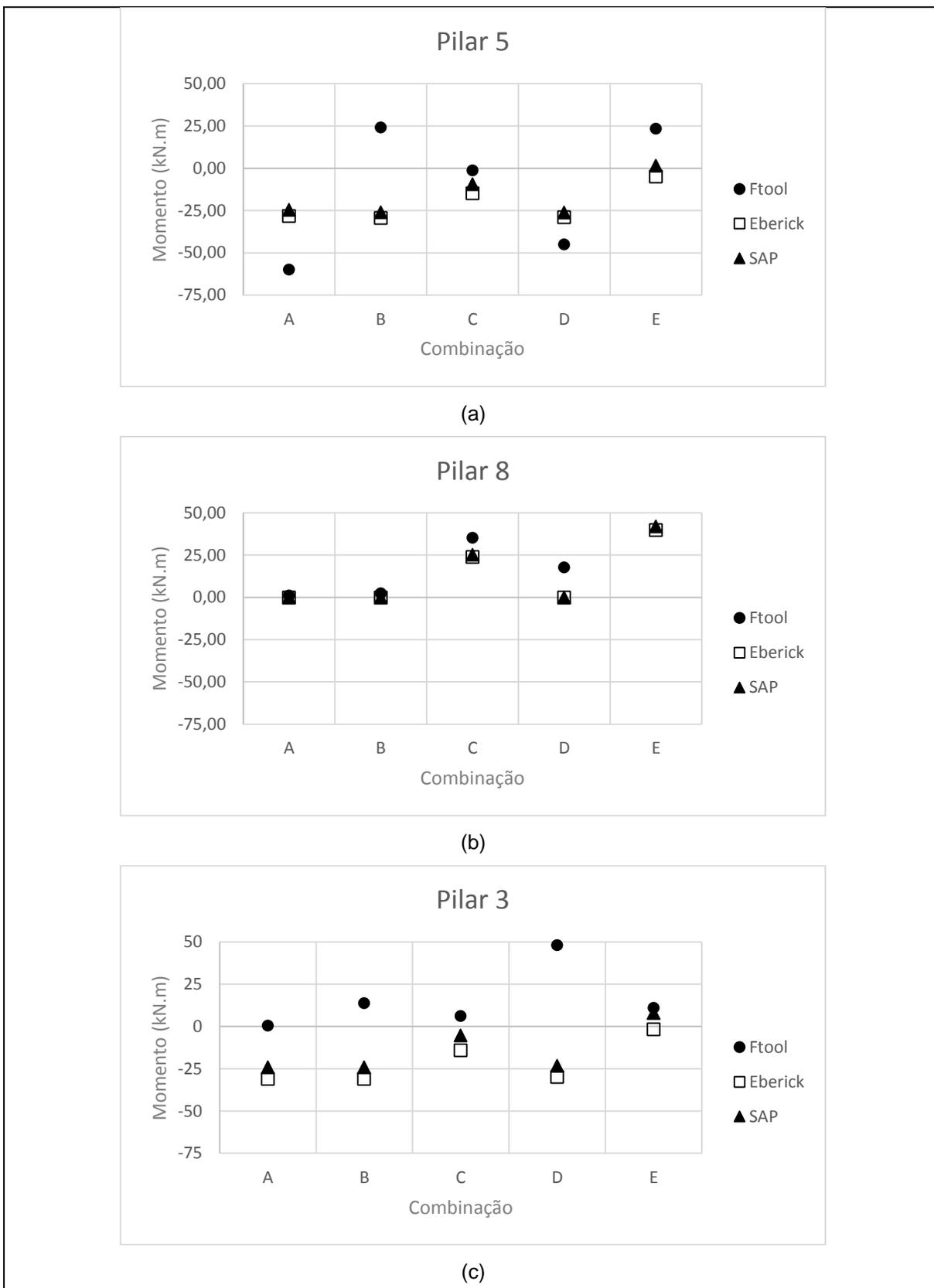
Fonte: Elaboração própria

Figura 39: Momentos no topo dos pilares no eixo y para o pilar (a)5, (b)8 e (c)3



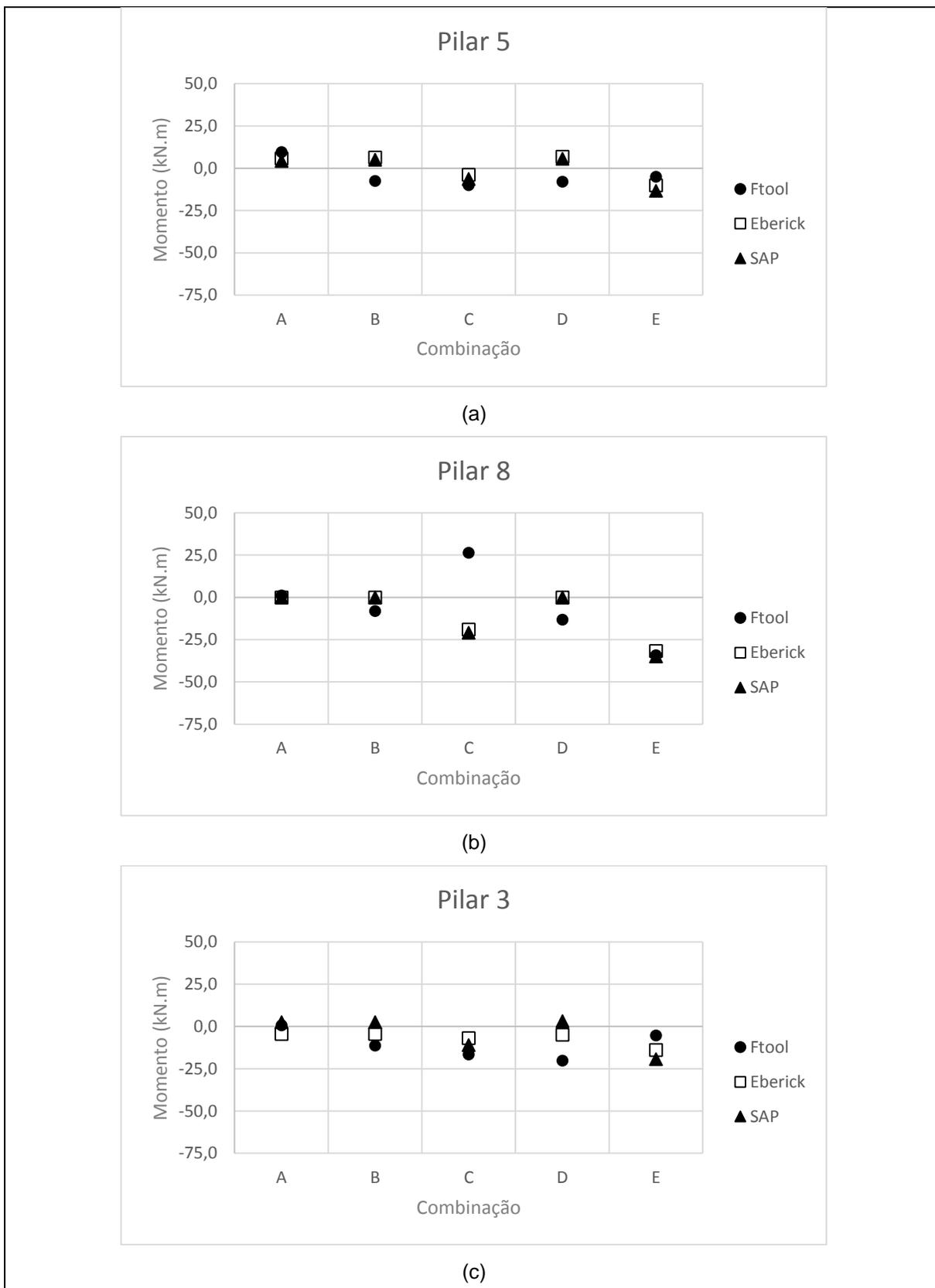
Fonte: Elaboração própria

Figura 40: Momentos na base dos pilares no eixo x para o pilar (a)5, (b)8 e (c)3



Fonte: Elaboração própria

Figura 41: Momentos no topo dos pilares no eixo x para o pilar (a)5, (b)8 e (c)3



Fonte: Elaboração própria

Considerando as aproximações dos momentos para todas as análises, tanto no eixo x, quanto no eixo y para as bases e topos dos pilares, pode ser constatada grande aproximação entre os modelos simulados nos softwares Eberick e SAP. Divergências notáveis, nos dados obtidos através do Ftool foram obtidas. As razões entre os momentos ilustra com melhor clareza esse cenário.

#### 4.3.2 Solo 2: areia fofa

Nas Tabela 31, Tabela 33, Tabela 35 e Tabela 37 estão dispostos os momentos para as bases e topos dos pilares nas direções y e x, considerando o solo 2. As Tabela 32, Tabela 34, Tabela 36 e Tabela 38 apresentam as razões estes momentos.

Tabela 31: Momentos em kN.m na base dos pilares no eixo y

Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	-68,7	-58,9	-4,4	-58,1	35,4	-17,2	-12,1	-19,1	-8,3	-20,0	-14,7	-7,4	-16,6	-2,2	-17,5
8	0,7	58,2	37,0	51,2	88,8	0,0	7,9	0,0	13,2	0,0	0,0	10,6	0,0	17,6	0,0
3	1,4	-12,6	1,3	10,7	21,1	0,0	-7,7	0,0	-12,8	0,0	0,0	10,3	0,0	17,1	0,0

Tabela 32: Razão entre os momentos, na base dos pilares, no eixo y para o solo 2

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	0,3	0,2	4,3	0,1	-0,6	1,2	1,6	1,2	3,7	1,1	0,2	0,1	3,8	0,0	0,5
8	0,0	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,0
3	0,0	0,6	0,0	1,2	0,0	0,0	0,7	0,0	-0,7	0,0	0,0	0,8	0,0	1,6	0,0

Tabela 33: Momentos em kN.m no topo dos pilares no eixo y

Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	13,2	-7,7	6,7	-13,1	12,5	4,8	-0,5	6,0	-2,2	6,9	4,7	-1,5	5,8	-5,4	6,7
8	0,5	-9,5	27,6	-15,9	-38,1	0,0	-7,1	0,0	-11,8	0,0	0,0	-9,7	0,0	-16,2	0,0
3	0,7	8,0	12,5	-21,6	-2,0	0,0	-7,0	0,0	-11,6	0,0	0,0	-9,3	0,0	-15,6	0,0

Tabela 34: Razão entre os momentos, no topo dos pilares, no eixo y para o solo 2

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	0,4	0,1	0,9	0,2	0,6	1,0	0,4	1,0	0,4	1,0	0,4	0,2	0,9	0,4	0,5
8	0,0	0,7	0,0	0,7	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0
3	0,0	-0,9	0,0	0,5	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7	0,0	0,0	-1,2	0,0	0,7	0,0

Tabela 35: Momentos em kN.m na base dos pilares no eixo x

Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	-68,7	-58,9	-4,4	-58,1	35,4	-30,7	-31,8	-17,1	-31,4	-6,9	-25,2	-26,3	-10,2	-26,8	-6,8
8	0,7	58,2	37,0	51,2	88,8	0,0	0,0	25,3	0,0	42,2	0,0	0,0	25,7	0,0	42,8
3	1,4	-12,6	1,3	10,7	21,1	-36,7	-36,7	-19,1	-35,5	-6,1	-27,7	-27,7	-8,7	-26,8	4,9

Tabela 36: Razão entre os momentos, na base dos pilares, no eixo x para o solo 2

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	0,4	0,5	3,9	0,5	-0,2	1,2	1,2	1,7	1,2	1,0	0,4	0,4	2,3	0,5	0,0
8	0,0	0,0	0,7	0,0	0,5	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,5
3	26,2	2,9	14,7	3,3	-0,3	1,3	1,3	2,2	1,3	-1,2	19,8	2,2	6,7	2,5	0,2

Tabela 37: Momentos em kN.m no topo dos pilares no eixo x

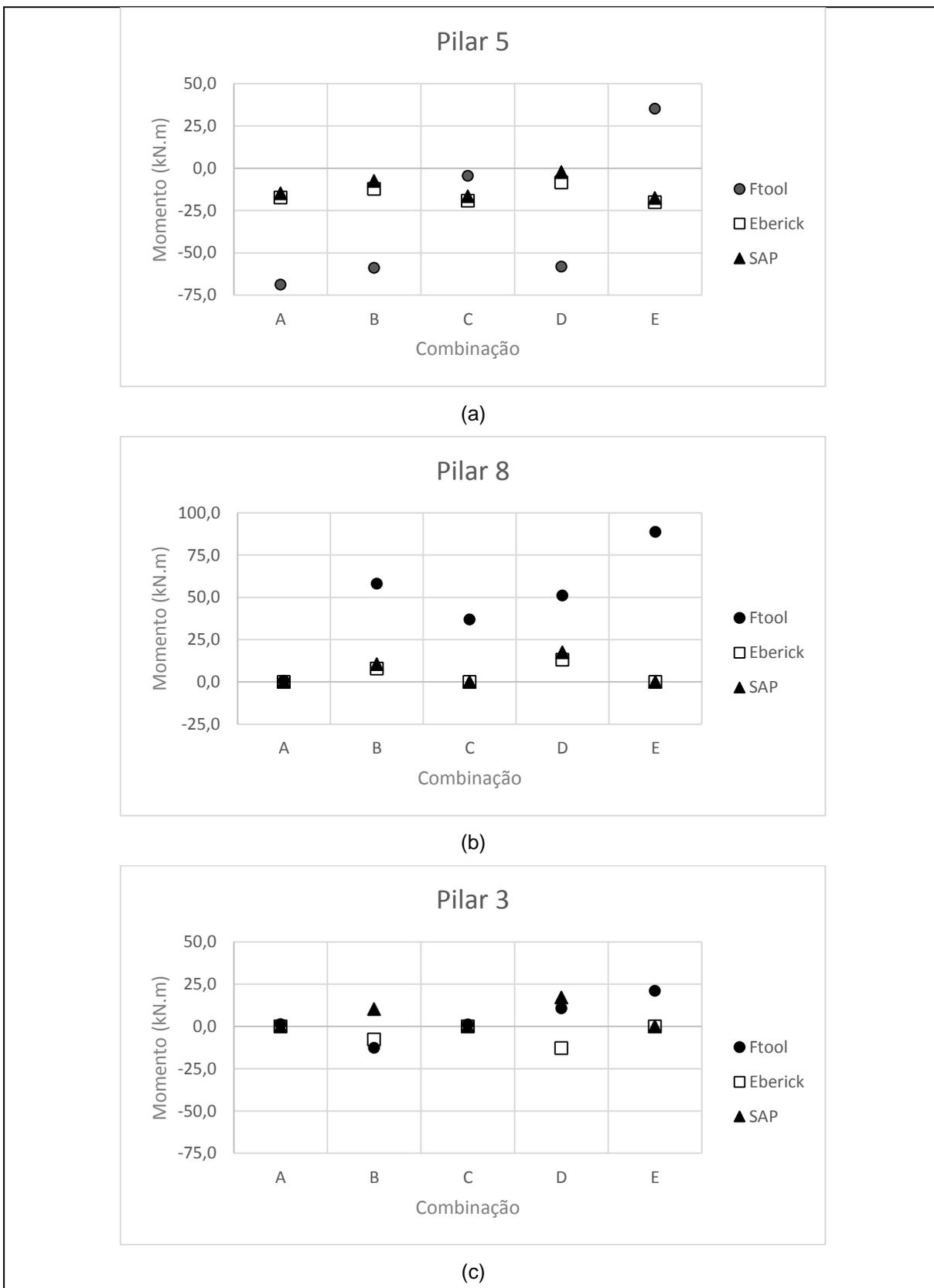
Pilar	Ftool					Eberick					SAP				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	13,2	-7,7	6,7	-13,1	12,5	7,4	8,0	-2,3	8,4	-8,8	5,1	5,8	-5,5	6,4	-12,4
8	0,5	-9,5	27,6	-15,9	-38,1	0,0	0,0	-20,1	0,0	-33,5	0,0	0,0	-21,3	0,0	-35,3
3	0,7	8,0	12,5	-21,6	-2,0	-7,8	-7,8	-4,1	-8,3	-11,6	4,9	4,9	-8,9	5,4	-17,5

Tabela 38: Razão entre os momentos, no topo dos pilares, no eixo x para o solo 2

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	0,6	1,0	0,3	0,6	0,7	1,4	1,4	0,4	1,3	0,7	0,4	0,8	0,8	0,5	1,0
8	0,0	0,0	0,7	0,0	0,9	0,0	0,0	0,9	0,0	0,9	0,0	0,0	0,8	0,0	0,9
3	11,2	1,0	0,3	0,4	5,9	1,6	1,6	0,5	1,5	0,7	6,9	0,6	0,7	0,3	8,9

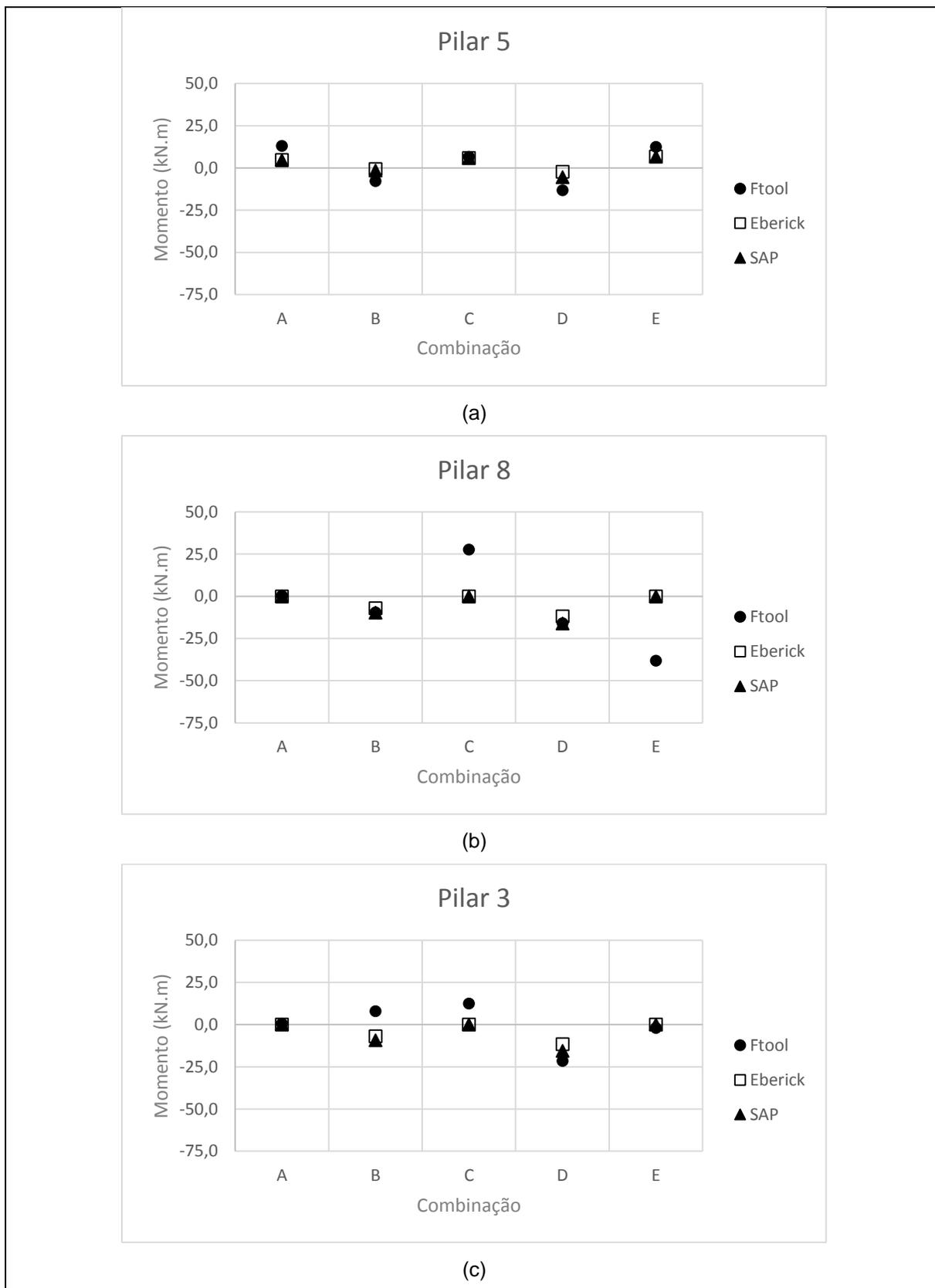
Os momentos para as bases e topos dos pilares 5, 8 e 3 nos eixo y, estão apresentados, respectivamente, nas Figura 42 e Figura 43. Em relação ao eixo x, para os mesmos pilares, a plotagem dos momentos ocorre nas Figura 44 e Figura 45.

Figura 42: Momentos na base dos pilares no eixo y para o pilar (a)5, (b)8 e (c)3



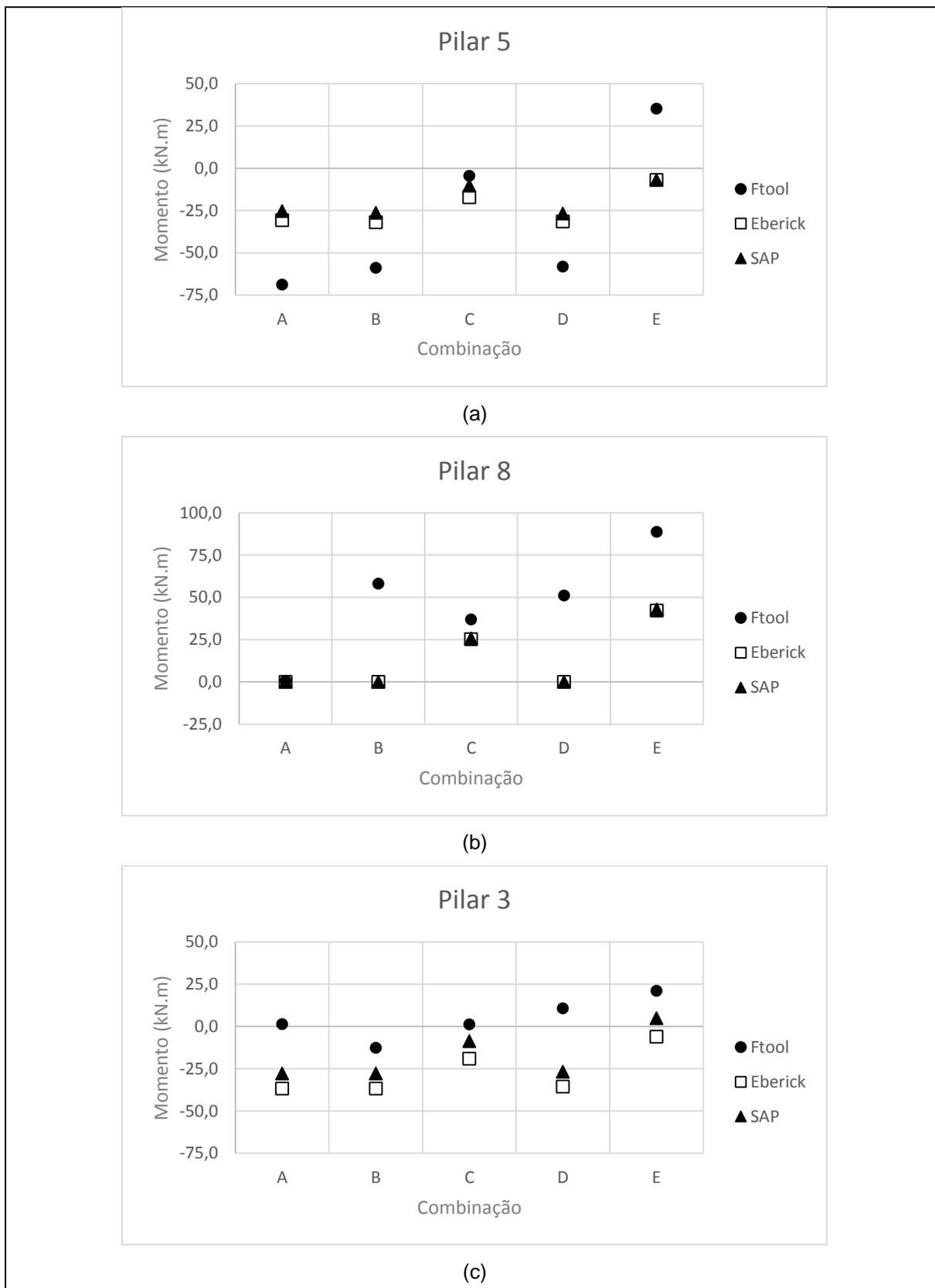
Fonte: Elaboração própria

Figura 43: Momentos no topo dos pilares no eixo y para o pilar (a)5, (b)8 e (c)3



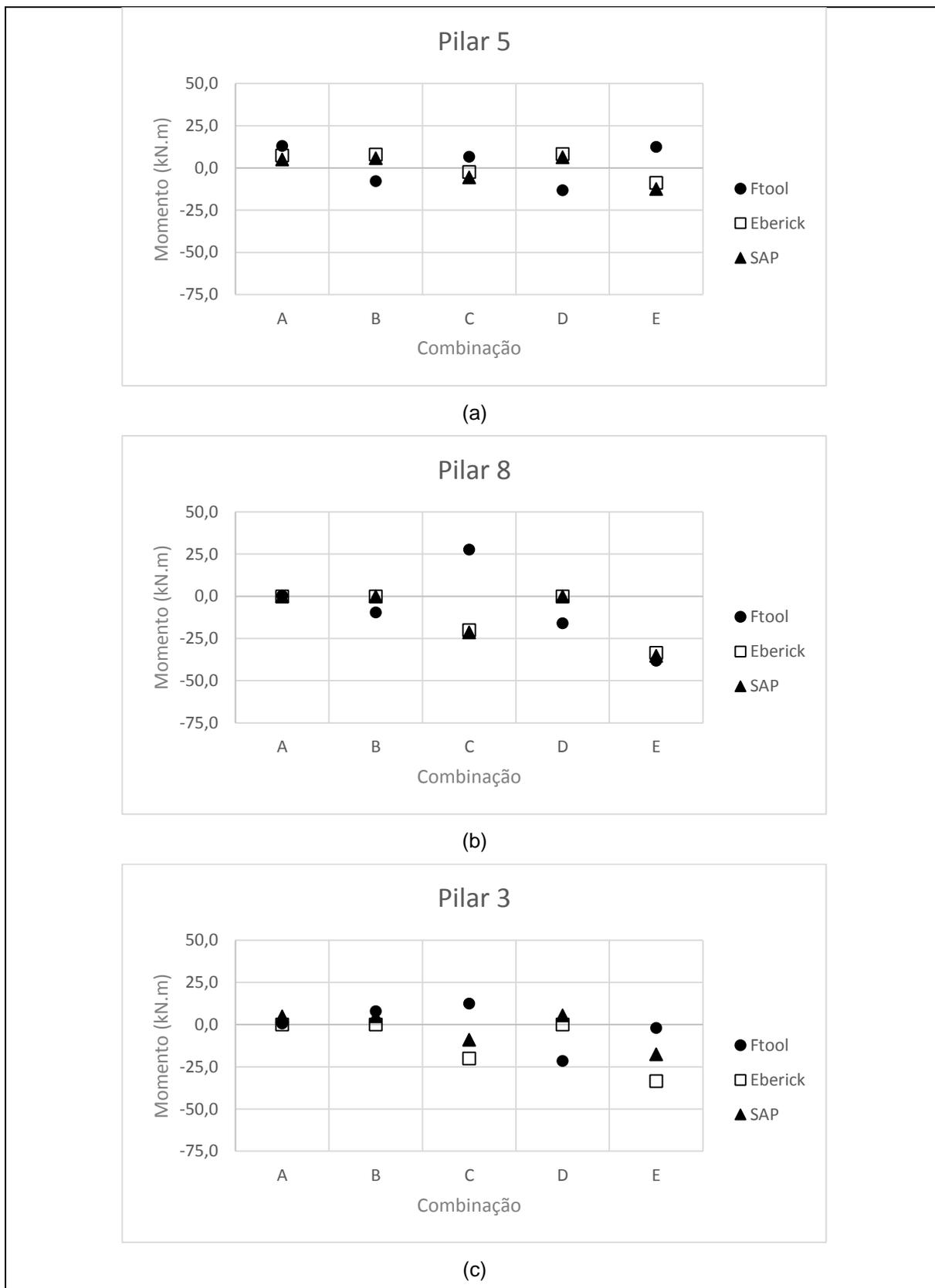
Fonte: Elaboração própria

Figura 44: Momentos na base dos pilares no eixo x para o pilar (a)5, (b)8 e (c)3



Fonte: Elaboração própria

Figura 45: Momentos no topo dos pilares no eixo x para o pilar (a)5, (b)8 e (c)3



Fonte: Elaboração própria

Como observado no solo 1, uma grande convergência entre os modelos simulados nos softwares Eberick e SAP pode ser observada. Tal situação não ocorre para as análises com o Ftool para o mesmo solo. Nesse último modelo, alguns valores aproximam-se das demais simulações, no entanto, divergência consideráveis podem ser observadas.

#### 4.3.3 Comparação entre os solos 1 e 2

As Tabela 39, Tabela 40, Tabela 41 e Tabela 42 apresentam a comparação entre os momentos atuantes nas bases e topos dos pilares 8, 5 e 3 para os eixos y e x.

Tabela 39: Razão entre os solos 1 e 2 para os momentos, na base dos pilares, no eixo y

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool						
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E		
5	1,1	-2,4	4,0	1,3	1,5	1,1	-2,4	4,0	1,3	1,5	1,1	-2,4	4,0	1,3	1,5	1,1	-2,4
8	0,6	23,3	1,1	2,9	1,1	0,6	23,3	1,1	2,9	1,1	0,6	23,3	1,1	2,9	1,1	0,6	23,3
3	2,5	-0,9	0,2	0,2	1,9	2,5	-0,9	0,2	0,2	1,9	2,5	-0,9	0,2	0,2	1,9	2,5	-0,9

Tabela 40: Razão entre os solos 1 e 2 para os momentos, no topo dos pilares, no eixo y

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	1,4	1,0	-0,7	1,6	-2,5	0,5	4,0	0,5	2,2	0,6	0,4	3,2	0,5	1,6	0,5
8	0,4	1,2	1,0	1,2	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,0	0,4	1,0	0,5
3	1,2	-0,7	-0,8	1,1	0,4	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	-0,7	1,0	2,9	1,0	1,0

Tabela 41: Razão entre os solos 1 e 2 para os momentos, na base dos pilares, no eixo x

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	1,1	-2,4	4,0	1,3	1,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	1,0	1,0	0,9	1,0	-0,2
8	0,6	23,3	1,1	2,9	1,1	0,0	0,0	0,9	0,0	0,9	-0,1	-0,3	1,0	-0,6	1,0
3	2,5	-0,9	0,2	0,2	1,9	0,8	0,8	0,7	0,8	0,3	0,9	0,9	0,6	0,9	1,6

Tabela 42: Razão entre os solos 1 e 2 para os momentos, no topo dos pilares, no eixo x

Pilar	Eberick/Ftool					Eberick/SAP					SAP/Ftool				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
5	1,4	1,0	-0,7	1,6	-2,5	0,8	0,8	1,6	0,8	1,2	0,9	0,9	1,2	0,9	1,1
8	0,4	1,2	1,0	1,2	1,1	0,0	0,0	0,9	0,0	0,9	0,2	0,1	1,0	-0,1	1,0
3	1,2	-0,7	-0,8	1,1	0,4	0,6	0,6	1,7	0,6	1,2	0,5	0,5	1,2	0,6	1,1

Aproximações relevantes podem ser observadas para os modelos Eberick e SAP ao longo dos tramos dos pilares, considerando bases e topos, para ambos eixos, onde o desvio padrão máximo nos resultados ficou em 1,07. Quanto ao Ftool, o valor divergente elevado oriundo do momento para o pilar 8, na combinação B, nos dois eixos de base, fez com que um elevado desvio padrão nessa análise fosse obtido. No entanto, quando considerado os topos dos pilares, ainda para o software Ftool, uma convergência acentuada pode ser notada.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

A interação solo estrutura, de abordagem indispensável para edificações de grande altura, foi analisada junto a uma edificação em concreto armado convencional cujo elemento de fundação escolhido foi um *radier* com espessura de 35 centímetros.

Foram comparados os deslocamentos nos nós do *radier* sob os pilares, momentos no *radier* sob dois pilares e momentos nos tramos de três pilares do primeiro pavimento.

Como esperado, quando analisados dois solos distintos, areias mediamente compacta e fofa, respectivamente, denominadas de solos 1 e 2, foram constatados deslocamentos de maior magnitude para o segundo material, visto o menor coeficiente de reação vertical apresentado pelo mesmo.

Especificamente em relação ao pilar 8, localizado no centro da edificação, observou-se deslocamentos menores aos demais pilares apesar das cargas nele incidente serem maiores. Constata-se então que a área de suporte solo para este pilar é maior em relação aos pilares localizados nas extremidades.

Nas considerações de vento nos a 0 e 90 graus, pode-se perceber que os deslocamentos do nó da grelha referente a pilar 5 foram os mais acentuados, ratificando o esperado.

Os deslocamentos obtidos para os programas Eberick e SAP foram próximos, enquanto que para o Ftool os deslocamentos foram menores para todos os casos testados.

Os momentos desenvolvidos na grelha foram de difícil mensuração e, apesar da proximidade nos valores entre as simulações no Eberick e SAP, a quantificação pode ter sofrido influência através da forma como ambos softwares apresentam os resultados, ora em kN.m/m, ora em kN.m, respectivamente.

Não houve regularidade na diferença entre os momentos na grelha obtidos pelo Ftool com relação aos outros dois softwares.

Para os momentos nos tramos dos pilares, constatou-se boa aproximação entre os valores do SAP e Eberick. Já os resultados para o Ftool não apresentaram aproximação com os outros dois e nem regularidade na diferença.

Diante do exposto, sem que haja uma adaptação maior no modelo de pórticos associados com interação solo estrutura no Ftool, sua utilização para este tipo de

simulação resulta contrária à segurança, pois não há regularidade na diferença entre os resultados apresentados por este e os outros dois softwares. Em alguns casos os esforços foram maiores, em outros menores, o que gera insegurança no uso da ferramenta.

Com relação à variação dos resultados em função do tipo de solo, a resposta não foi linear em função do aumento da rigidez do solo. Para um aumento do coeficiente de reação vertical de mais de quatro vezes, o aumento dos deslocamentos foi menor que três para todos os softwares. Com relação aos esforços, a diferença foi ainda menor.

## **5.2 Recomendações**

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a análise das interações solo estrutura da grelha com sua malha refinada, a alteração dos coeficientes de reação vertical e o estudo da adaptação do modelo de pórticos associados do Ftool de maneira a viabilizar sua utilização.

## REFERÊNCIAS

- [1] TUDALIT Leichter bauen – Zukunft formen. Revista, v. 9. Alemanha, 2013. Disponível em: < <http://tudalit.de/uploads/images/TUDALIT9web.pdf>> Acesso em: 17 jun. 2015.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010.
- [3] TQS. **Sistema de interação solo – estrutura**. Manual Teórico. 2006.
- [4] SOUZA, R. A.; REIS, J. H. C. **Interação Solo – Estrutura para edifícios sobre fundações rasas**. Universidade Estadual de Maringá. Maringá: 2008.
- [5] MILANI, A. S. **Análise de torres metálicas treplicasdas de linhas de transmissão considerando a interação solo-estrutura**. Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado. Santa Maria: 2012.
- [6] VELOSSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**. v. 1. São Paulo: Oficina de textos, 2010.
- [7] RIBEIRO, M. A. A. **Análise comparativa de métodos utilizados no cálculo da interação solo-radier**. Projeto de graduação. Rio de Janeiro, 2010.
- [8] VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: Critérios de Projeto, investigação do subsolo e fundações superficiais**. Vol.1, ed.2. São Paulo, 2011.
- [9] VELLOSO, D.A.; LOPES, F.R. **Fundações**. 2. ed. Edição, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004.
- [10] CARELLI, J. A. **Análise matricial de estruturas**. Apostila da disciplina Análise Matricial de Estruturas. Universidade do Oeste de Santa Catarina.
- [11] COMPUTERS AND STRUCTURES. **SAP2000® Basic Analysis Reference Manual: Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures**. Barkeley, Califórnia, 2008.
- [12] ALVES, A. F. **Elementos finitos: A base da tecnologia CAE**. ed.5. São Paulo, 2007.
- [13] PALIGA, C. M.; REAL, M. V. **Análise de uma fundação do tipo radier para equipamentos portuários**. Fundação Universidade de Rio Grande. Rio Grande: 2011.
- [14] ANTONIAZZI, J. P. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais**. Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado. Santa Maria: 2011.
- [15] CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.
- [16] GEOTECHNICAL ENGINEERING OFFICE. **Foundation Design and Construction**. Hong Kong: The Government Of The Hong Kong Special Administrative Region, 2006. 376 p.
- [17] PORTO, T.B. **Estudo da interação de paredes de alvenaria estrutural com a estrutura de fundação**. 2010. 243f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- [18] CHRISTAN, P. **Estudo da interação solo-estaca sujeito a carregamento horizontal em ambientes submersos**. Dissertação. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.
- [19] CRESPO, V. A. S. **Estudo da sensibilidade de edificações em relação ao solo**. Dissertação. Campo dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2004.

- [20] MORAES, M. C. **Estruturas de fundações**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1976.
- [21] ALEXANDRE JR, M. C. **Coeficiente de recalque horizontal e vertical do solo**. Eberick: Inserindo as fundações, 2012. Disponível em: <<http://faq.altoqi.com.br/content/174/1045/pt-br/coeficientes-de-recalque-horizontal-e-vertical-do-solo.html>> Acesso em: 05 jun. 2015.
- [22] MOHR, M. M. **Como dimensionar e detalhar um radier no programa?**. Eberick: Inserindo as fundações, 2012. Disponível em: <<http://faq.altoqi.com.br/content/261/1072/pt-br/dimensionamento-e-detalhamento-de-radier.html>> Acesso em: 08 jun. 2015.
- [23] CATÁLOGO: **GEOSONDA – Sondagens geotécnicas e geofísicas LTDA**. Santa Maria da Feira, Portugal, 2015.
- [24] HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. **Fundações teoria e prática**. Livro. 2 ed. São Paulo, 1998.
- [25] ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: Solo - Sondagens simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2001.
- [26] SOUSA, F. A. **Utilização de radier estaqueado em obras especiais e edifícios altos**. VII Congresso brasileiro de pontes e estruturas. Rio de Janeiro: 2014.
- [27] JOPPERT JR, I. **Fundações e contenções de edifícios**. São Paulo: Pini, 2007.
- [28] VELOSSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**. v. 2. São Paulo: Oficina de textos, 2010.
- [29] PAVAN, R. C.; COSTELLA, M. F.; GUARNIERI, G. **Interação solo estrutura para sistemas estruturais reticulados sobre fundações rasas**. Revista IBRACON de estruturas e materiais, v.7, n.2, 2014.
- [30] ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- [31] ALMEIDA, M. S. S.; MARQUES, M. E. S. **Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.
- [32] MOHR, M. M. **Como inserir um radier no Eberick**. Eberick: Inserindo as fundações, 2012. Disponível em: <<http://faq.altoqi.com.br/content/174/1068/pt-br/lan%C3%A7amento-de-radier.html>> Acesso em: 01 jul. 2015.
- [33] ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980: corrigida 2000.