

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LUIZ FELLIPPE DE SOUZA

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA EXCENTRICIDADE EM SAPATAS DE
DIVISA SOBRE OS PÓRTICOS ESTRUTURAIS**

FLORIANÓPOLIS, 2022.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL - DACC
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LUIZ FELLIPPE DE SOUZA

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA EXCENTRICIDADE EM SAPATAS DE
DIVISA SOBRE OS PÓRTICOS ESTRUTURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Santa Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador:
Prof. André Puel, doutor.

FLORIANÓPOLIS, 2022.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Souza, Luiz Fellippe de
Análise dos Efeitos da Excentricidade em Sapatas de Divisa Sobre os Pórticos Estruturais / Luiz Fellippe de Souza
orientação de André Puel. - Florianópolis, SC,
2022.
115 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.
Inclui Referências.

1. Sapata de divisa. 2. Excentricidade. 3. Eberick.
4. Análise estrutural. 5. Viga-alavanca. I. Puel, André.
II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Análise dos Efeitos da Excentricidade em Sapatas de Divisa Sobre os Pórticos Estruturais.

ANÁLISE DOS EFEITOS DA EXCÊNTRICIDADE EM SAPATAS DE DIVISA SOBRE OS PÓRTICOS ESTRUTURAIS

LUIZ FELLIPPE DE SOUZA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 21 de dezembro, 2022.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

ANDRE PUEL

Data: 17/02/2023 17:49:49-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

André Puel, Doutor

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia



Documento assinado digitalmente

MARCIA MARIA MACHADO STEIL

Data: 23/02/2023 10:20:27-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Marcia Maria Machado Steil, Mestra

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia

JULIANO MORESCO

SILVA:06894306982

Assinado de forma digital por

JULIANO MORESCO

SILVA:06894306982

Dados: 2023.02.23 15:18:09

-03'00'

Juliano Moresco Silva, Engenheiro Civil
Rei da Engenharia e Arquitetura

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente à minha esposa, Keitty Moraes Dias de Souza, que me apoiou, acreditou e, mais que tudo, me ajudou a passar pelos momentos mais difíceis. Cada gota de suor, lágrimas, bem como os frutos vindouros eu dedico a você, meu amor.

Aos meus pais, Marceo e Adelair, por cada sacrifício feito para que eu pudesse chegar a este momento.

Ao meu irmão Rodrigo, que desde sempre foi meu modelo de dedicação e empenho e por muitas vezes ter me orientado e me colocado no caminho que me trouxe até aqui.

Aos meus colegas de faculdade, em especial à Gabriela Torquato, ao João Victor Heinzen Salvador e ao Raphael do Amarante Gomes, pelos conhecimentos e bons momentos compartilhados. A jornada trilhada até aqui seria muito mais difícil sem vocês.

Aos meus amigos da vida, Manoela, Jean, Lucas, Aline e Iara. Mesmo que durante esse tempo de graduação, por muitas vezes não pude estar muito presente, vocês foram muito importantes no caminho até aqui.

Aos professores e servidores do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, em especial ao meu orientador, André Puel, e aos professores Fernando Toppan Rabello e Marcia Maria Machado Steil por todo o conhecimento partilhado por vocês me influenciaram em seguir a carreira que hoje trilho profissionalmente.

Às empresas que me possibilitaram aplicar e ampliar os conhecimentos obtidos durante a graduação, em especial à AltoQi e à Rei da Engenharia e Arquitetura. Meu êxito acadêmico passa pela transformação dos conhecimentos obtidos no exercício das funções que tive o privilégio de ocupar nessas instituições.

Em memória do meu amigo e irmão de outra família Rafael Medeiros da Silva.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.
(Leonardo da Vinci)

RESUMO

Na busca pela otimização dos processos envolvidos no desenvolvimento de um projeto estrutural e de fundações, é comum o emprego de softwares computacionais. Esses recursos permitem a elaboração de modelos muito ricos em informação e com uma velocidade que o desenvolvimento manual não permitiria. No entanto, é necessário conhecer os critérios e validar os resultados fornecidos pela ferramenta utilizada. No âmbito das fundações em divisa, o software AltoQi Eberick permite o lançamento de diferentes soluções para sua modelagem: os pilares de fundação, para os quais as sapatas são modeladas junto a pilares de arranque; e as fundações de geometria fixa, que desconsideram a existência de um pilar de arranque e consideram as sapatas conectadas diretamente às vigas do baldrame. Este trabalho busca identificar a aplicabilidade de diferentes critérios de modelagem para sapatas de divisa. Os modelos foram criados considerando os dois critérios no software e também foram criados modelos de validação no Ftool. A fim de realizar um comparativo com as soluções oferecidas pelo Eberick, criou-se modelos de sapata de divisa com viga-alavanca, de acordo com recomendações bibliográficas consagradas. Após o comparativo, foi possível identificar que o modelo de fundação sem pilar de arranque se aproxima consideravelmente do modelo com viga-alavanca e que as fundações com pilar de arranque tornam-se antieconômicas para cargas mais altas.

Palavras-chave: Sapata de divisa. Excentricidade. Eberick. Análise estrutural. Viga-alavanca.

ABSTRACT

For optimization purposes, in the making of a structural and foundations project, to use computer softwares. These resources allow the user to construct models that are richer in data, which is not achieved by manual calculation. However, it is necessary to acknowledge the results given by the software. Within the scope of foundations, the software AltoQi Eberick allows the modeling of multiple solutions for boundary foundations: the foundation column, for which the shallow foundations are modeled along with the starter pillar; and the presetted geometry foundation, which connects the shallow foundation directly to the grade beam. The models introduced in this paper were created considering both criteria and were also validated through models created on Ftool. In order to compare the solution given on Eberick, models of boundary shallow foundations with a lever beam, according to established bibliographic recommendations. Afterwards, it was feasible to identify that the shallow foundation without a starter pillar, made on Eberick, gave results very similar to those with a lever beam. The shallow foundations with a starter pillar become uneconomical when submitted to high loads.

Keywords: Boundary shallow foundation. Excentricity. Eberick. Structural analysis. Lever beam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Momentos no pórtico do AltoQi Eberick para pilares submetidos à mesma carga (a) pilar centrado na fundação	20
Figura 02 – Blocos de fundação	23
Figura 03 – Sapatas	23
Figura 04 – Sapatas de altura constante e sapatas de altura variável	24
Figura 05 – Forma das sapatas em planta	24
Figura 06 – Sapatas retangulares	24
Figura 07 – Sapatas isoladas	25
Figura 08 – Sapata associada retangular	26
Figura 09 – Sapata associada trapezoidal	26
Figura 10 – Sapata associada com pilar em divisa	27
Figura 11 – Sapata corrida sob carregamento linear contínuo	27
Figura 12 – Sapata corrida para pilares	28
Figura 13 – Sapata com viga-alavanca	28
Figura 14 – Sapata com viga-alavanca esconsa	29
Figura 15 – Sapata com viga-alavanca interligando dois pilares de divisa	29
Figura 16 – Sapata isolada para pilar pré moldado	30
Figura 17 – Dimensões típicas em sapatas	31
Figura 18 – Sapata isolada flexível e possível superfície de ruptura por punção	31
Figura 19 – Trajetória das tensões principais na sapata rígida	32
Figura 20 – Sapata rígida e o cone de punção	33
Figura 21 – Sapata sob carga centrada	33
Figura 22 – Sapata sob ações excêntricas	34
Figura 23 – Sapata sob ações excêntricas	35
Figura 24 – Núcleo central de inércia em sapatas retangulares	35

Figura 25 – Sapata com excentricidade dentro do núcleo central de inércia	36
Figura 26 – Sapata com excentricidade no limite do núcleo central de inércia	36
Figura 27 – Sapata com excentricidade superior ao núcleo central de inércia	37
Figura 28 – Sapata com excentricidade nas duas direções submetida somente a tensões de compressão na base	37
Figura 29 – Sapata com excentricidade nas duas direções submetida a tensões de compressão e tração na base	38
Figura 30 – Ponto de aplicação fora do núcleo central de inércia	41
Figura 31 – Ábaco de Montoya	43
Figura 32 – Forças atuantes na sapata	44
Figura 33 – Elementos lineares	46
Figura 34 – Elementos bidimensionais	47
Figura 35 – Elementos tridimensionais	48
Figura 36 – Pórtico plano	49
Figura 37 – Planta de forma dos baldrame sem a representação da fundação	54
Figura 38 – Planta de forma tipo	54
Figura 39 – Configurações de ações e combinações no AltoQi Eberick	58
Figura 40 – Configurações de materiais e durabilidade no AltoQi Eberick	59
Figura 41 – Configurações da classe de concreto no AltoQi Eberick	59
Figura 42 – Configurações de dimensionamento das sapatas no AltoQi Eberick	60
Figura 43 – Configurações de análise no AltoQi Eberick	61
Figura 44 – Opções de processamento no AltoQi Eberick	62
Figura 45 – Diagrama do corpo livre considerando-se a carga centrada na fundação (Ftool)	63
Figura 46 – Momentos fletores no pórtico considerando-se a carga centrada na fundação (Ftool)	63
Figura 47 – Diagrama do corpo livre considerando-se a excentricidade em uma das fundações (Ftool)	64
Figura 48 – Momentos fletores no pórtico considerando-se a excentricidade em uma das fundações (Ftool)	64

Figura 49 – Vista da estrutura do pórtico dos modelos de 1 pavimento	66
Figura 50 – Vista da supraestrutura do pórtico do modelo de 4 pavimentos	66
Figura 51 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 1	67
Figura 52 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 2	68
Figura 53 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 3	69
Figura 54 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 4	70
Figura 55 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 5	71
Figura 56 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 6	72
Figura 57 – Diagrama de momento fletor e de esforços cortantes em viga-alavanca	73
Figura 58 – Diagrama de corpo livre da viga alavanca	75
Figura 59 – Diagrama de corpo livre do Modelo A	76
Figura 60 – Diagrama de corpo livre do Modelo B	77
Figura 61 – Solicitações apresentadas no relatório de cálculo das sapatas do Modelo A	78
Figura 62 – Momentos atuantes na sapata S1, do Modelo 3	83
Figura 63 – Pórtico unifilar do Modelo 5 no AltoQi Eberick	85
Figura 64 – Entrada de dados para o lançamento de fundações sem pilar de arranque no AltoQi Eberick	86
Figura 65 – Mensagem de erro no dimensionamento de sapata no AltoQi Eberick	87
Figura 66 – Solicitações apresentadas no relatório de cálculo das sapatas do Modelo A	88
Figura 67 – Pressões na base da Sapata S1 do Modelo 1	89
Figura 68 – Verificações de tombamento da Sapata S1 do Modelo 1	90
Figura 69 – Verificação de deslizamento da Sapata S1 do Modelo 1	91
Figura 70 – Momentos atuantes na Sapata S1 do Modelo 1	91
Figura 71 – Definição dos adimensionais através do Ábaco de Montoya	92
Figura 72 – Cargas atuantes na Sapata S1 do Modelo 3	93

Figura 73 – Aplicação do momento devido à excentricidade no pórtico do AltoQi Eberick	93
Figura 74 – Verificação de estabilidade ao deslizamento da Sapata 01 no AltoQi Eberick	94
Figura 75 – Esforços atuantes na sapata S1 do Modelo 5 do AltoQi Eberick	95
Figura 76 – Verificação de pressões na base da sapata S1 do Modelo 5 do AltoQi Eberick	96
Figura 77 – Verificação de estabilidade ao tombamento da sapata S1 do Modelo 5 do AltoQi Eberick	97
Figura 78 – Esquema do exercício proposto por Alonso	98
Figura 79– Diagrama de corpo livre da viga-alavanca	99
Figura 80 – Seções de referência na viga-alavanca	100
Figura 81 – Diagramas de momento fletor e esforço cortante do exemplo de Alonso	101
Figura 82 – Seções de referência na viga-alavanca	102
Figura 83– Diagrama de momento fletor no pórtico e esforços axiais nas vigas para o Modelo 2 e Modelo 4	103
Figura 84 – Plantas de forma do pavimento baldrame dos modelos elaborados	104
Figura 85 - Volume de concreto para a construção das sapatas de divisa	106
Figura 86 - Volume de concreto para a construção do pavimento baldrame	107
Figura 87 - Diagrama de momento fletor do pavimento baldrame para o Modelo 5 e Modelo A	108
Figura 88 - Diagrama de momento fletor do pavimento baldrame para o Modelo 6 e Modelo B	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Esforços de tração críticos nas vigas de baldrame	103
Tabela 02 - Dimensões das sapatas dos modelos elaborados	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DACC	Departamento Acadêmico de Construção Civil
IFSC	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	13
1.2 Definição do Problema	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo geral	14
1.3.2 Objetivos Específicos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Conceito de fundações	16
2.2 Sapatas	16
2.2.1 Classificação das sapatas quanto à posição	19
2.2.1.1 Sapata isolada	19
2.2.1.2 Sapata associada	19
2.2.1.3 Sapata corrida	21
2.2.1.4 Sapata com viga-alavanca	22
2.2.1.5 Sapata para pilar pré moldado	24
2.2.2 Classificação das sapatas quanto à rigidez	24
2.2.2.1 Sapata flexível	25
2.2.2.2 Sapata rígida	26
2.2.3 Classificação das sapatas quanto à solicitação	27
2.2.3.1 Sapata sob carga centrada	27
2.2.3.1 Sapata sob carga excêntrica	27
2.2.4 Distribuição de tensões da sapata no solo	32
2.2.5 Verificações de estabilidade da sapata	37
2.2.5.1 Deslizamento	37
2.2.5.2 Tombamento	38
2.3 Conceitos de Análise Estrutural	39
2.3.1 Classificação geométrica dos elementos estruturais	40
2.3.1.2 Elementos lineares	40
2.3.1.2 Elementos bidimensionais	41
2.3.1.3 Elementos tridimensionais	41
2.3.2 Pórticos planos	42
2.3.3 Análise estrutural pelo método dos deslocamentos	43
2.4 AltoQi Eberick	45
3 METODOLOGIA	47
3.1 Métodos aplicados	47
3.1.1 Características dos materiais	49
3.1.2 Pré-dimensionamento dos elementos estruturais	49
3.1.2.1 Pré-dimensionamento das vigas	50

3.1.2.2 Pré-dimensionamento dos pilares	50
3.1.3 Configuração dos parâmetros de projeto no AltoQi Eberick	51
3.1.3.1 Ações e combinações	51
3.1.3.2 Materiais e durabilidade	52
3.1.3.2 Configuração das características do solo	53
3.1.3.2 Configuração dos parâmetros de análise	54
3.1.4 Modelagem e processamento do projeto no AltoQi Eberick	55
3.1.5 Modelagem e processamento no Ftool	56
3.1.6 Análise dos resultados	59
3.2 Descrição dos modelos	59
3.2.1 Modelo 1	61
3.2.2 Modelo 2	61
3.2.3 Modelo 3	63
3.2.4 Modelo 4	63
3.2.5 Modelo 5	65
3.2.6 Modelo 6	65
3.2.7 Modelo A	67
3.2.8 Modelo B	70
3.3 Rotinas de cálculo	72
3.3.1 Excentricidade mínima em sapatas centradas no AltoQi Eberick	72
3.3.2 Definição das dimensões de sapatas centradas no AltoQi Eberick	74
3.3.3 Análise e dimensionamento das sapatas de divisa com pilar de arranque	77
3.3.4 Análise e dimensionamento das sapatas de divisa sem pilar de arranque	78
4 RESULTADOS	82
4.1. Validação dos métodos de cálculo	82
4.1.1 Sapata centrada - AltoQi Eberick	82
4.1.2 Sapata de divisa com pilar de arranque - AltoQi Eberick	85
4.1.3 Sapata de divisa sem pilar de arranque - AltoQi Eberick	88
4.1.4 Sapata de divisa com viga-alavanca - Ftool	91
4.2. Efeitos da aplicação dos critérios de modelagem das fundações em divisa	96
4.2.1 Comportamento global do pórtico	96
4.2.2 Comparativo dos elementos de fundação dos modelos	99
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
5.1 Limitação do tema e sugestões para trabalhos futuros	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1 INTRODUÇÃO

A análise estrutural consiste em analisar a resposta da estrutura diante das ações que lhe forem impostas (CAMPOS, 2015). Uma de suas partes fundamentais é a idealização do comportamento da estrutura real como um modelo estrutural, para o qual adota-se uma série de hipóteses simplificadoras. A esta tarefa se dá o nome de modelagem estrutural (BENINCÁ, 2016). Esta modelagem, requer que o projetista descreva e analise todos os elementos da estrutura até as fundações.

O estudo das fundações envolve duas áreas distintas de estudo dentro da engenharia (estruturas e geotecnia) e tem impacto direto sobre a economia e segurança (ACCORSI, 2017). Como princípio básico, as fundações devem ser dimensionadas de modo a transmitir com segurança as cargas oriundas da edificação para o solo.

Nos dias atuais, os projetistas possuem acesso a uma gama muito grande de softwares, que facilitam os processos que envolvem os projetos estruturais e de fundações. Estes softwares permitem análises mais realistas do comportamento estrutural, e o subsequente detalhamento e desenho das armaduras (KIMURA, 2007). No entanto, de acordo com Giacomassi (2021), muitos projetistas afirmam que os programas computacionais superdimensionam as estruturas, gerando gasto excessivo em material. Nesse cenário, é importante ressaltar que, apesar da produtividade imprimida pelos softwares, cabe ao projetista a responsabilidade técnica. Assim, se faz essencial a validação dos dados fornecidos por softwares para que não haja a transferência do conhecimento técnico do projetista para o software e aceitação cega de qualquer desses resultados.

O presente trabalho elabora modelos de pórticos planos com fundações em divisa no AltoQi Eberick considerando tanto fundações com pilar de arranque quanto fundações sem pilar de arranque. Também serão apresentados modelos elaborados no Ftool baseados nas sapatas de divisa com viga-alavanca, conforme apresentado na obra de Urbano Rodriguez Alonso (2001). Os modelos terão suas rotinas de cálculo validadas para a aferição dos resultados, que servirão como base para a comparação do comportamento das sapatas em divisa, buscando analisar

parâmetros que permitam identificar quais são as aplicações mais adequadas para cada critério de modelagem.

1.1 Justificativa

De acordo com Kimura (2007), a análise de uma estrutura de concreto armado é uma etapa muito importante do processo da elaboração de um projeto estrutural, uma vez que de nada adianta dimensionar as armaduras de uma maneira extremamente refinada, se os esforços calculados não traduzirem a realidade que a estrutura estará sujeita. Dessa forma, para qualquer profissional que utilize uma ferramenta computacional para o desenvolvimento de projetos de engenharia, é essencial conhecer detalhadamente os critérios utilizados pela ferramenta adotada pelo projetista.

Vários são os casos de edificações que apresentaram algum tipo de deformidade em decorrência de alterações não previstas no comportamento mecânico idealizado na análise estrutural (COLARES, 2006). Para a definir-se uma solução estrutural adequada e otimizada para as fundações, é necessária a realização de um estudo criterioso quanto ao mecanismo de transferência de cargas entre o sistema estrutural e as fundações (IWAMOTO, 2000).

A consideração das cargas excêntricas para fundações em divisa possui vasta gama de referencial bibliográfico somente para modelos de sapatas de divisa com viga-alavanca. No entanto, os modelos numéricos amplamente empregados pelos softwares comerciais, ainda não são muito abordados em trabalhos e publicações acadêmicas. Dessa forma, este trabalho busca contribuir na compreensão da forma como a condição de divisa para as fundações impacta na análise estrutural e comparar os dados obtidos com os resultados do software Eberick e com as soluções recomendadas por autores estudiosos do tema.

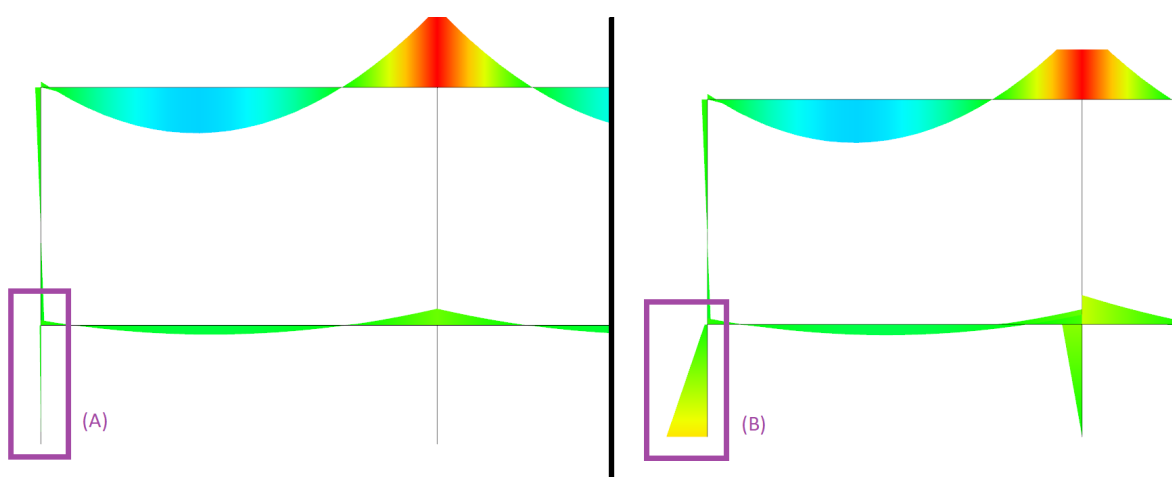
1.2 Definição do Problema

No âmbito da solução estrutural para sapatas posicionadas na divisa, autores renomados como Velloso e Lopes (2010), recomendam a existência de uma viga-alavanca. Esse elemento deve absorver os esforços adicionais oriundos da

excentricidade, possibilitando que a sapata trabalhe de maneira centrada. No entanto, para situações onde se faz necessária a existência de um pilar de arranque entre a fundação e o baldrame, esses esforços tendem a ser transmitidos para o pórtico da supraestrutura.

Na modelagem de sapatas de divisa no AltoQi Eberick, os esforços adicionais gerados pela excentricidade são aplicados no pórtico da estrutura (figura 01). Dessa forma, se faz importante analisar se esse efeito tem algum impacto na análise da estrutura de forma global e integrada à fundação.

Figura 01 – Momentos no pórtico do AltoQi Eberick para pilares submetidos à mesma carga (a) pilar centrado na fundação; (b) pilar na divisa



Fonte: O Autor (2022).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Realizar uma análise dos dos efeitos na distribuição de esforços oriundos da interação entre supraestrutura e fundações em casos de excentricidade devido à existência de pilares posicionados na divisa do terreno.

1.3.2 Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo principal do trabalho, deverão ser atingidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar quais os critérios do software AltoQi Eberick para o cálculo de fundações com pilares de divisa;
- b) Verificar se o comportamento das estruturas com pilares excêntricos às fundações modeladas no software AltoQi Eberick diverge dos resultados obtidos através de outros métodos constantes na literatura;
- c) Elaborar modelos no Ftool, como uma ferramenta para comparação e validação dos resultados obtidos através do Eberick;
- d) Apresentar conceitos importantes para a análise estrutural de edifícios com sapatas excêntricas através de publicações, normas e códigos existentes;
- e) Eleger a metodologia de análise mais adequada para fundações com pilares excêntricos observando-se os parâmetros econômicos e de segurança, para diferentes casos de carregamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceito de fundações

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR6122-2019 classifica as fundações em dois grupos: fundações profundas e superficiais, classificadas de acordo a forma dos elementos e, conseqüentemente, com o modo que ocorre a interação entre a estrutura e o solo. No documento, uma fundação profunda é caracterizada como:

elemento de fundação que transmite a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, sendo sua ponta ou base apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta e no mínimo 3,0 m; quando não for atingido o limite de oito vezes, a denominação é justificada. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas e os tubulões (ABNT, 2019, pg.5).

Já as fundações superficiais são descritas pela norma como:

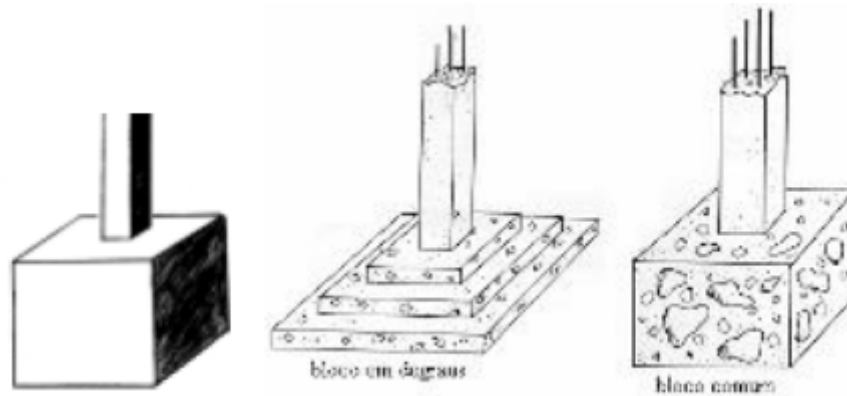
elemento de fundação cuja base está assentada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação, recebendo aí as tensões distribuídas que equilibram a carga aplicada; para esta definição adota-se a menor profundidade, caso esta não seja constante em todo o perímetro da fundação (ABNT, 2019, pg.5).

De acordo com o conceito definido pela instrução normativa, é possível inferir que as fundações rasas apoiam-se a uma pequena profundidade em relação ao solo que a circunda. Dessa forma, o conceito não aplica-se diretamente à cota de assentamento do elemento. Por exemplo, uma fundação direta para uma edificação que possui dois subsolos será considerada superficial mesmo se apoiando a 7m do nível do terreno da rua (TEIXEIRA; GODOY, 2019).

2.2 Sapatas

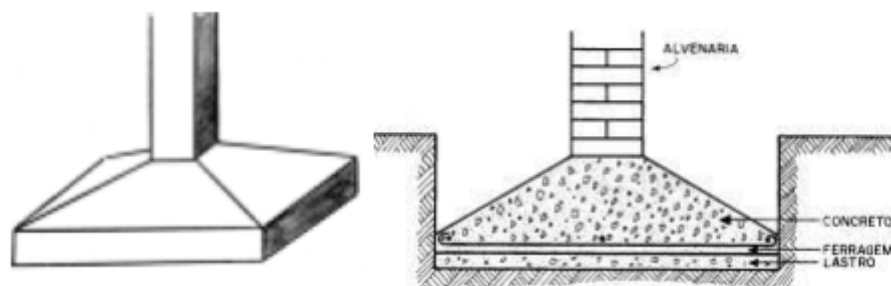
As sapatas (figura 03) são elementos de fundação superficial construídas em concreto armado e dimensionadas de modo que as tensões de tração atuantes sejam resistidas através de armaduras dispostas para esse fim (ABNT, 2019). Em termos executivos, ao comparar-se a sapata a um elemento mais simples como o bloco (figura 02), onde não há necessidade de armadura, os custos são mais elevados, devido à necessidade de reforço em aço e de mão de obra mais habilidosa (SOUSA et. al, 2018, p225).

Figura 02 – Blocos de fundação



Fonte: Sousa apud Melhado et al (2018).

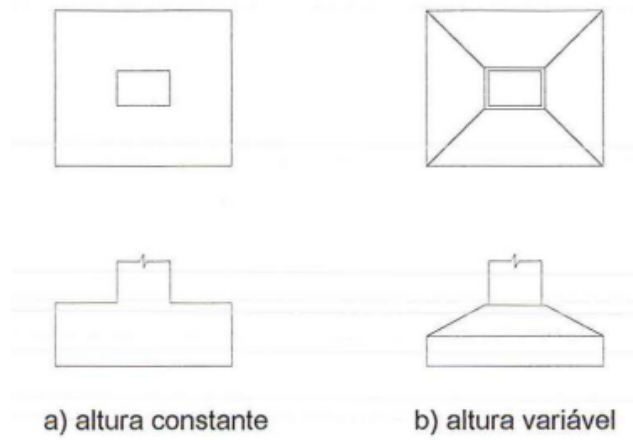
Figura 03 – Sapatas



Fonte: Sousa apud Melhado et al (2018).

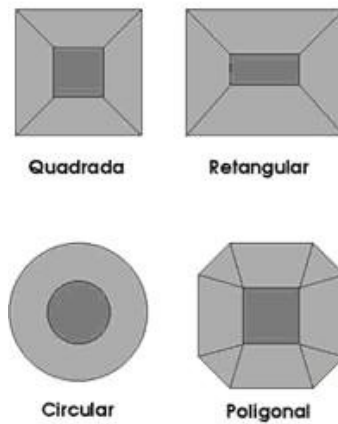
Esses elementos de fundação podem ser construídos com altura constante ou com altura variável (figura 04) (SILVA, 1998) . As sapatas podem assumir praticamente qualquer forma em planta (figura 05). No entanto, é mais usual utilizar-se as formas quadradas, quando as dimensões são iguais nas duas direções, retangulares, quando o valor da maior dimensão é até 5 vezes o da menor (figura 06), ou corridas, quando a maior dimensão supera o quántuplo da menor (SOUSA et. al., 2018).

Figura 04 – Sapatas de altura constante (a) e sapatas de altura variável (b)



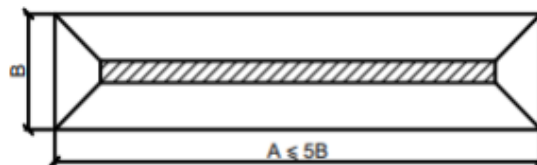
Fonte: Adaptado de Schneider (2018).

Figura 05 – Forma das sapatas em planta



Fonte: Adaptado de Schneider (2018).

Figura 06 – Sapatas retangulares



Fonte: Sousa apud Melhado et al (2018).

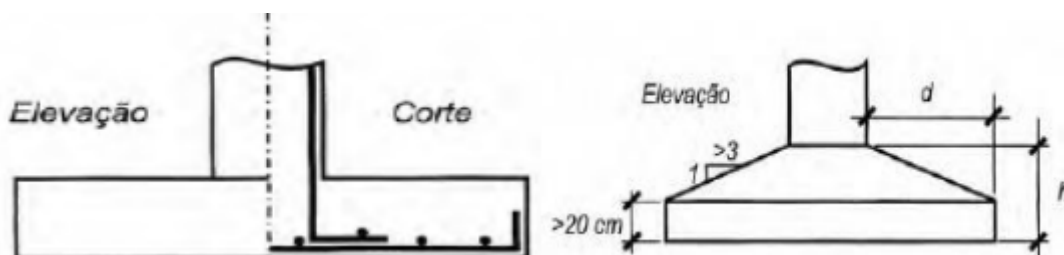
As sapatas podem ainda ser classificadas, além de através da sua geometria, também quanto ao modo de aplicação da carga. Abaixo, serão apresentadas as diferentes tipologias aplicadas às sapatas quanto à posição, quanto à rigidez e quanto à solicitação.

2.2.1 Classificação das sapatas quanto à posição

2.2.1.1 Sapata isolada

As sapatas isoladas transmitem ao solo as cargas recebidas de um único pilar (figura 07) (SILVA, 1998). Atualmente, são os elementos de fundação mais utilizados em obras convencionais e recomenda-se sua utilização em locais que apresentem solos de média a alta capacidade de carga (FERREIRA apud CARVALHO, 2017).

Figura 07 – Sapatas isoladas



Fonte: Ferreira apud Carvalho (2017).

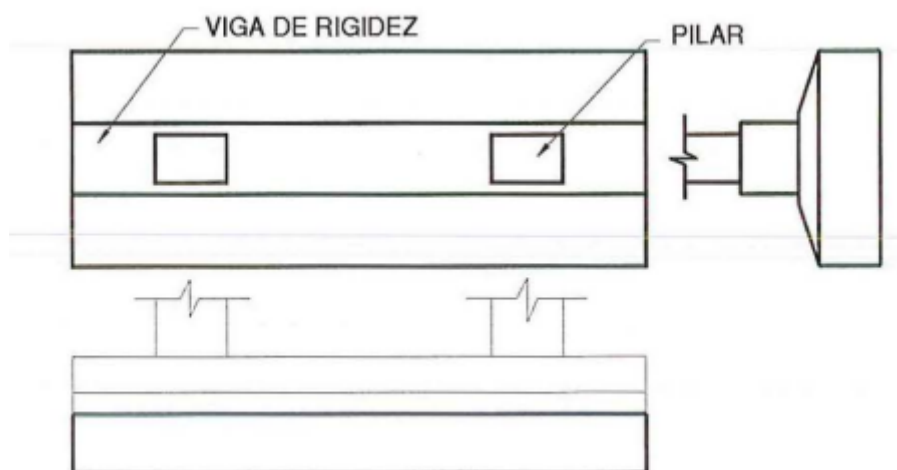
2.2.1.2 Sapata associada

As sapatas associadas recebem cargas de dois ou mais pilares, alinhados ou não, desde que a carga transmitida não represente 70% ou mais das cargas da estrutura (ABNT, 2019). São adotadas usualmente quando a distância entre pilares é pequena, a fim de evitar sobreposição e oferecer uma opção mais econômica (SILVA, 1998).

Usualmente, quando as cargas transmitidas pelos pilares associados a uma mesma fundação é similar, adota-se a geometria retangular para sua construção em planta (figura 08). No entanto, quando há uma brusca variação de

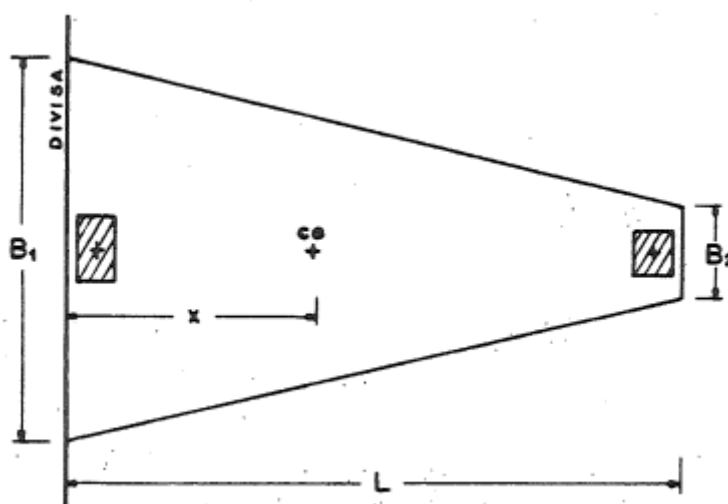
cargas entre os pilares associados, é mais adequado adotar-se um plano de base trapezoidal (figura 09) ou com balanços livres diferentes (Alva, 2007).

Figura 08 – Sapata associada retangular



Fonte: Silva (1998).

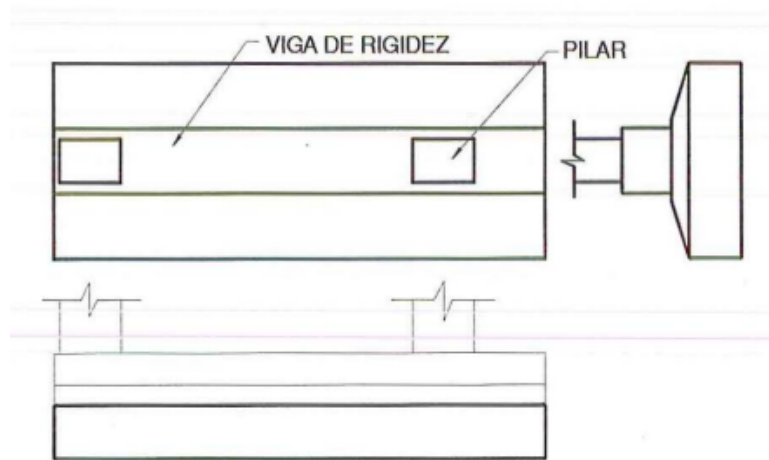
Figura 09 – Sapata associada trapezoidal



Fonte: Cintra (1984)

As sapatas associadas normalmente são construídas junto a uma viga de rigidez, o que possibilita a alocação de pilares em posição de divisa (figura 10). Dessa forma, quando há um pilar interno próximo não há necessidade de aplicação de uma viga-alavanca uma vez que a própria viga de rigidez cumprirá tal papel (ALVA, 2007).

Figura 10 – Sapata associada com pilar em divisa



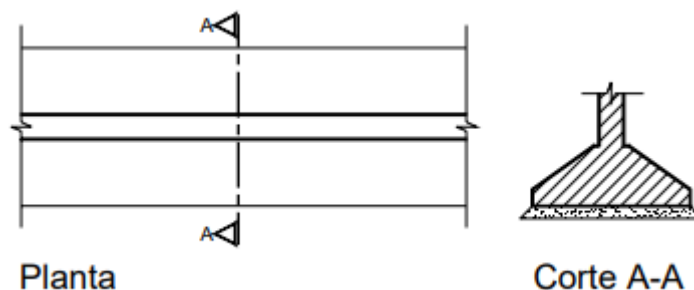
Fonte: Silva (1998).

2.2.1.3 Sapata corrida

As sapatas corridas são empregadas para situações onde há a necessidade de aplicação de cargas contínuas, como é o caso de paredes, muros ou elementos alongados (figura 11) ou ainda na existência de pilares alinhados (figura 12) (ABNT, 2019) dispostos com espaçamentos relativamente curtos onde a aplicação de sapatas isoladas incorreriam em sobreposição a uma base adjacente (SILVA, 1998).

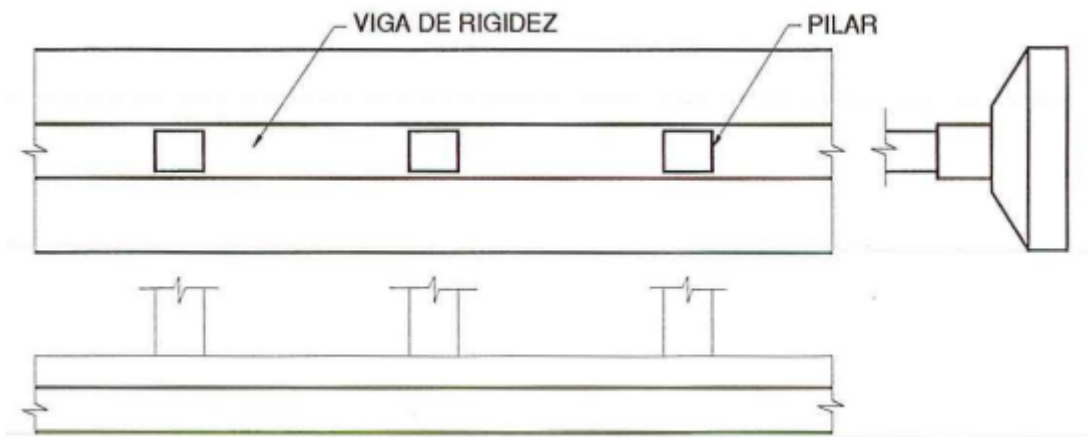
Sua geometria é similar à da sapata associada, inclusive com a adoção da viga de rigidez.

Figura 11 – Sapata corrida sob carregamento linear contínuo



Fonte: Alva (2007)

Figura 12 – Sapata corrida para pilares

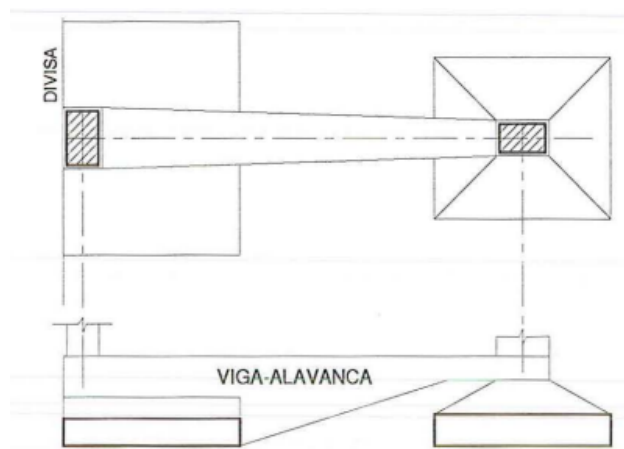


Fonte: Silva (1998)

2.2.1.4 Sapata com viga-alavanca

Empregada em situações onde existem pilares de divisa, a sapata sofre a ação de um momento produzido pela excentricidade da carga vertical oriunda da estrutura em relação ao centro geométrico da sua base, onde ocorre ação da força resultante da reação aplicada pelo solo (ALVA, 2007). Esse esforço adicional deve ser balanceado por um pilar interno através de uma viga de equilíbrio, fazendo com que a sapata trabalhe de forma centrada (figura 13) (SILVA, 1998).

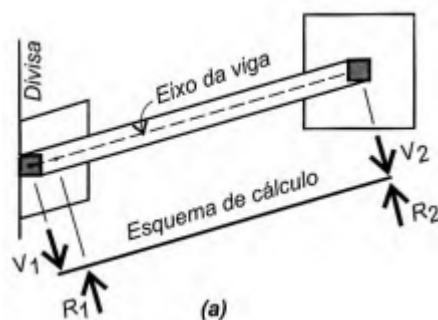
Figura 13 – Sapata com viga-alavanca



Fonte: Silva (1998)

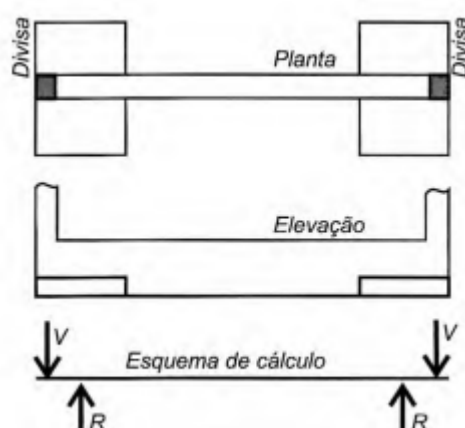
Existem situações de projeto que podem complicar a aplicação da viga-alavanca, como em casos onde o pilar interno mais próximo ao pilar da divisa não está localizado numa normal à direção da extrema (VELLOSO e LOPES, 2010). Nesse caso é possível a adoção de uma viga-alavanca esconsa, cujo eixo deve ser projetado de forma a conectar o centro de gravidade dos pilares e da sapata (figura 14) (CINTRA, 1984). Também é possível que, devido às dimensões estreitas de um terreno, os pilares estejam todos posicionados na divisa. Nesse caso, as excentricidades podem ser balanceadas de forma concomitante entre os pilares posicionados em divisas opostas (figura 15) (VELLOSO e LOPES, 2010).

Figura 14 – Sapata com viga-alavanca esconsa



Fonte: Velloso e Lopes, 2010

Figura 15 – Sapata com viga-alavanca interligando dois pilares de divisa

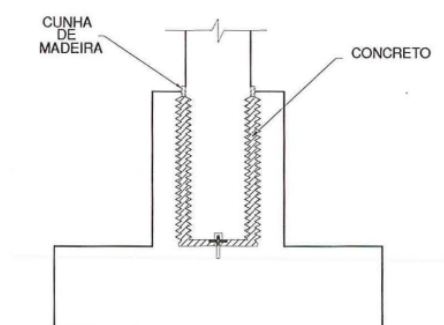


Fonte: Velloso e Lopes, 2010

2.2.1.5 Sapata para pilar pré moldado

Para a construção de estruturas composta por pilares pré-moldados, é necessária a utilização de sapatas que contenham pedestal vazado de encaixe para o embutimento dos pilares (figura 16) (SILVA, 2008).

Figura 16 – Sapata isolada para pilar pré moldado



Fonte: Silva (1998)

2.2.2 Classificação das sapatas quanto à rigidez

A NBR6118-2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento classifica as sapatas como rígidas ou flexíveis. Essa classificação determina o modelo de análise e dimensionamento das sapatas de acordo com a geometria do elemento de fundação e do pilar a ele associado (figura 17). A verificação desse parâmetro é realizada através da seguinte expressão para as duas direções do elemento:

$$h = \frac{a - a_p}{3}$$

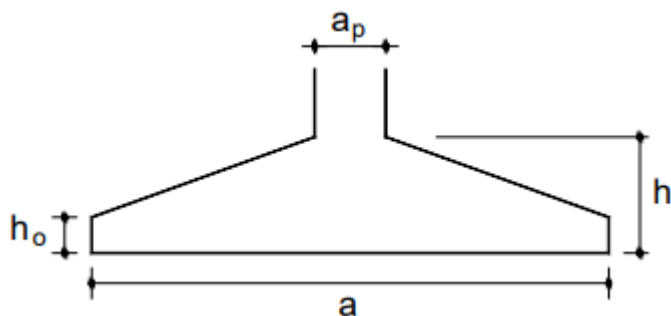
Onde:

h = Altura da sapata

a = dimensão da sapata em uma determinada direção;

a_p = dimensão do pilar na mesma direção.

Figura 17 – Dimensões típicas em sapatas



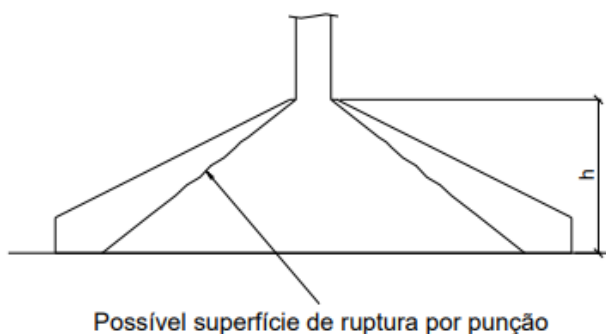
Fonte: Alva (2007)

Se a altura da sapata for igual ou superior ao resultado da expressão supracitada, considerar-se-á o elemento como rígido. Caso contrário, o elemento será considerado flexível.

2.2.2.1 Sapata flexível

As sapatas flexíveis são normalmente caracterizadas pela pequena altura e apresentam o comportamento estrutural de uma peça fletida, submetidas à flexão nas duas direções ortogonais. Dessa forma, esses elementos devem ser dimensionados ao momento fletor e à força cortante, de maneira análoga às verificações aplicadas às lajes maciças (ALVA, 2007). Adicionalmente, é necessário verificar esses elementos às condições de punção, uma vez que, devido à sua pequena altura, tal fenômeno pode causar a ruptura do elemento (figura 18) (BASTOS, 2019).

Figura 18 – Sapata isolada flexível e possível superfície de ruptura por punção



Fonte: Bastos (2019)

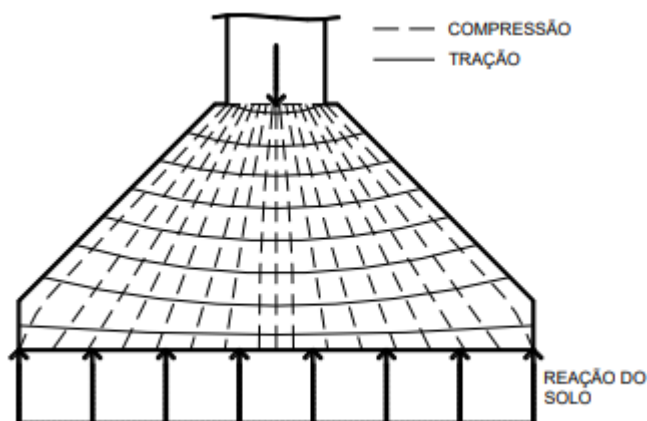
Alva apud Andrade pontua que sua utilização é mais comum em fundações sujeitas a pequenas cargas ou apoiadas em solos com pressão admissível abaixo de 150 kN/m^2 .

2.2.2.2 Sapata rígida

As sapatas rígidas são comumente adotadas em solos com boa capacidade de resistência em camadas superficiais (ALVA, 2007). Para esses elementos, admite-se uma distribuição normal das tensões no contato entre a sapata e o terreno (ABNT, 2014).

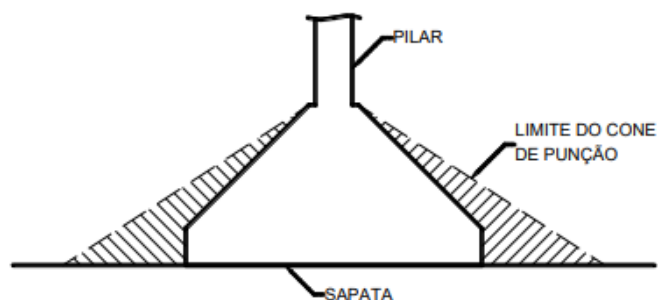
A trajetória das tensões internas pode ser admitida através do método geral das bielas e tirantes (figura 19) (ALVA, 2007). Ademais, quando há a consideração da hipótese da sapata rígida, não há necessidade de verificação de punção no elemento, uma vez que toda a sua seção encontra-se dentro do cone de punção (figura 20) (BASTOS, 2019).

Figura 19 – Trajetória das tensões principais na sapata rígida



Fonte: Adaptado de Bastos (2019)

Figura 20 – Sapata rígida e o cone de punção



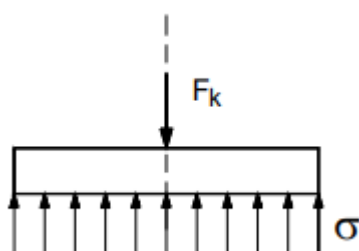
Fonte: Bastos (2019)

2.2.3 Classificação das sapatas quanto à solitação

2.2.3.1 Sapata sob carga centrada

Uma sapata é considerada centrada quando a resultante do carregamento passa pelo centro de gravidade da área da base (VELLOSO e LOPES, 2010). Nesse caso, admite-se que a distribuição das tensões do solo na base da sapata se dará de maneira uniforme, resultando da razão entre a carga vertical atuante no elemento e a área da base da sapata em planta (figura 21) (ALVA, 2007).

Figura 21 – Sapata sob carga centrada



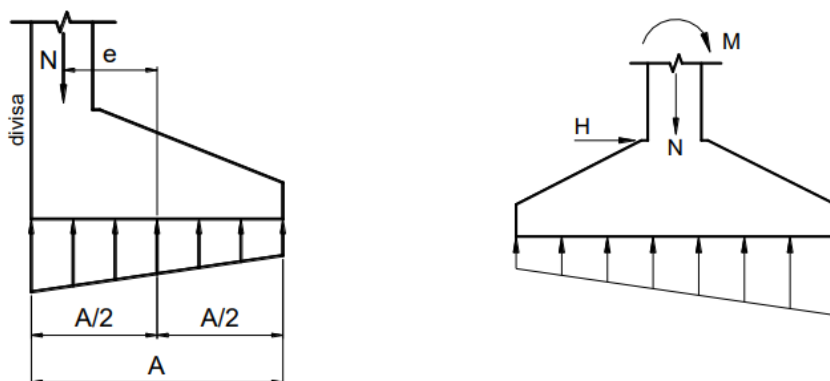
Fonte: Adaptado de Alva (2007)

2.2.3.1 Sapata sob carga excêntrica

Situações de projeto podem causar a aplicação de cargas verticais fora da projeção do centro de gravidade das sapatas, gerando momentos em uma ou nas duas direções principais das fundações (ALVA, 2007). A excentricidade também

pode ser causada pela ação de forças horizontais ou momentos fletores no pilar (figura 22) (BASTOS, 2019).

Figura 22 – Sapata sob ações excêntricas

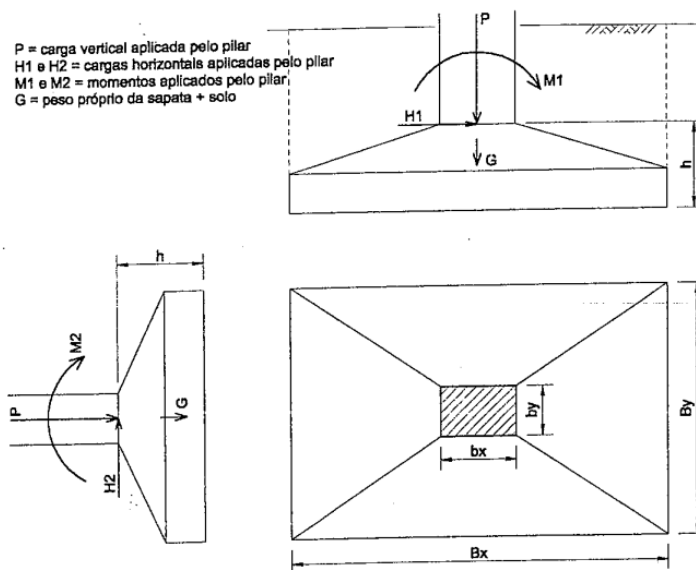


Fonte: Bastos (2019)

De acordo com Spernau (s.d) a excentricidade na sapata pode ser obtida através da combinação de ações de carga vertical, forças horizontais e momentos atuantes no seu topo (figura 23). Em decorrência dessas ações, a sapata estará sujeita aos seguintes efeitos:

- Carga Vertical, igual à carga da ação da estrutura somada ao peso próprio da sapata e do peso do solo acima de sua projeção;
- Forças horizontais, iguais às aplicadas pela estrutura;
- Momentos, resultantes do momento atuante no topo, combinado com o momento gerado pelas forças horizontais.

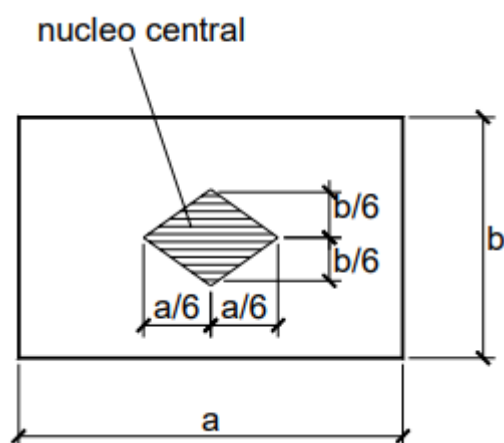
Figura 23 – Sapata sob ações excêntricas



Fonte: Spernau (s.d.)

A distribuição das tensões do solo na base da sapata dependerá da posição relativa entre o ponto de aplicação da força vertical atuante e uma região específica da seção, denominada de núcleo central de inércia (figura 24) (ALVA, 2007), que pode ser definido geometricamente como a sexta parte da dimensão da sapata na direção considerada, para sapatas de base retangular (BASTOS, 2019).

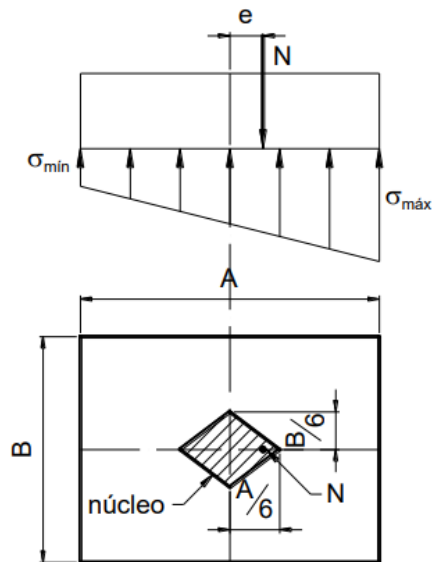
Figura 24 – Núcleo central de inércia em sapatas retangulares



Fonte: Alva (2007)

Quando o ponto de aplicação das forças encontra-se dentro do núcleo central de inércia, as tensões do solo atuantes na base da sapata serão de compressão (figura 25) (BASTOS, 2019).

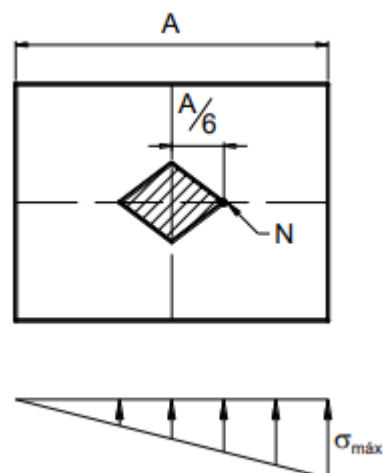
Figura 25 – Sapata com excentricidade dentro do núcleo central de inércia



Fonte: Bastos (2019)

Nas situações onde a força é aplicada no limite do núcleo central de inércia da sapata, haverá tensões de compressão na base da sapata, todavia a tensão será nula na extremidade oposta à direção da excentricidade (figura 26).

Figura 26 – Sapata com excentricidade no limite do núcleo central de inércia

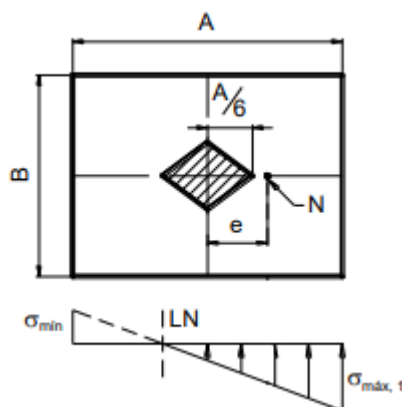


Fonte: Bastos (2019)

Já nos casos onde a carga é aplicada fora do núcleo central de inércia, apenas parte da sapata estará comprimida (ALVA, 2007). No entanto, como não são admitidas tensões de tração no contato da sapata, adota-se um novo diagrama de

tensões, excluindo-se a zona tracionada e atribui-se um novo núcleo central, cuja extremidade coincide com o centro de pressão do diagrama triangular excetuada a zona de inversão dos esforços de compressão (figura 27) (BASTOS, 2019).

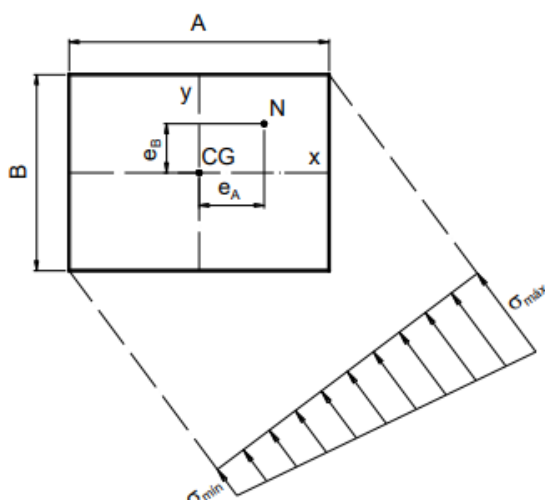
Figura 27 – Sapata com excentricidade superior ao núcleo central de inércia



Fonte: Adaptado de Bastos (2019)

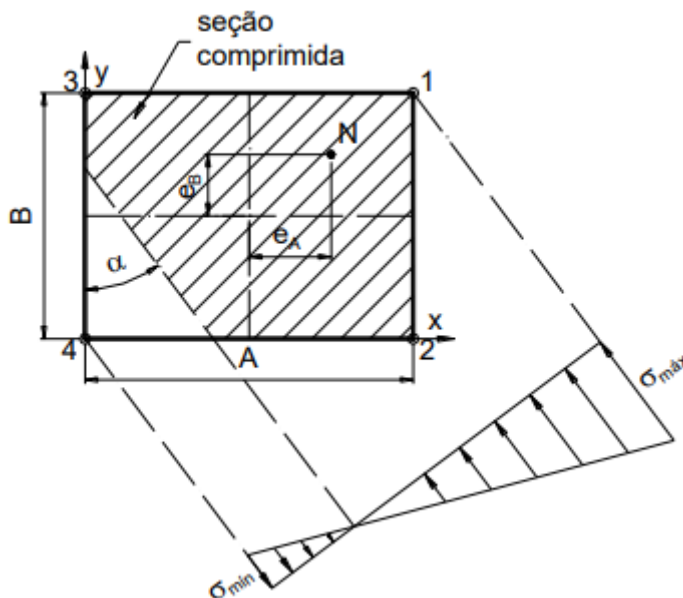
Existem ainda situações de projeto que requerem que a sapata esteja solicitada com excentricidade nas duas direções. Nesses casos, se a soma entre a razão das excentricidades e suas respectivas dimensões for igual ou superior a 1/6, a sapata está solicitada somente à compressão (figura 28). Caso contrário, haverá inversão do diagrama de compressão (figura 29) (BASTOS, 2019).

Figura 28 – Sapata com excentricidade nas duas direções submetida somente a tensões de compressão na base



Fonte: Bastos (2019)

Figura 29 – Sapata com excentricidade nas duas direções submetida a tensões de compressão e tração na base



Fonte: Bastos (2019)

2.2.4 Distribuição de tensões da sapata no solo

A definição das tensões que atuam na base de da sapata depende da forma como as cargas são transmitidas ao elemento em relação ao seu centro de pressão. Para sapatas submetidas a carga centrada, a força aplicada na sapata será distribuída de maneira uniforme em sua base (ALVA, 2007). Dessa forma, o valor da tensão atuante deverá ser obtida através da seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{N}{A.B}$$

Sendo:

σ = Tensão distribuída na base da sapata;

N = Força atuante;

A e B = Dimensões da sapata em planta.

Para as sapatas com solicitação excêntrica, é necessário inicialmente definir-se a excentricidade e comparar seu valor com os limites do núcleo central de inércia do elemento. Para sapatas submetidas a carregamento normal excêntrico ao

seu centro de gravidade, o valor da excentricidade será igual à distância entre o ponto de aplicação da carga e o centro de gravidade. Já nos casos onde a excentricidade ocorre devido à ação de um momento, a excentricidade pode ser definida através da seguinte expressão:

$$e = \frac{M}{N}$$

Onde:

e = Excentricidade;

M = Momento fletor;

N = Força normal.

Nos casos onde a excentricidade for inferior aos limites do núcleo central de inércia ($e < A/6$), a sapata estará submetida exclusivamente a tensões de compressão em sua base, no entanto, a grandeza dessas tensões será diferente em cada extremidade. De acordo com Alva (2007), o cálculo das tensões máxima e mínima é realizado utilizando-se as expressões descritas abaixo:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{N}{S} + \frac{M}{W}; \sigma_{m\acute{i}n} = \frac{N}{S} - \frac{M}{W}$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão máxima na base da sapata;

$\sigma_{m\acute{i}n}$ = tensão mínima na base da sapata;

N = força normal aplicada;

S = área da base da sapata;

M = momento atuante;

W = módulo de resistência elástico da base da sapata, igual a:

$$W = \frac{b \cdot a^2}{6}$$

Sendo:

a = dimensão da sapata, em planta, na direção analisada;

b = dimensão da sapata na direção perpendicular à analisada.

Quando o ponto de aplicação da força considerando-se a excentricidade ocorre no limite do núcleo central de inércia ($e=A/6$), a tensão na extremidade oposta à direção da excentricidade será nula. Já a tensão na outra extremidade da sapata, a tensão máxima poderá ser obtida através da seguinte expressão:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 2 \frac{N}{A.B}$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão máxima na base da sapata;

N = força normal aplicada;

A e B = dimensões da base da sapata.

Nos casos onde a aplicação da força se dá fora dos limites do núcleo central de inércia ($e>A/6$), haverá uma inversão na distribuição das tensões na base da sapata, incorrendo no surgimento de tração na base do elemento. Nesses casos, adota-se um novo diagrama triangular (figura 30) excluindo-se a zona tracionada e com o centro de gravidade coincidente com o limite do novo núcleo central (BASTOS, 2019). Neste caso, a tensão de compressão máxima é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{2N}{3B(\frac{A}{2}-e)}$$

Onde:

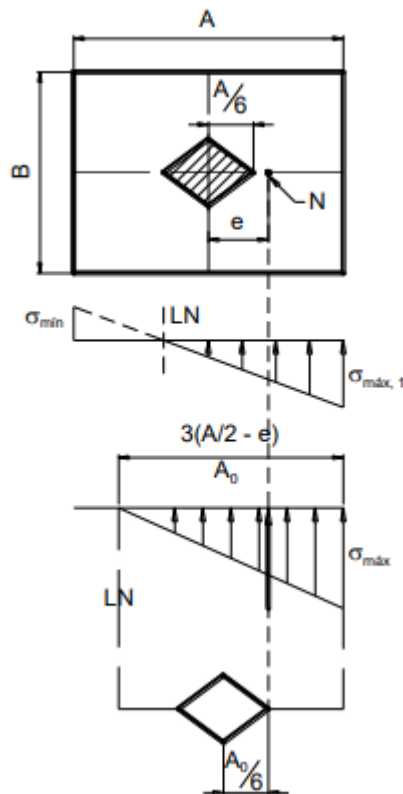
$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão máxima na base da sapata;

N = força normal aplicada;

A e B = dimensões da base da sapata;

e = excentricidade.

Figura 30 – Ponto de aplicação fora do núcleo central de inércia



Fonte: Bastos (2019)

De acordo com Bastos (2019), para os casos onde a solicitação ocorre de maneira excêntrica nas duas direções do eixo cartesiano, é possível utilizar-se o ábaco de Montoya (Figura 31) para determinar-se as tensões em cada vértice da sapata. Para a utilização do Ábaco, calculam-se inicialmente os parâmetros adimensionais de acordo com as expressões indicadas abaixo:

$$\eta_x = \frac{e_x}{A} ; \eta_y = \frac{e_y}{B}$$

Onde:

η_x, η_y = valores adimensionais para consulta no ábaco de Montoya;

e_x = excentricidade na direção x do plano cartesiano;

e_y = excentricidade na direção y do plano cartesiano;

A = dimensão da base da sapata na direção x do plano cartesiano;

B = dimensão da sapata na direção y do plano cartesiano

Calculados os valores adimensionais, obtém-se através do ábaco os valores dos coeficientes λ_1 e λ_4 e do ângulo de inclinação da linha neutra (α) (BASTOS, 2019). As tensões atuantes nos vértices da sapata são obtidas através das equações abaixo:

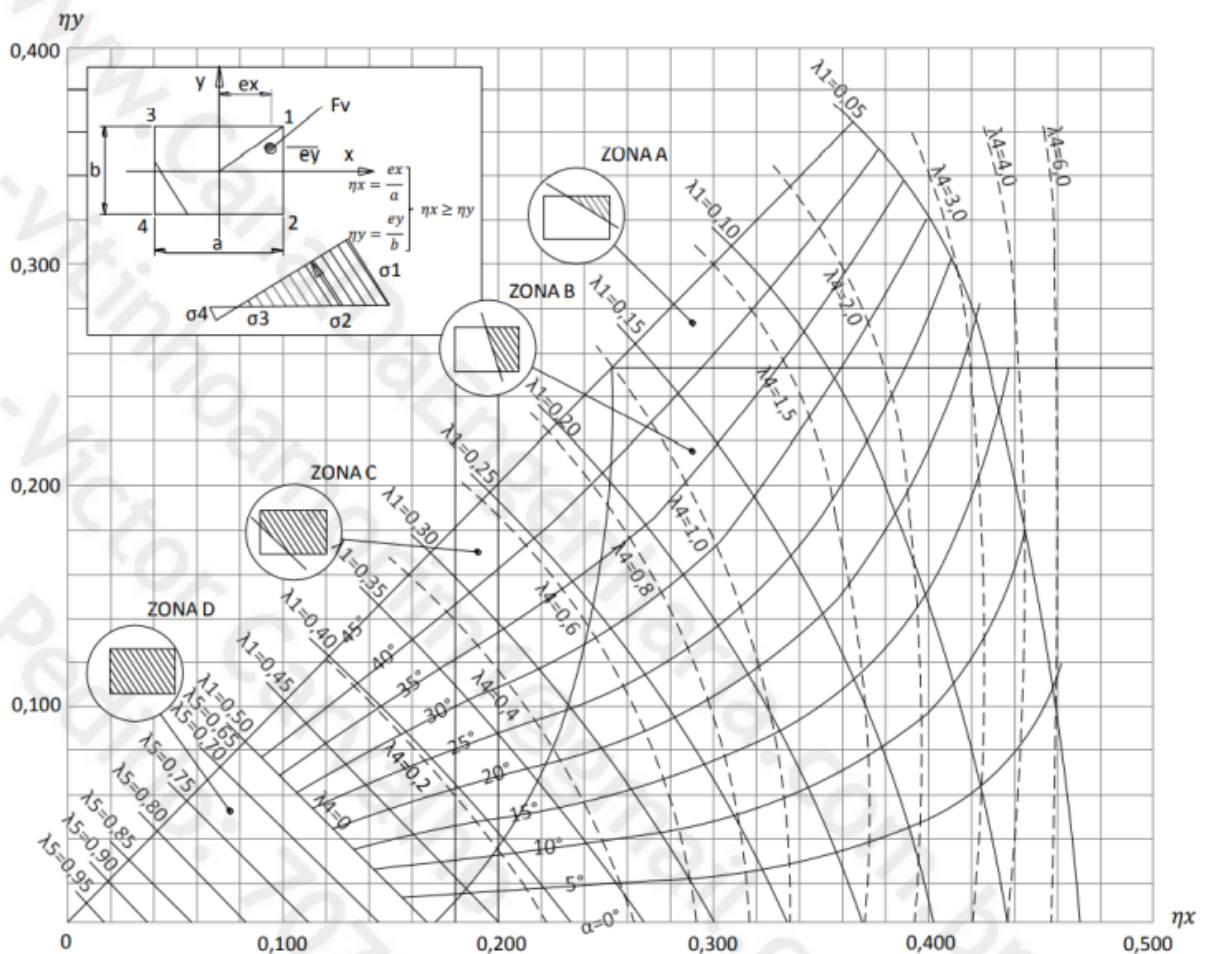
$$\sigma_{máx} = \frac{N}{\lambda_1 \cdot A \cdot B}$$

$$\sigma_4 = \lambda_4 \cdot \sigma_{máx}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{máx} - (\sigma_{máx} - \sigma_4) \frac{\text{sen}\alpha}{\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha}$$

$$\sigma_3 = \sigma_{máx} - (\sigma_{máx} - \sigma_4) \frac{\text{cos}\alpha}{\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha}$$

Figura 31 – Ábaco de Montoya



Fonte: Adaptado de Giacomassi (2021)

De acordo com Bastos (2019), a tensão máxima produzida não pode ser superior à tensão admissível do solo acrescida de 30% do seu valor total.

2.2.5 Verificações de estabilidade da sapata

2.2.5.1 Deslizamento

Segundo Bastos (2019), a segurança da sapata ao deslizamento é atingida quando a força de atrito entre o solo e a base da sapata supera a ação das forças aplicadas, considerando-se um fator de segurança mínimo igual a 1,5. O modelo geral, que considera a contribuição do atrito e da coesão do solo para a determinação da força estabilizante pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$F_{estab} = N \cdot tg\left(\frac{2}{3}\Phi\right) + A\left(\frac{2}{3}c\right)$$

Onde:

F_{estab} = força estabilizante ao deslizamento;

N = força normal aplicada, considerando-se as ações externas e o peso próprio da sapata;

Φ = ângulo de atrito interno do solo;

A = dimensão da base em contato com o solo;

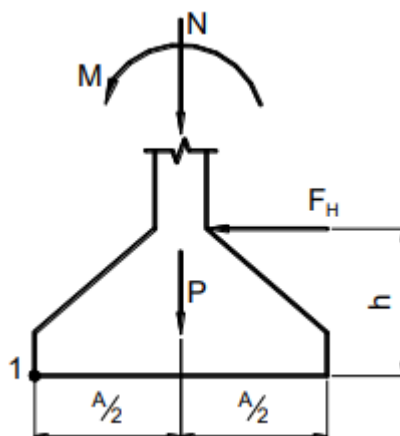
c = coesão do solo.

Ainda de acordo com Bastos (2019) a consideração da contribuição do empuxo passivo do solo pode ser desprezada, uma vez que não há garantia de sua atuação permanente.

2.2.5.2 Tombamento

De acordo com Bastos (2019), a verificação de tombamento da sapata deve ser realizada comparando-se a atuação dos momentos fletores em torno de um ponto 1 (figura 32). O momento de tombamento deve considerar a contribuição do momento transferido para a sapata através da superestrutura e do momento gerado na base pela força horizontal atuante.

Figura 32 – Forças atuantes na sapata



Fonte: Bastos (2019)

$$M_{tomb} = M + F_h \cdot h$$

Sendo:

M_{tomb} = momento de tombamento da sapata;

M = momento transmitido pela supraestrutura;

F_h = força horizontal atuante na sapata;

h = distância vertical entre o ponto de aplicação da força horizontal e a base da sapata.

O momento de tombamento obtido através da expressão descrita acima deve ser comparado com o momento estabilizante, descrito na expressão abaixo, respeitando-se um coeficiente de segurança igual a 1,5.

$$M_{estab} = N \cdot \frac{A}{2}$$

Onde:

M_{estab} = momento estabilizante;

N = força normal aplicada;

A = dimensão da base na direção considerada.

2.3 Conceitos de Análise Estrutural

A análise estrutural, dentro do arcabouço do projeto de estruturas e fundações, é a etapa onde busca-se realizar uma previsão do comportamento da estrutura através de teorias físicas e matemáticas (MARTHA, 2010). Nessa etapa do projeto estrutural, os modelos matemáticos são utilizados buscando equacionar as condições de equilíbrio, de compatibilidade dos deslocamentos e deformações e condições sobre o comportamento dos materiais (MARTHA apud WHITE et al, 1976).

Esse processo é realizado através de métodos que possibilitam a aproximação dos resultados da construção real. Existem diversos métodos de análise com diferentes graus de complexidade, tais como o método das forças, método dos deslocamentos e método dos elementos finitos. No entanto, neste

trabalho, será apresentado o conceito do método dos deslocamentos, que é empregado nos softwares utilizados para o desenvolvimento da investigação proposta.

Neste item, serão abordados conceitos importantes para a compreensão dos parâmetros envolvidos na descrição do comportamento estrutural através do processo de análise de pórticos planos.

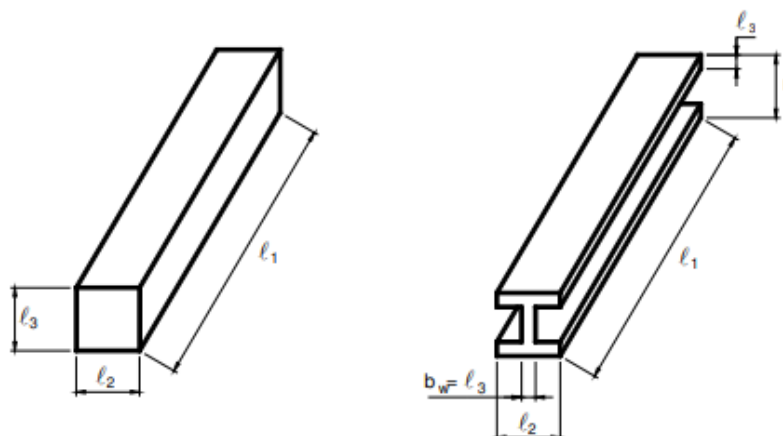
2.3.1 Classificação geométrica dos elementos estruturais

Os elementos que compõem uma estrutura podem ser classificados de diversas maneiras. Uma das formas de atribuir-se a classificação é a geometria dos elementos. Essa classificação é realizada comparando-se a ordem de grandeza das três dimensões principais do elemento (comprimento, altura e espessura) (BASTOS, 2006).

2.3.1.2 Elementos lineares

A principal característica dos elementos lineares, também conhecidos como barras, é possuir uma das dimensões maiores que as outras (FONTES, 2005) (Figura 33). Podemos exemplificar esses elementos em um projeto estrutural com as vigas, pilares, tirantes e cabos.

Figura 33 – Elementos lineares

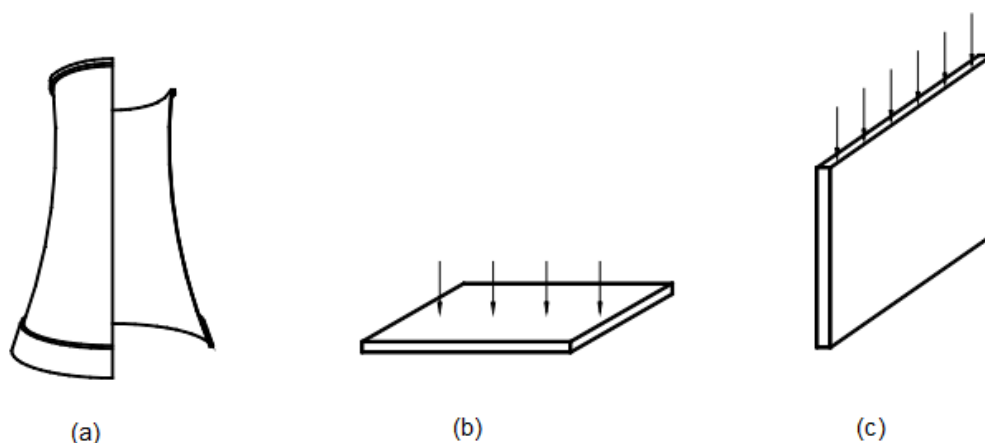


Fonte: Adaptado de Bastos (2006)

2.3.1.2 Elementos bidimensionais

São elementos onde duas dimensões possuem ordem de grandeza similar e a terceira dimensão é muito menor (Bastos, 2006). Podem ser exemplificados pelas lajes e paredes. Esses elementos podem ser ainda diferenciados como cascas, que possuem superfície curva, placas, que recebem o carregamento perpendicularmente ao seu plano e chapas, que recebem o carregamento alinhado ao plano do elemento (Figura 34). No modelo estrutural, esses elementos são usualmente representados por grelhas.

Figura 34 – Elementos bidimensionais: (a) Cascas; (b) Placas; (c) Chapas.

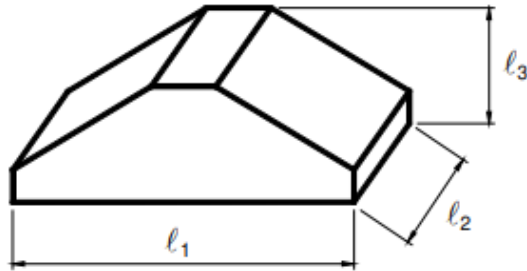


Fonte: Adaptado de Bastos (2006)

2.3.1.3 Elementos tridimensionais

São elementos onde as três dimensões possuem a mesma ordem de grandeza (Figura 35), podendo ser então caracterizados pelo volume (CORRÊA, 1991). Os elementos estruturais que possuem essa classificação podem ser exemplificados pelos blocos e sapatas de fundação e os consolos de pilares (BASTOS, 2006).

Figura 35 – Elementos tridimensionais

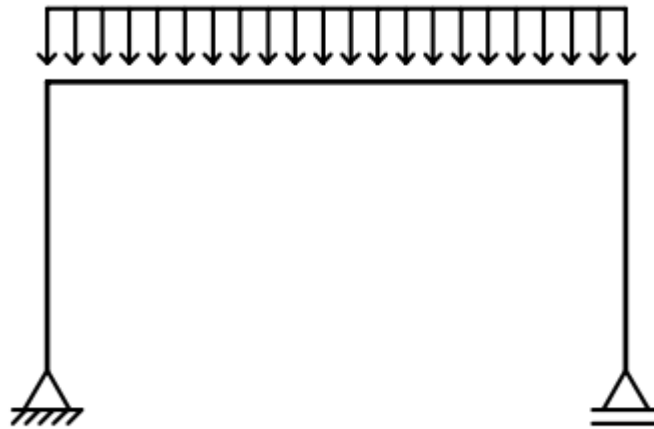


Fonte: Adaptado de Bastos (2006)

2.3.2 Pórticos planos

O sistema estrutural de uma edificação constitui um todo tridimensional cujo comportamento é de extrema complexidade (CORRÊA, 1991). Para a análise de efeitos localizados e independentes dos efeitos tridimensionais, é usual decompor a estrutura em subsistemas planos, como os pórticos (ARAÚJO, 2014). Estes subsistemas são constituídos de elementos lineares que formam quadros entre si, com carregamento atuante no mesmo plano do sistema estrutural (figura 36), garantindo a estabilidade e a resistência a esforços normais, cortantes e de flexão (BARROS et al, 2012).

Figura 36 – Pórtico plano



Fonte: Adaptado de Martha (2010)

2.3.3 Análise estrutural pelo método dos deslocamentos

Também conhecido como método da rigidez direta, o método dos deslocamentos emprega soluções matriciais para a determinação das incógnitas principais do modelo de análise (MARTHA, 2010). Esse método pode ser aplicado à resolução de qualquer estrutura reticulada (ALTOQI, 2022).

De acordo com Reis (2007), para a resolução estrutural através do método dos deslocamentos, inicialmente são fixados os graus de liberdade da estrutura obtendo-se o sistema principal. Para cada nó das barras, obtém-se os coeficientes de rigidez introduzindo-se um deslocamento unitário de rotação ou translação na direção dos graus de liberdade, a fim de impedir os deslocamentos nas demais direções. Subsequentemente, são montadas as equações de equilíbrio de forças em torno dos nós, tendo como incógnitas os deslocamentos. Assim, é composta a matriz de rigidez para cada barra. Para a obtenção da matriz de rigidez do sistema, é necessário sobrepor os coeficientes dos elementos que compartilham o mesmo nó.

A equação básica para descrever o modelo é dada por:

$$[K] \cdot [\delta] = \{F\} - \{F_o\}$$

Onde:

$[K]$ = matriz de rigidez da estrutura;

$[\delta]$ = matriz coluna dos deslocamentos;

$\{F\}$ = matriz coluna das ações externas atuantes na estrutura;

$\{F_o\}$ = matriz coluna das ações internas da estrutura.

Segundo Puel apud Loriggio (2009), a análise estrutural pelo método dos deslocamentos pode ser descrita através das seguintes etapas:

1. Elaboração do modelo estrutural: escolha do sistema estrutural resistente, comportamento dos componentes da estrutura, vinculações, propriedade dos materiais, dimensões da estrutura, geometria dos componentes, carregamentos e combinações de carregamentos;
2. Definição do número de nós;
3. Definição da incidência e numeração das barras;
4. Cálculo de rigidez no sistema local $[K_i]$ para todas as barras da estrutura;
5. Cálculo da matriz de rigidez no sistema global $[K] = [T]^t \cdot [K_i] \cdot [T]$ para todas as barras da estrutura, sendo:
 $[T]$ = matriz de transformação do eixo global para o eixo local;
 $[T]^t$ = matriz de rotação transposta.
6. Montagem da matriz de rigidez $[K]$ da estrutura;
7. Determinação do vetor de esforços de imobilização dos nós em cada barra no sistema local $\{S_o\}$;
8. Determinação do vetor de esforços de imobilização dos nós em cada barra no sistema global $\{S_o\} = [T]^t \cdot \{S_o\}$;
9. Montagem do vetor de esforços de imobilização dos nós da estrutura $\{F_o\}$;
10. Montagem do sistema de equação da estrutura em relação aos graus de liberdade originais $[K] \cdot [\delta] = \{F\} - \{F_o\}$, onde:
 $[K]$ = matriz de rigidez;
 $\{\delta\}$ = vetor deslocamentos;

$\{F\}$ = vetor ações nodais;

$\{F_0\}$ = vetor de esforços de imobilização dos nós da estrutura.

11. Reordenação do sistema de equações, deixando as direções restringidas para o final;
12. Resolução do sistema de equações $[K_{LL}] + \{\delta_L\} = \{F_L\}$, correspondentes às direções livres;
13. Separar de $\{\delta_L\}$ os deslocamentos $\{d\}$ de cada barra da estrutura;
14. Encontrar o vetor de reações de apoio nas direções restringidas;
15. Calcular os esforços solicitantes nas extremidades das barras no sistema $\{S\} = [K_G] \cdot \{d\}$. Em seguida, transformam-se os esforços para o sistema local $\{S\}$.

Uma vez obtidos todos os deslocamentos, reações de apoio e esforços nas barras, a análise pode ser considerada como concluída (PUEL, 2009).

2.4 AltoQi Eberick

O AltoQi Eberick é um software para o lançamento, análise, dimensionamento e detalhamento de estruturas em concreto armado e protendido, e em perfis metálicos, possuindo também recursos para a análise de elementos em madeira ou de outro materiais genéricos e para o dimensionamento de alvenaria estrutural.

O programa utiliza a modelagem através da inserção de dados de entrada gráfica em um ambiente CAD 2D e, a partir dos dados inseridos pelo usuário, é realizada uma modelagem 3D do edifício de forma automática, permitindo a interoperabilidade com outros softwares que aplicam a metodologia BIM, possibilitando um fluxo de trabalho integrado com outras ferramentas multidisciplinares que adotam o mesmo processo.

O programa realiza a análise estrutural através do método dos deslocamentos no pórtico espacial, onde as vigas e pilares são representados por barras e as lajes, que são representadas por grelhas no modelo, podem ser consideradas separadamente ou de forma integrada ao pórtico. O programa permite

a execução da análise estática linear de primeira ordem ou considerando efeitos globais de segunda ordem através do P-Delta utilizando as combinações do Estado Limite Último, verificação de deformações excessivas para o modelo fissurado, considerando as combinações do Estado Limite de Serviço e verificação de vibrações excessivas devido à ação de forças dinâmicas de vento.

As fundações são representadas no modelo estrutural através do vínculo de ligação entre a supraestrutura e o solo. Dessa forma, para definir o modo como a fundação interage com o solo, é possível definir um vínculo deslizante, rotulado, engastado ou elástico. Este último permite a adoção de correlações para considerar a deformabilidade do solo sobre qual a estrutura descarrega.

Para as sapatas isoladas, o programa realiza a verificação das pressões-limite nos quatro vértices dos elementos, além das verificações de arrancamento, tombamento e deslizamento. O dimensionamento estrutural das sapatas é realizado considerando-se a hipótese das sapatas rígidas, realizando a distribuição dos esforços internos do elemento através de um modelo de bielas e tirantes.

Dentre as vantagens da utilização do AltoQi Eberick para a elaboração dos projetos estruturais estão a facilidade e fluidez na modelagem, a permissão de adoção de diferentes vínculos entre os elementos da supraestrutura e dos elementos de fundação, esse segundo permitindo modelos aproximados para a verificação da interação solo-estrutura e a automação de rotinas de cálculo cuja aplicação manual é bastante extensa e complexa.

3 METODOLOGIA

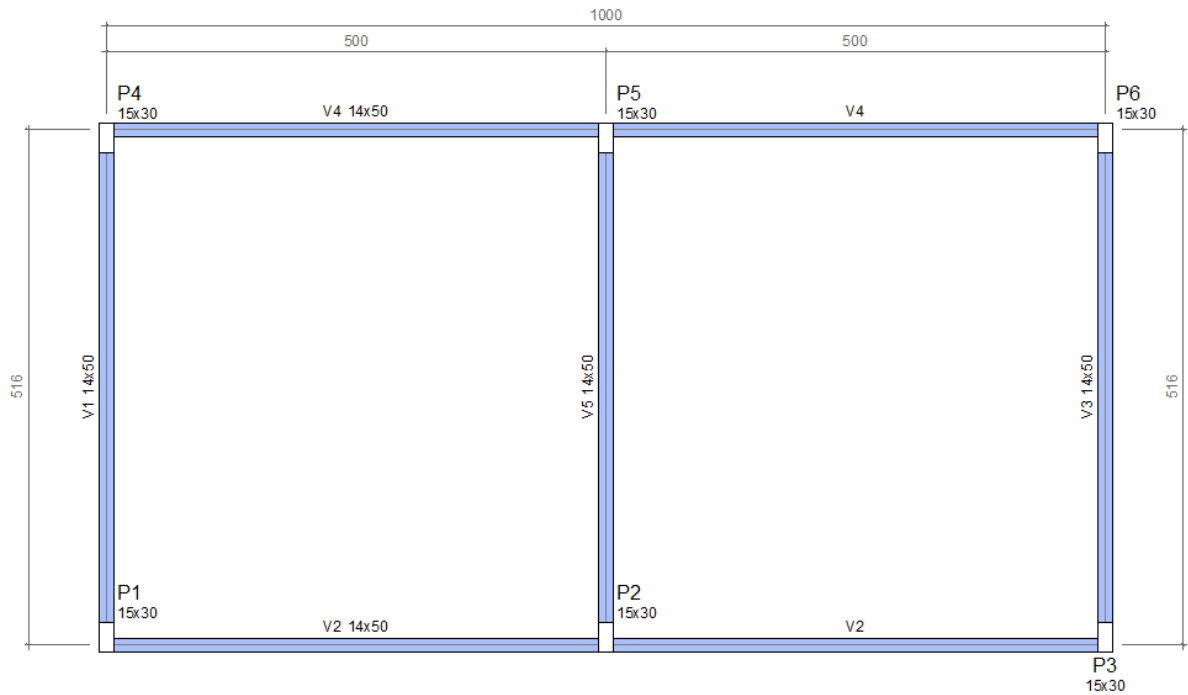
Para realizar a aferição proposta e a fim de atingir os objetivos delimitados neste trabalho, serão adotados os seguintes métodos para a investigação do problema.

3.1 Métodos aplicados

Para este trabalho adotou-se inicialmente a investigação exploratória por meio de pesquisas bibliográficas em materiais já publicados, tais como livros, artigos e revistas científicas, dissertações e teses disponibilizados em meios digitais ou físicos.

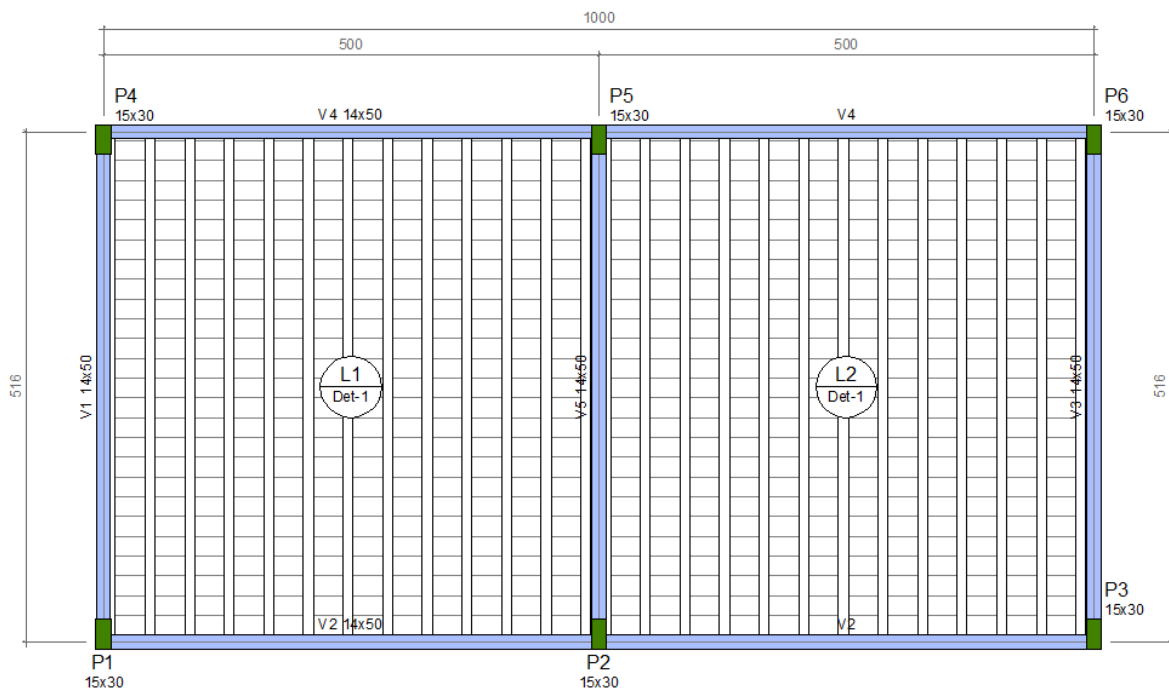
As investigações serão realizadas através de um modelo estrutural de pórtico plano contendo as sapatas posicionadas em situação de divisa. A caracterização das cargas atuantes por pavimento será realizada considerando-se um edifício arbitrário com dimensões de 5mx5m em planta e altura entre pavimentos igual a 3m. o edifício irá ser constituído por um pavimento baldrame, que irá conter as fundações e, a fim de verificar o efeito do incremento das cargas atuantes na fundação, também será definido um pavimento tipo, a ser reproduzido de forma crescente nas fundações. Os detalhes do modelo podem ser observados nas plantas de forma exibidas nas figuras 37 e 38.

Figura 37 – Planta de forma dos baldrames sem a representação da fundação



Fonte: O Autor (2022)

Figura 38 – Planta de forma tipo



Fonte: O Autor (2022)

Desse modelo serão levantadas as ações de carga permanente (peso próprio e cargas adicionais de revestimento) e de carga acidental, conforme preceitos da NBR6120-2019: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Essas cargas serão então aplicadas no modelo de pórtico plano, que é o objeto final de estudo deste trabalho. A rotina de estudos será detalhada nos itens subsequentes.

3.1.1 Características dos materiais

A fim de realizar o processo de análise estrutural de acordo com as características físicas necessárias, é necessário definir-se a resistência característica dos materiais. Para todos os elementos estruturais, adotar-se-á a resistência característica do concreto igual a 30MPa. O módulo de elasticidade secante adotado será de 27GPa.

Caso exista a necessidade de ajuste das resistências para atender ao dimensionamento de algum dos elementos da estrutura, esses valores serão revistos após o processamento dos elementos no AltoQi Eberick.

Para o solo, será atribuída a característica de solo arenoso, com tensão admissível igual a 2,0kgf/cm², peso específico de 1600kg/m³ e ângulo de atrito interno de 35°. Uma vez que a investigação proposta neste trabalho é meramente acadêmica e não trata-se de uma situação real de projeto, os valores supracitados são arbitrados e não correspondem a uma condição apresentada em relatório de investigação do solo.

Para viabilizar a reprodução dos resultados obtidos no AltoQi Eberick através de modelagem da estrutura a ser realizada no FTool, serão desconsiderados os efeitos de segunda ordem devido à não linearidade geométrica. No Eberick, esse efeito é realizado através do processo P-Delta e deverá ser desconsiderado.

3.1.2 Pré-dimensionamento dos elementos estruturais

A fim de definir as propriedades geométricas dos elementos estruturais a serem lançados no modelo, será realizado um pré dimensionamento das vigas e

pilares do pórtico, com base nas características geométricas ações atuantes em cada elemento.

Uma vez que o cálculo da geometria das sapatas é realizado de maneira automática no AltoQi Eberick de acordo com as solicitações, esses elementos não serão pré-dimensionados e adotar-se-á a geometria sugerida pelo programa.

3.1.2.1 Pré-dimensionamento das vigas

O pré-dimensionamento das vigas será realizado fixando-se a largura da seção no valor de 14cm e a altura será definida de acordo com o vão livre, de acordo com a seguinte expressão:

$$h = \frac{L_0}{10}$$

Onde:

h = altura da seção da viga;

L_0 = vão livre da viga.

A dimensão da altura da viga deverá ser um múltiplo de 5. Caso o resultado da expressão acima resulte em um não múltiplo de 5, o resultado será arredondado para o múltiplo subsequente.

3.1.2.2 Pré-dimensionamento dos pilares

O pré dimensionamento dos pilares será realizado através do método das áreas de influência. Nesse método, realiza-se a divisão dos planos de laje dos pavimentos através de linhas traçadas pelos pontos médios entre os pilares. Com base nas figuras geométricas formadas para cada pilar, calcula-se sua área, que é multiplicada pelo carregamento distribuído nos planos de laje, que é resultado dos carregamentos permanentes e variáveis, conforme preconiza a NBR6120.

Para a definição das dimensões da seção dos pilares, inicialmente fixa-se o valor para a menor dimensão, de acordo com o número de pavimentos: 14 a 20cm para edificações de até 2 pavimentos; 15 a 20cm para edificações de até 4 pavimentos. Com base nos valores das cargas atuantes em cada um dos pilares

aplicar-se-á a seguinte expressão, definindo a maior dimensão mínima necessária para a seção (Carvalho, 2009). Adotar-se-ão valores múltiplos de 5cm para as dimensões da seção retangular. De acordo com a NBR6118-2014, a área da seção não pode ser inferior a 360cm².

$$h \geq \frac{N_{sd}}{b \cdot f_{cd}}$$

Onde:

- h = Maior dimensão da seção do pilar;
- N_d = força normal de cálculo;
- b = Menor dimensão da seção do pilar
- f_{cd} = resistência de cálculo do concreto.

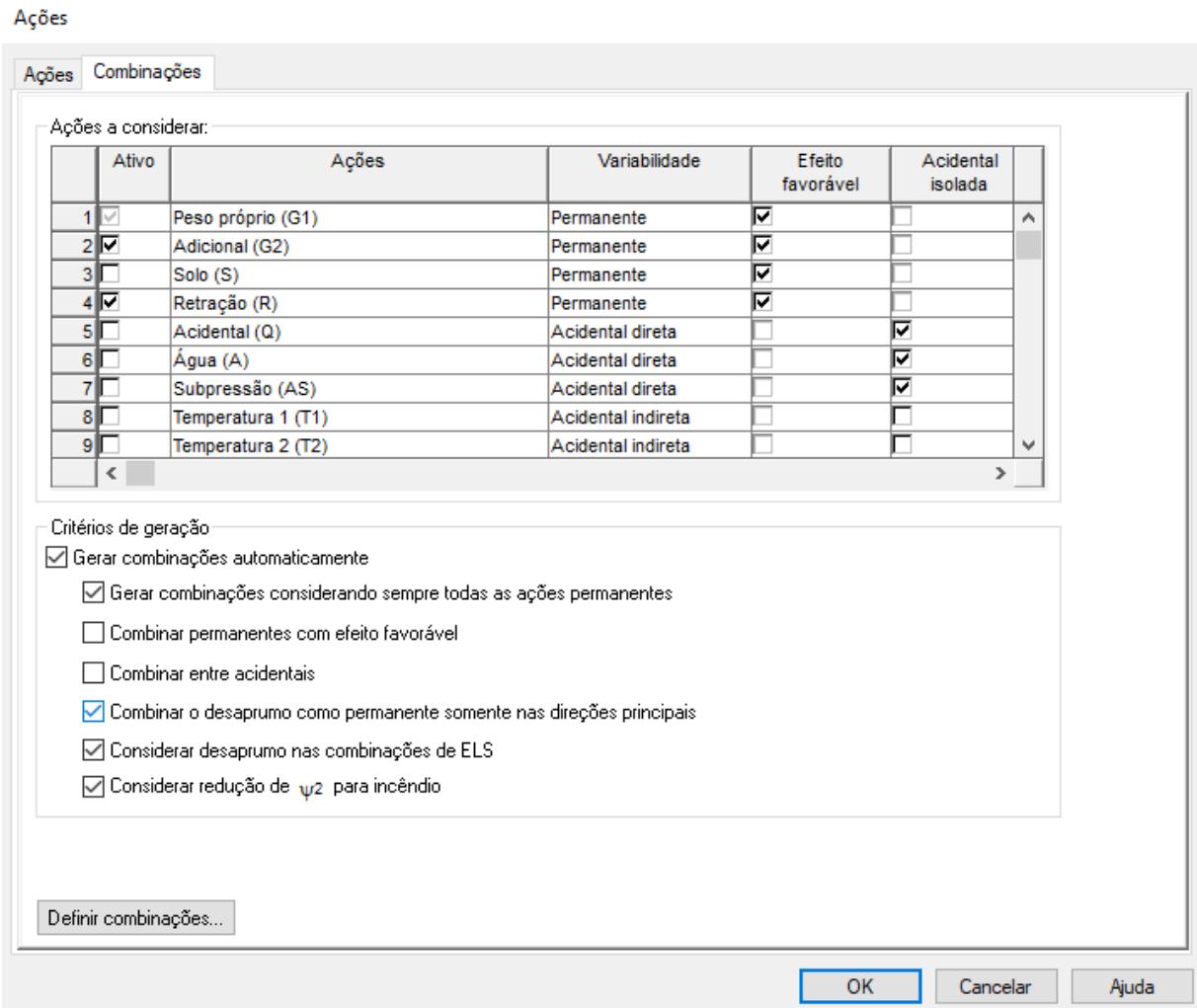
3.1.3 Configuração dos parâmetros de projeto no AltoQi Eberick

Para que os critérios de projeto sejam traduzidos para o software, é necessário realizar a configuração de alguns parâmetros que causam interferência nos resultados esperados. Nos itens abaixo, serão abordadas as configurações a serem atribuídas no programa

3.1.3.1 Ações e combinações

Para a análise dos resultados, visando facilitar a comparação com o modelo a ser produzido no Ftool, serão mantidos habilitados apenas as ações permanentes de peso próprio e adicionais e, como cargas variáveis, as ações acidentais. Esses parâmetros podem ser configurados no AltoQi Eberick através das Configurações de Projeto, opção Ações, selecionando-se a aba Combinações (figura 39).

Figura 39 – Configurações de ações e combinações no AltoQi Eberick



Fonte: O Autor (2022)

3.1.3.2 Materiais e durabilidade

No contexto dos materiais e durabilidade da estrutura, é necessário realizar a configuração da resistência característica e do módulo de elasticidade do concreto utilizado e atribuir a classe de concreto aos elementos de projeto. Essa operação pode ser realizada através do menu de Configurações de Projeto, opção materiais e durabilidade (figura 40). A definição do módulo de elasticidade deve ser realizada através do botão Classes, disponível no rodapé da janela de configurações (figura 41).

Figura 40 – Configurações de materiais e durabilidade no AltoQi Eberick

Elementos	Concreto	Cobrimento (peças externas)	Cobrimento (peças internas)	Cobrimento (contato com o solo)	
Vigas	C-30	3 cm	3 cm	3 cm	Bitolas...
Pilares	C-30	3 cm	3 cm	4.5 cm	Bitolas...
Lajes	C-30	2.5 cm		3 cm	Bitolas...
Reservatórios	C-30	3 cm			Bitolas...
Blocos	C-30			4.5 cm	Bitolas...
Sapatas	C-30			4.5 cm	Bitolas...
Tubulões	C-30			4.5 cm	Bitolas...
Muros	C-30			4.5 cm	Bitolas...
Radier	C-30			4.5 cm	Bitolas...

Fonte: O Autor (2022)

Figura 41 – Configurações da classe de concreto no AltoQi Eberick

Classes de resistência	Identificação	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade
C-20	C-30	Resistência característica (fck) 3000 tf/m²	Módulo secante (Ecs) 2.68384e tf/m²
C-25		Resistência de cálculo (fcd) 2142.86 tf/m²	Módulo inicial (Eci) 3.06725e tf/m²
C-30		Peso específico 2500 kgf/m³	Resistência à tração
C-35		Abatimento (slump) 10 cm	Resistência média (fctm) 289.65 tf/m²
C-40		Coefficiente de dilatação térmica 0.00001 /°C	Característica inferior (fctk,inf) 202.75 tf/m²
C-45		Tipo de agregado granito	Característica superior (fctk,sup) 376.54 tf/m²
C-50		Custo	Resistência de cálculo (fctd) 144.82 tf/m²
		Material 490.08 R\$/m³	Cimento
		Execução 131.50 R\$/m³	Consumo 280 kgf/m³
			Tipo CP-IV

Fonte: O Autor (2022)

3.1.3.2 Configuração das características do solo

A configuração dos parâmetros do solo deve ser realizada através do menu de Configurações de Projeto, na opção Dimensionamento. Na aba das Sapatas (figura 42), serão informados o tipo de solo, a capacidade de carga, o ângulo de atrito e o peso específico do solo, conforme valores supracitados.

Figura 42 – Configurações de dimensionamento das sapatas no AltoQi Eberick

Dimensionamento [Sapatas]

Pilares Pilares PM Vigas Vigas PM Lajes Sapatas Blocos Muros Paredes de alvenaria

Dimensões		Solo	
Altura da sapata constante se h1 menor que	25 cm	Tipo do solo	arenoso
Dimensões múltiplas de	5 cm	Pressão admissível	2 kgf/cm ²
Agrupar com diferença de lados menor ou igual a	5 cm	Coesão	0.5 kgf/cm ²
Lado maior inferior a	300 cm	Peso específico	1600 kgf/m ³
Influência do fator de forma	1	Ângulo de atrito	30
Profundidade do solo	100 cm	Redutor do atrito	0.67

Valores mínimos		Majoração de pressão para cargas excêntricas	
Altura maior (H1)	25 cm	Majoração de pressão para cargas excêntricas	1.15
Altura menor (H0)	20 cm	Momento mínimo para considerar flexão	50 kgf.m
Balanço mínimo	20 cm		
<input checked="" type="checkbox"/> Altura útil maior que a espera do pilar			

Armadura... Coeficientes...

OK Cancelar Ajuda

Fonte: O Autor (2022)

3.1.3.2 Configuração dos parâmetros de análise

Para desabilitar a adoção do processo de acréscimo de segunda ordem devido à não linearidade geométrica, P-Delta, será necessário acessar as configurações de Projeto, na opção Análise (figura 43). O item Utilizar o processo P-Delta deve ser desabilitado.

Figura 43 – Configurações de análise no AltoQi Eberick

Análise

Geral

Redução no engaste para nós semirrígidos: 25 %

Redução na torção para os pilares: 0 %

Redução na torção para as vigas: 85 %

Aumento na rigidez axial dos pilares: 1 ...

Salvar automaticamente o projeto após o processamento

Ligação viga-pilar

Flexibilizar ligação com pilar equivalente

Aplicar para relação h/b maior que: 5 ...

Não linearidade física

Rigidez das vigas	0.4	Ec.Ic
Rigidez dos pilares	0.8	Ec.Ic
Rigidez das lajes	0.5	Ec.Ic
Rigidez das estacas	0.8	Ec.Ic
Rigidez alvenaria estrutural	0.8	Ea.I

Não linearidade geométrica

Utilizar o processo P-Delta

Número máximo de iterações: 10

Precisão mínima: 1 %

Combinação vertical de cálculo: 1.4G1+1.4G2+1.4Q+1.1A ...

Imperfeições globais

Tipo de estrutura: Estruturas usuais

Combinação vertical característica: G1+G2+Q+A ...

Processo

Grelhas + pórtico espacial

Modelo integrado

Painéis de lajes... Modelo da fundação...

Modelo ELS... Avançado...

Análise dinâmica... Protensão...

OK Cancelar Ajuda

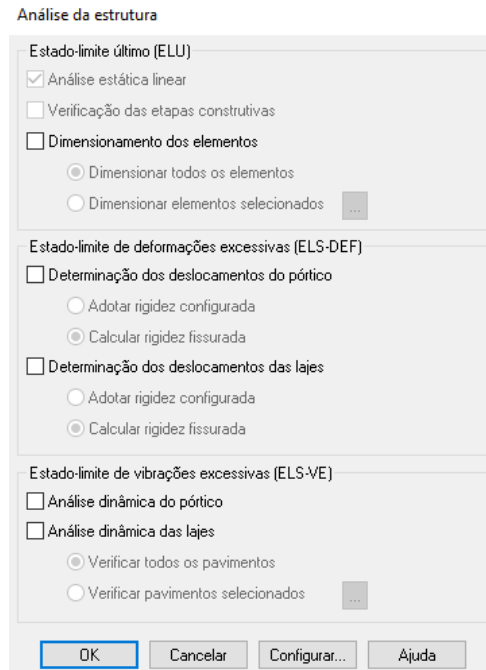
Fonte: O Autor (2022)

3.1.4 Modelagem e processamento do projeto no AltoQi Eberick

Após a definição dos parâmetros de configuração do projeto, os elementos serão lançados na entrada gráfica do programa. O lançamento dos elementos estruturais será realizado de acordo com a planta de forma representativo de cada modelo, isolando-se para a análise um pórtico plano orientado na direção perpendicular à excentricidade do pilar situado na divisa. Todas as vinculações serão definidas como engastadas, uma vez que a estrutura de concreto armado trabalha como um sistema monolítico e o vínculo de apoio das fundações será definido como rotulado. Dessa forma, o equilíbrio das forças será garantido pelo pórtico da estrutura.

Após o lançamento dos elementos serão atribuídos os carregamentos obtidos na etapa de pré dimensionamento e, lançados os carregamentos, a estrutura será processada a fim de obter-se os esforços nos elementos estruturais. O processamento será realizado no AltoQi Eberick, mantendo-se habilitada apenas a opção de Análise Estática Linear (figura 44).

Figura 44 – Opções de processamento no AltoQi Eberick



Fonte: O Autor (2022)

Uma vez processada a estrutura serão extraídos e registrados os dados da saída do programa através dos relatórios de dimensionamento e da visualização dos esforços no pórtico unifilar.

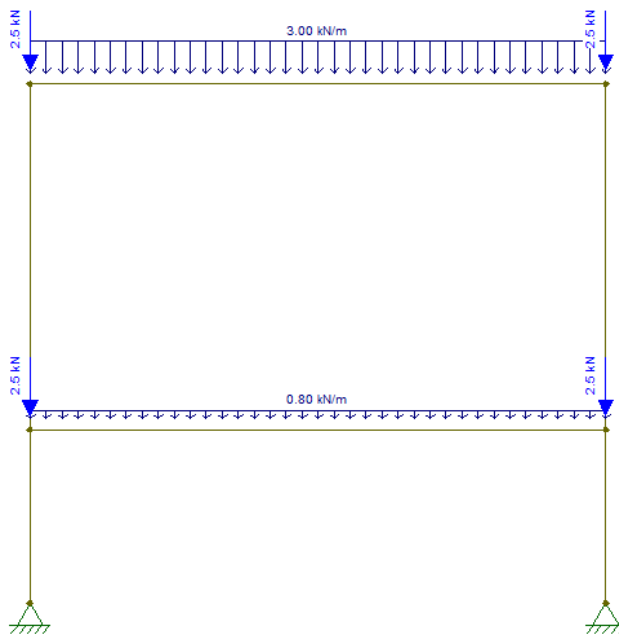
3.1.5 Modelagem e processamento no Ftool

Após a análise do projeto no AltoQi Eberick, serão modelados protótipos de pórticos planos no Ftool. Para tanto, serão calculados os valores dos momentos de inércia de cada elemento para que as barras representativas no modelo tenham o comportamento adequado no processo de análise.

Como o Ftool não possui uma solução automatizada para excentricidades nos apoios, será buscada uma solução de modelagem que aproxime os resultados encontrados com aqueles obtidos na saída de dados do AltoQi Eberick. Esse processo será realizado de maneira iterativa e, como hipótese inicial, o pórtico será modelado considerando-se o pilar centrado (figura 45), a fim de obter-se o carregamento dos pilares (figura 46). Em sequência, será calculada a excentricidade

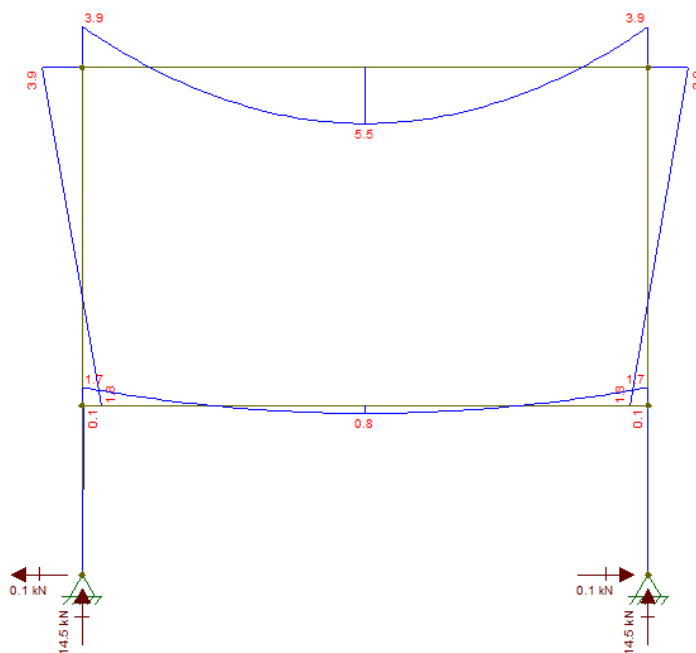
do pilar em relação à fundação e a reação do solo será lançada no pilar através de um momento definido pelo braço de alavanca da excentricidade (figura 47) para que sejam verificados os esforços sob a ação excêntrica (figura 48).

Figura 45 – Diagrama do corpo livre considerando-se a carga centrada na fundação (Ftool)



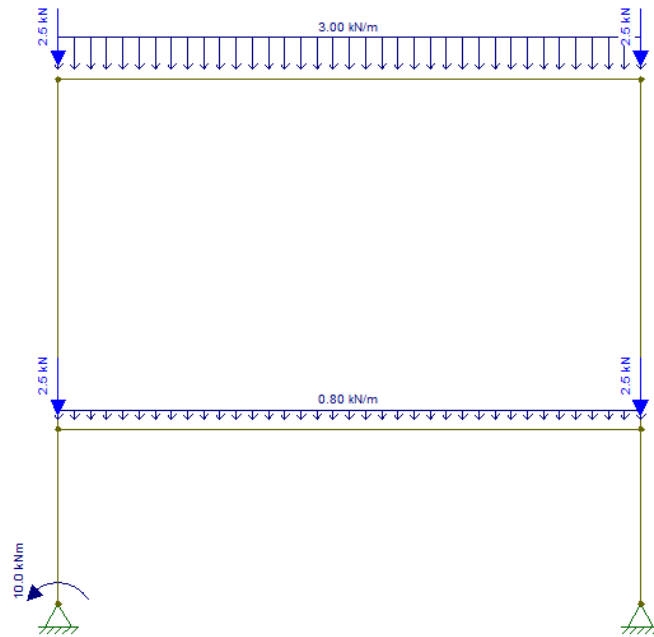
Fonte: O Autor (2022)

Figura 46 – Momentos fletores no pórtico considerando-se a carga centrada na fundação (Ftool)



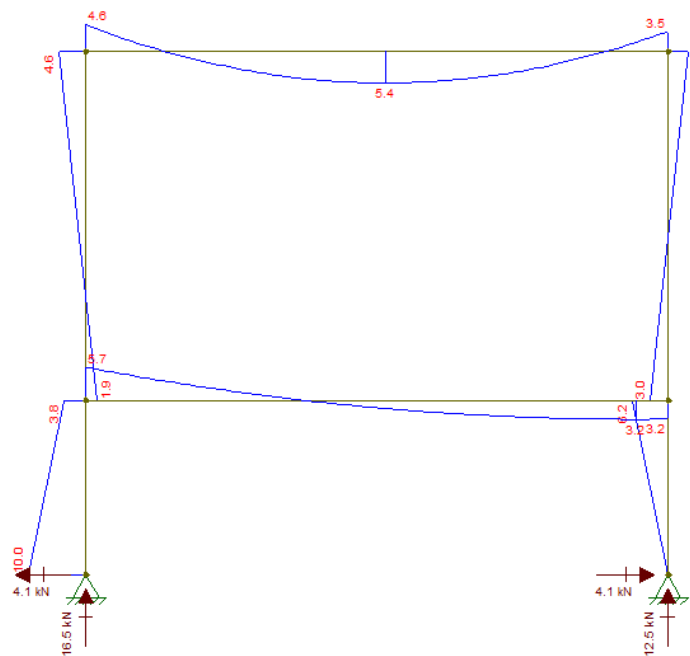
Fonte: O Autor (2022)

Figura 47 – Diagrama do corpo livre considerando-se a excentricidade em uma das fundações (Ftool)



Fonte: O Autor (2022)

Figura 48 – Momentos fletores no pórtico considerando-se a excentricidade em uma das fundações (Ftool)



Fonte: O Autor (2022)

3.1.6 Análise dos resultados

Após a verificação do modelo elaborado, os resultados serão analisados e serão elaborados novos modelos, considerando-se diferentes situações de excentricidade e diferentes intensidades na aplicação das cargas. Esse processo será realizado de maneira iterativa, até identificar-se os efeitos para cargas baixas, médias e altas.

Durante todo o processo, de forma paralela será realizada uma investigação bibliográfica, buscando identificar as motivações e os padrões para os resultados encontrados no equilíbrio estrutural dos produtos da excentricidade nas fundações.

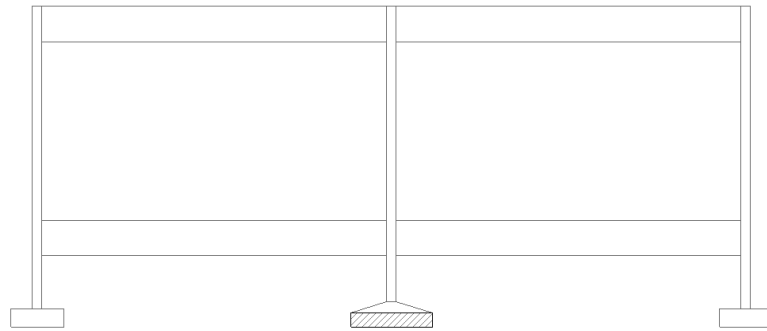
3.2 Descrição dos modelos

A fim de aferir os efeitos da excentricidade devido à condição de divisa dos pilares de uma edificação, foram elaborados modelos estruturais nos *softwares* AltoQi Eberick e FTool. Esses modelos foram produzidos buscando maneiras diferentes de representar as excentricidades, bem como diferentes condições de divisa.

Os modelos foram todos elaborados considerando os carregamentos oriundos de uma edificação de concreto armado formada por pavimentos tipo (figura 37) e por um pavimento baldrame (figura 38). Uma vez obtidos os carregamentos atuantes no modelo da edificação a estrutura foi reproduzida considerando-se somente um pórtico plano, onde foram lançados os carregamentos oriundos das reações das lajes e vigas que com ele interagem.

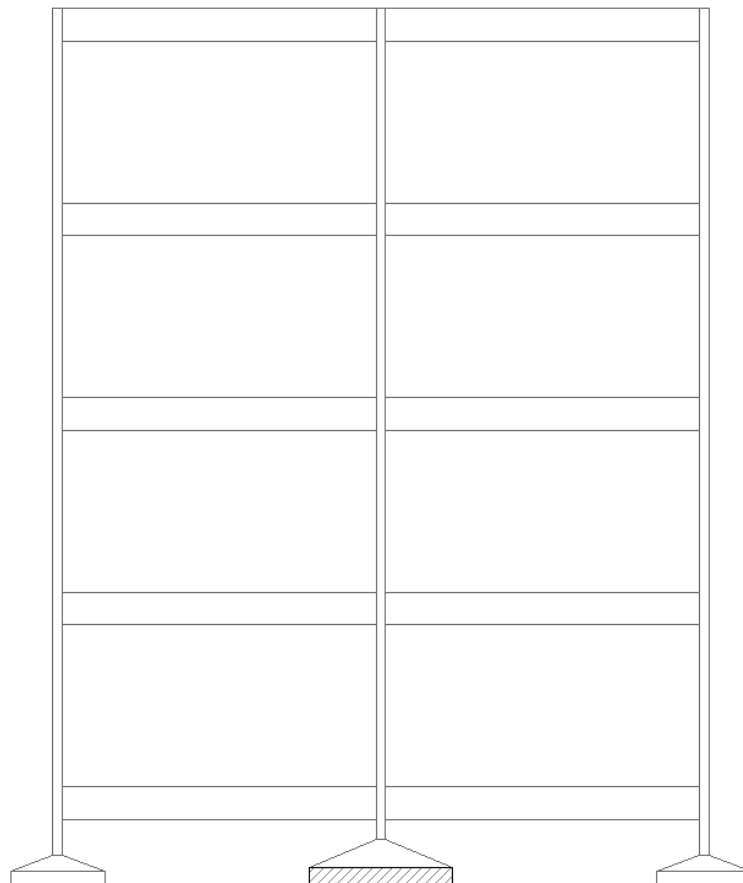
Para verificar o comportamento da estrutura sob diferentes casos de carregamento, foram consideradas edificações de um pavimento (figura 49) e uma edificação de quatro pavimentos (figura 50). Com a estrutura de pórtico definida, foram criados modelos que a reproduzem considerando diferentes critérios para a representação da situação de divisa, tanto no AltoQi Eberick, quanto no Ftool. Assim, nas imagens que aqui

Figura 49 – Vista da estrutura do pórtico dos modelos de 1 pavimento



Fonte: O Autor (2022)

Figura 50 – Vista da supraestrutura do pórtico do modelo de 4 pavimentos



Fonte: O Autor (2022)

A fim de facilitar a leitura e identificação, aos modelos foram atribuídos nomes. A nomenclatura dos modelos do AltoQi Eberick é representada por um numeral. Já para os modelos elaborados no Ftool, o nome será definido por uma

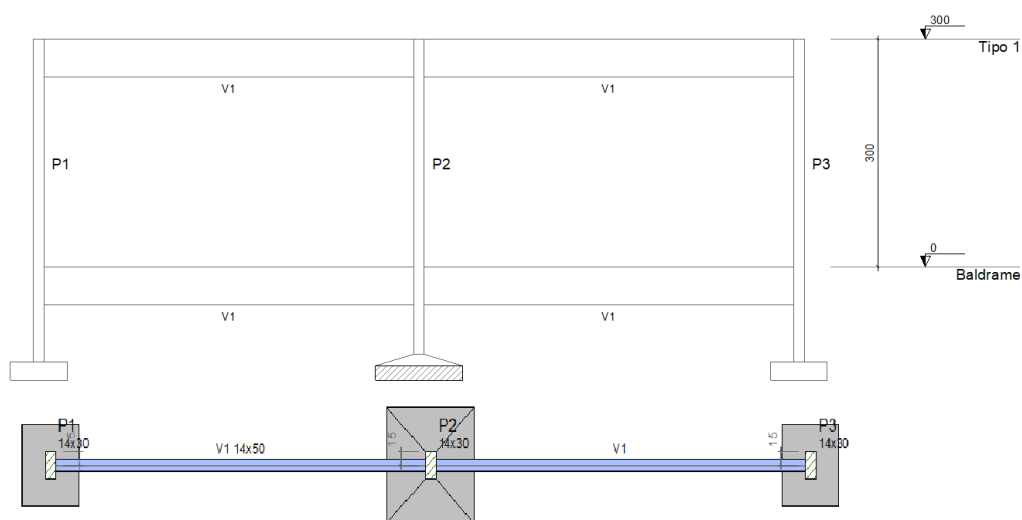
letra maiúscula. Os dados e características referentes a cada um dos modelos será descrito a seguir.

3.2.1 Modelo 1

O Modelo 1 é uma edificação de um pavimento, com todos os pilares centrados nas fundações (figura 51). Esse modelo foi elaborado com a finalidade de servir como referência no comparativo dos resultados com os modelos com sapatas de divisa.

O modelo também possui o intuito de permitir uma análise mais detalhada dos critérios utilizados pelo AltoQi Eberick na análise estrutural e dimensionamento das sapatas.

Figura 51 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 1



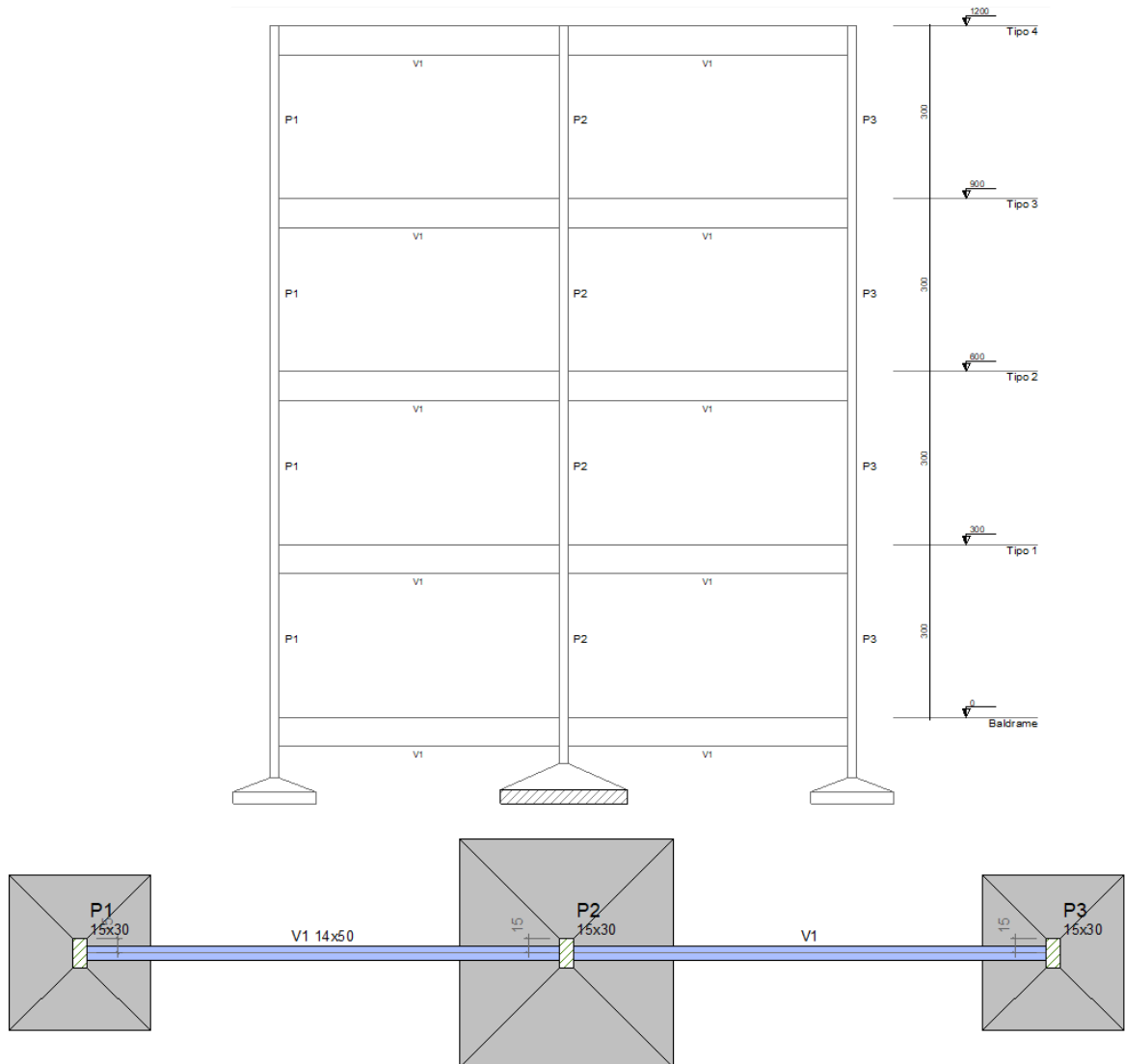
Fonte: O Autor (2022)

3.2.2 Modelo 2

O modelo 2 constitui-se do pórtico de uma edificação de 4 pavimentos, considerando todos os pilares centrados nas fundações (figura 52). Este modelo foi criado para permitir um comparativo do seu comportamento com os modelos com sapatas excêntricas de divisa para edifícios de cargas mais elevadas.

O modelo também foi utilizado para que sejam validados os roteiros de cálculo utilizados para o dimensionamento e análise estrutural dos modelos com sapatas.

Figura 52 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 2



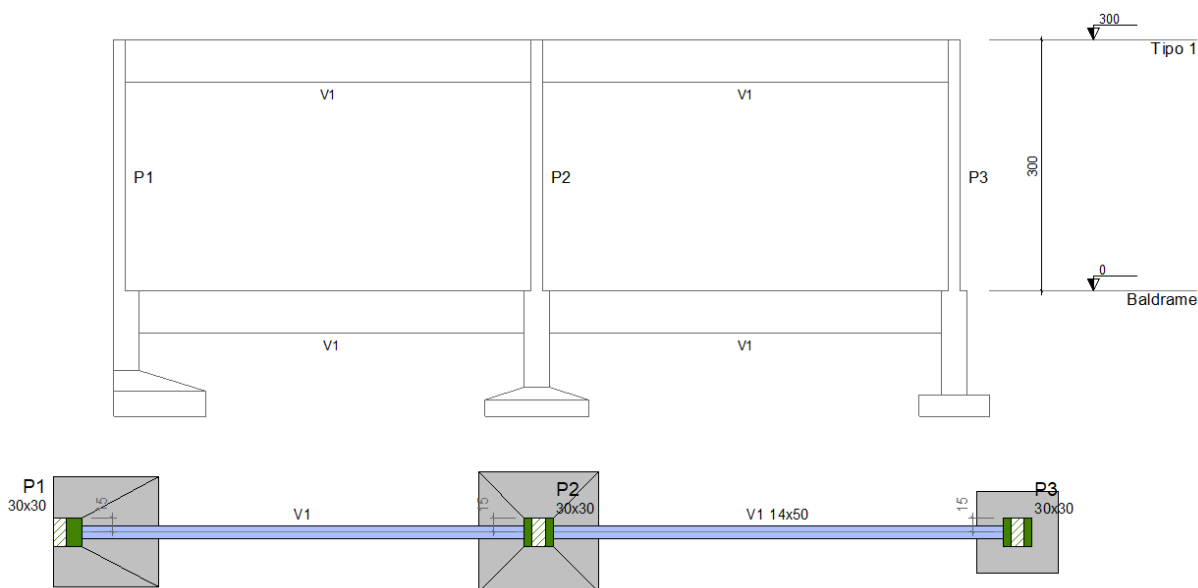
Fonte: O Autor (2022)

3.2.3 Modelo 3

O modelo 3 foi elaborado considerando-se uma edificação de um pavimento com uma das sapatas em situação de divisa com a presença de pilar de arranque (figura 53). Esse modelo foi utilizado para analisar o processo de análise e dimensionamento utilizado pelo AltoQi Eberick para sapatas em divisa com pilar de arranque, bem como os efeitos da excentricidade nos elementos do pórtico estrutural.

Para este modelo, a fim de atender-se o dimensionamento, a seção dos pilares de arranque das fundações foi aumentada para 30x30cm, em comparação à seção do Modelo 1 (14x30cm).

Figura 53 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 3



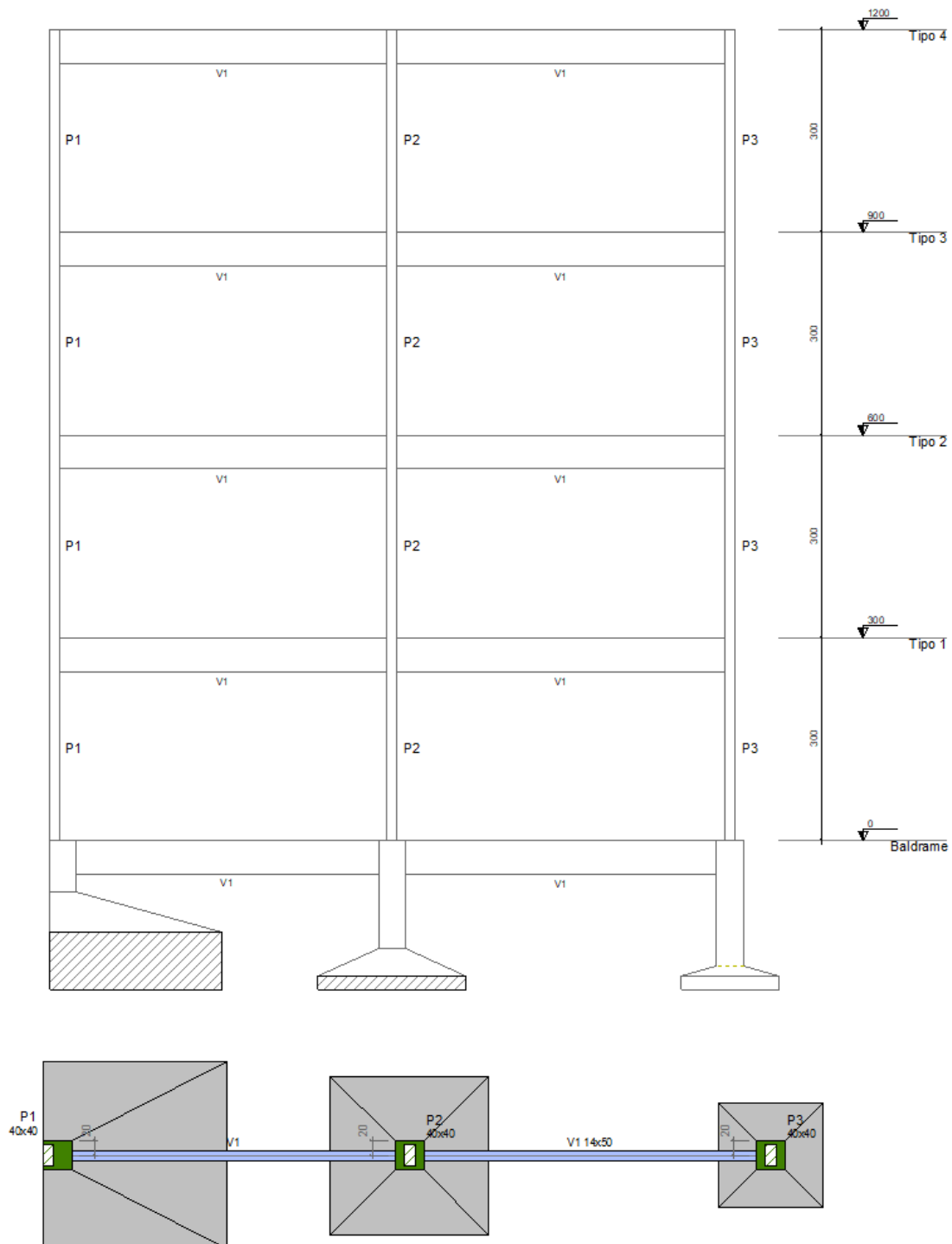
Fonte: O Autor (2022)

3.2.4 Modelo 4

O modelo 4 possui um pórtico com quatro pavimentos, considerando uma das fundações posicionada na divisa, com pilar de arranque (figura 54). Esse modelo foi elaborado com o intuito de verificar os efeitos do alto carregamento, aliado à excentricidade em sapatas de divisa com pilar de arranque, sobre os esforços atuantes no pórtico estrutural.

Para este modelo, de modo similar ao descrito para o Modelo 3, a dimensão da seção dos pilares de arranque foi aumentada para, neste caso, 40x40cm.

Figura 54 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 4



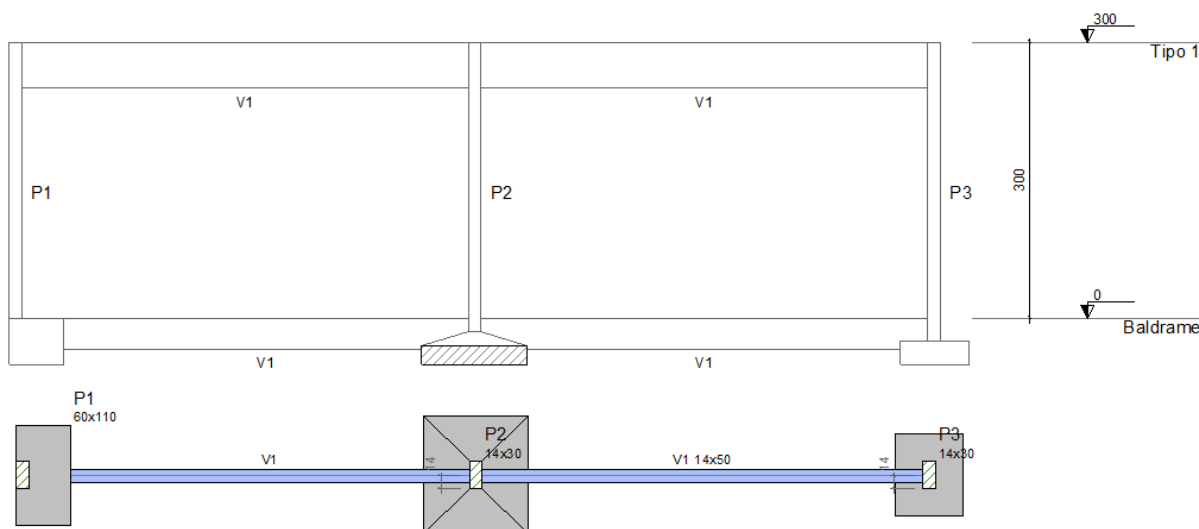
Fonte: O Autor (2022)

3.2.5 Modelo 5

O Modelo 5 foi concebido considerando uma edificação de 1 pavimento, com uma das sapatas em situação de divisa. A fundação de divisa para esse modelo não possui pilar de arranque, estando a sua face superior nivelada aos elementos do pavimento baldrame (figura 55). Para as demais sapatas foi aplicado o pilar de arranque.

Esse modelo foi elaborado com o intuito de analisar o comportamento de sapatas sem pilar de arranque no AltoQi Eberick e os efeitos da sua adoção no comportamento do pórtico estrutural.

Figura 55 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 5



Fonte: O Autor (2022)

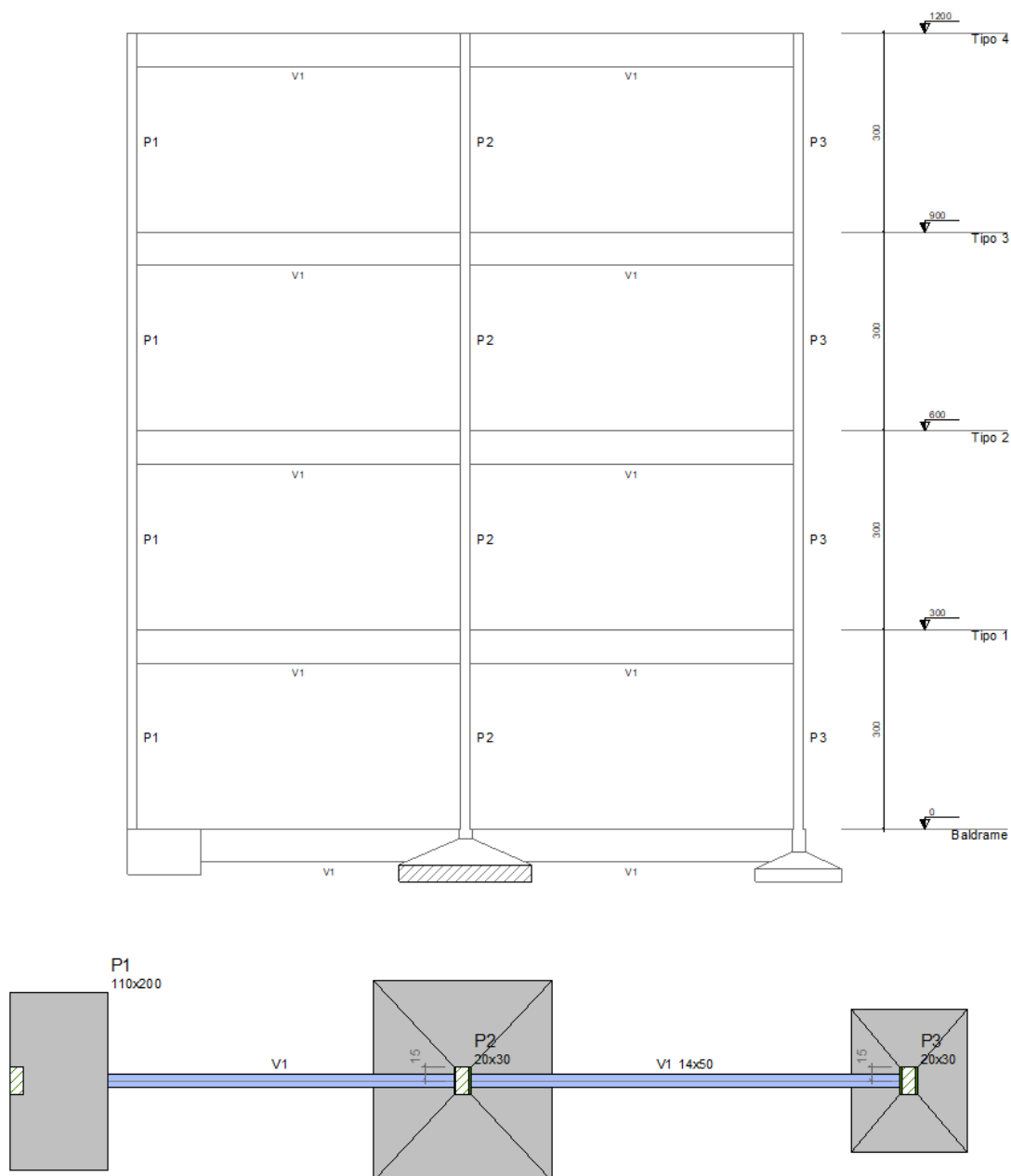
3.2.6 Modelo 6

O Modelo 6 representa uma edificação de quatro pavimentos com um dos pilares em situação da divisa. A sapata posicionada na divisa foi modelada sem pilar de arranque, com a face superior alinhada ao baldrame, e as demais sapatas, com pilar de arranque (figura 56).

Para este modelo, os pilares de arranque das fundações às quais se aplicam tiveram as dimensões da sua seção aumentadas para 20x30cm.

Este modelo foi concebido a fim de analisar o comportamento e dimensionamento das sapatas sem pilar de arranque sob cargas maiores no AltoQi Eberick, além dos efeitos da sua adoção para o comportamento dos demais elementos estruturais.

Figura 56 – Vista do pórtico e planta de formas do baldrame - Modelo 6

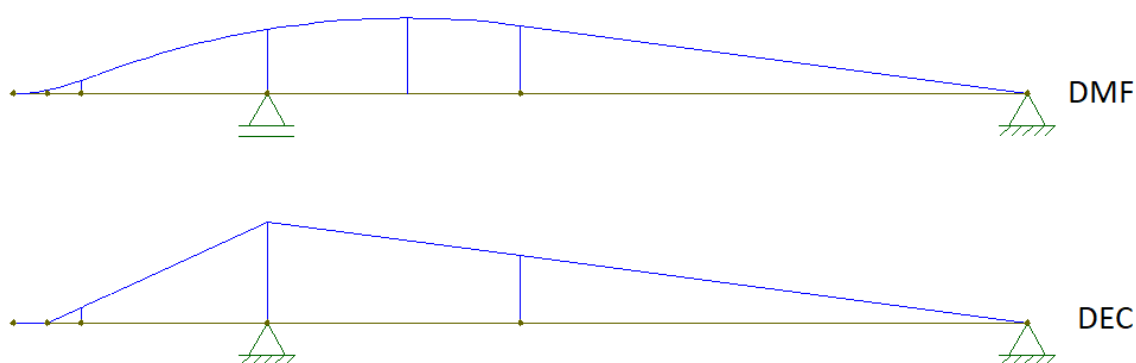


Fonte: O Autor (2022)

3.2.7 Modelo A

O Modelo A foi desenvolvido no Ftool, considerando as recomendações de Alonso (2001) para a modelagem de sapatas de divisa com viga-alavanca. De acordo com o autor, as sapatas em divisa travadas por vigas-alavanca, os pilares e fundações devem ser dimensionados considerando-se a sapata centrada, com a viga absorvendo os esforços oriundos da excentricidade (figura 57). Dessa forma, para definir os parâmetros necessários para o lançamento do modelo, é necessário definir as dimensões da base da sapata que, por sua vez, dependem dos esforços atuantes.

Figura 57 – Diagrama de momento fletor e de esforços cortantes em viga-alavanca



Fonte: O Autor (2022)

Bastos (2019) recomenda o seguinte roteiro para a definição da área da base das sapatas de divisa::

1 - Assumir um valor para a reação da sapata em divisa:

$$R_1 = 1,2 \cdot P_1$$

Sendo:

- R_1 = Reação estimada para a sapata de divisa;
- P_1 = Carga axial na base do pilar posicionado sobre a sapata de divisa.

2 - Definir a área de apoio da sapata, estimando uma majoração de 10% referente ao peso próprio da sapata:

$$S_{1'} = K_{maj} \cdot \frac{R_{1'}}{\sigma_{adm}}$$

Sendo:

- $S_{1'}$ = Área de apoio da sapata;
- K_{maj} = Coeficiente de majoração referente ao peso próprio da fundação;
- σ_{adm} = Tensão admissível do solo

3 - Calcular a largura da sapata (recomenda-se uma relação de 1:2 para as dimensões da sapata, sendo a primeira a dimensão na direção da divisa e adota-se como valor o múltiplo de 5 subsequente ao resultado):

$$B_{1'} = \sqrt{\frac{S_{1'}}{2}}$$

Sendo:

- $B_{1'}$ = Dimensão da base da sapata na direção da excentricidade.

4 - Calcular a excentricidade:

$$e_{1'} = \frac{B_{1'} - b_{pl}}{2}$$

Sendo:

- $e_{1'}$ = Excentricidade de forma da fundação de divisa;
- b_{pl} = Dimensão da seção do pilar na direção da excentricidade.

5 - Cálculo de da reação de apoio da sapata considerando a excentricidade:

$$R_{1''} = P_1 \cdot \frac{z}{z - e_{1'}}$$

Sendo:

- z = Distância entre o eixo do pilar em divisa e o eixo do pilar adjacente à viga alavanca;

6 - Comparação entre $R_{1'}$ e $R_{1''}$:

6.1: Verificação de tolerância:

$$0,95R_{1n} \leq R_1 \leq 1,05R_{1n}$$

Se a verificação de tolerância não for atendida, refazer o procedimento considerando $R_1 = R_{1n}$ e calcular nova área da base utilizando-se o valor de R_{1n} .

Após definir-se as dimensões da área da base e da excentricidade da sapata de divisa, devemos definir o valor de uma carga uniformemente distribuída que representa o esforço axial atuante na base do pilar e outra carga uniformemente distribuída representando a reação do solo na base da sapata (figura 58), de acordo com as equações descritas abaixo (ALONSO, 2001):

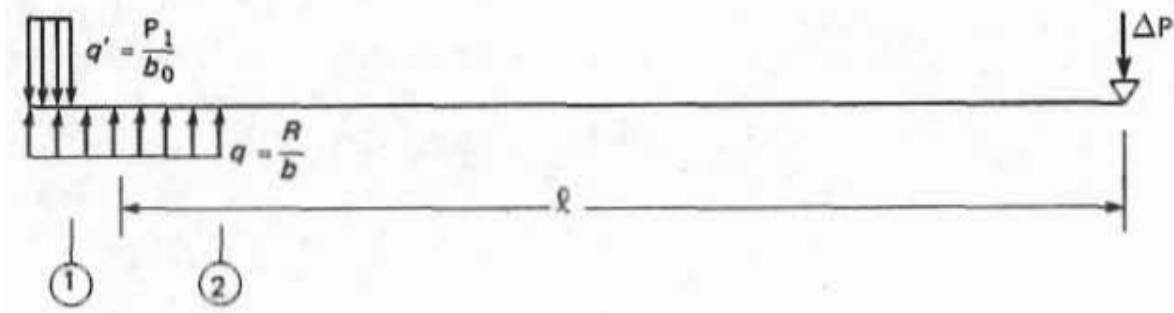
$$q_1 = \frac{P_1}{b_{pl}}$$

$$p_1 = \frac{R_1}{B_1}$$

Onde:

- q_1 = Carga uniformemente distribuída de reação do solo sobre a base da sapata;
- p_1 = Carga axial do pilar uniformemente distribuída.

Figura 58 – Diagrama de corpo livre da viga alavanca

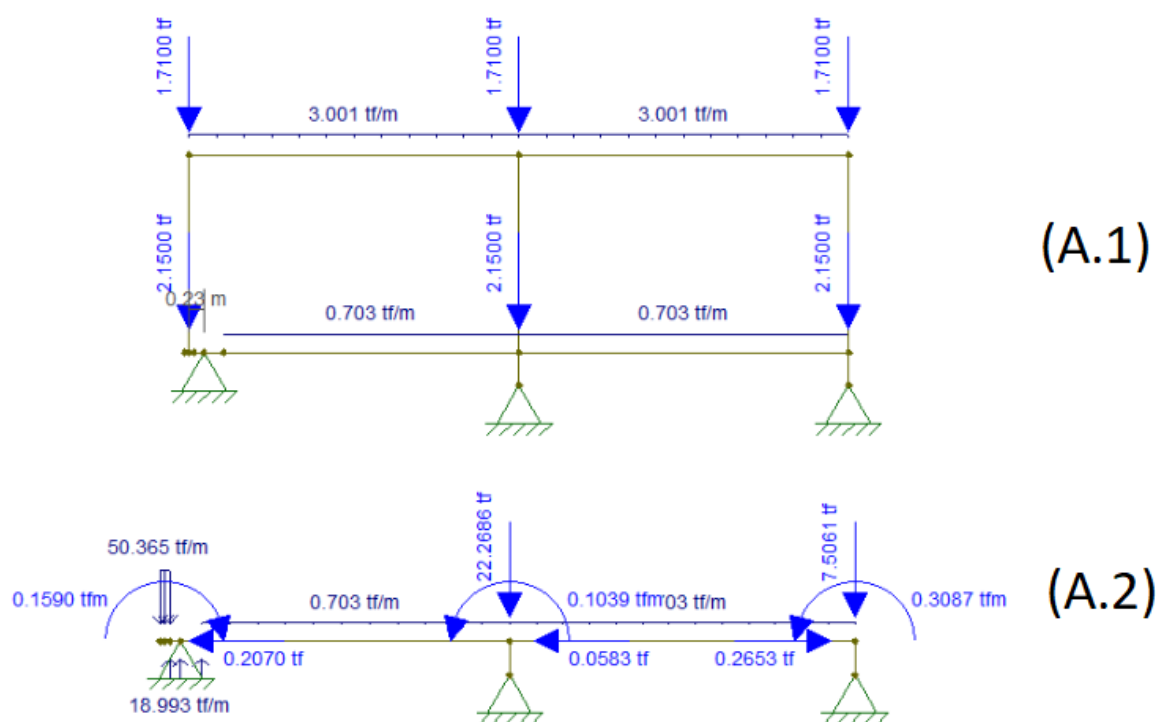


Fonte: Alonso (2001)

Como o roteiro acima considera uma situação de análise da sapata de divisa com a viga alavanca de forma isolada, adaptou-se a rotina de cálculo para possibilitar a modelagem do pórtico completo e, assim, possibilitar a análise dos efeitos da excentricidade em todo o edifício. Dessa forma, adotou-se a rotina de cálculo supracitada para obter-se as dimensões da sapata de divisa, bem como sua

excentricidade de forma. Em sequência modelou-se o pórtico (figura 59-A.1) para a obtenção da reação da sapata considerando os resultados obtidos e, assim definir-se as cargas atuantes para a modelagem da viga-alavanca, junto às demais fundações da estrutura em um modelo separado (figura 59-A.2). Nesse segundo modelo, também foram lançadas as cargas verticais, horizontais e momentos fletores oriundos dos pilares do pórtico.

Figura 59 – Diagrama de corpo livre do Modelo A: (A.1) Pórtico estrutural; (A.2) Viga-alavanca



Fonte: Alonso (2001)

3.2.8 Modelo B

Assim como realizado para o Modelo A, o Modelo B foi concebido considerando o modelo de sapata de divisa com viga-alavanca recomendado na bibliografia, separando-se a análise da viga-alavanca (figura 60-B.1) dos demais elementos do pórtico (figura 60-B.2).

3.3 Rotinas de cálculo

Para que a leitura dos resultados seja realizada de maneira consistente, se faz necessário conhecer em detalhes os critérios envolvidos no processo de análise e dimensionamento das fundações, especialmente dos elementos posicionados na divisa.

Nesse item serão abordados os critérios adotados nos programas para a obtenção dos resultados fornecidos na saída de dados para as fundações.

3.3.1 Excentricidade mínima em sapatas centradas no AltoQi Eberick

Ao realizar-se uma análise dos resultados obtidos para as sapatas centradas com pilar de arranque nos modelos do AltoQi Eberick, podemos observar que, mesmo para as fundações aplicadas em pórticos planos, existe uma solicitação de momento nas fundações em ambas as direções. Na figura 61, podemos visualizar os momentos atuantes em todas as sapatas do Modelo 1. É possível notar que, mesmo se tratando de um pórtico plano, com carregamentos atuantes somente no plano do pórtico, o programa apresenta um valor de momento atuante na direção ortogonal ao plano do pórtico. Os valores foram extraídos do Relatório de Cálculos da Sapatas diretamente no AltoQi Eberick. No relatório, o valor de MB representa o momento atuante na direção B da sapata e o valor de MH, na direção H.

Figura 61 – Solicitações apresentadas no relatório de cálculo das sapatas do Modelo A

Esforços e pressões

Nome	MB MH (kgf.m)	FB FH (tf)	Carga Carga total (tf)
S1	52.99 113.56	0.09 0.00	11.36 11.78
S2	123.07 263.72	0.00 0.00	26.37 27.34
S3	52.99 113.56	0.09 0.00	11.36 11.78

Fonte: O Autor (2022)

Com base nos valores apresentados, podemos observar que a razão entre os valores de MB e MH é igual à razão entre as dimensões da seção do pilar que se apoia sobre a sapata. No caso da sapata S1, por exemplo, temos pilares com dimensões b e h iguais a 14cm e 30cm, respectivamente. Assim, $MB/MH = b/h = 0,466$. A mesma condição pode ser reproduzida para as demais sapatas do projeto.

É possível observar ainda que a sapata S2, que possui força vertical atuante na base do pilar (representada no relatório exibido na figura 61 por Carga) maior que das sapatas S1 e S3. O mesmo efeito ocorre para as solicitações de momento nas duas direções, que é maior para a sapata S2 que para as sapatas S1 e S3.

Sobre este quesito, podemos observar ainda que a razão entre a Carga e o valor do momento em dada direção é constante, se a dimensão do pilar naquela mesma direção for constante. Por exemplo, a razão entre a Carga atuante e o valor de MB para a sapata S1 é igual a 0,214. O mesmo valor é obtido para a razão entre as mesmas grandezas da sapata S3, que possui as mesmas dimensões de seção no pilar.

Com base nas ponderações apontada acima, foi possível inferir que o programa aplica nas sapatas centradas com pilar de arranque uma excentricidade mínima diretamente proporcional à dimensão do pilar e à carga atuante, desconsiderando-se o peso próprio da sapata e o peso do solo sobre a sapata. Assim, a razão entre o momento atuante em uma dada direção e o produto da carga atuante e a dimensão da seção do pilar na mesma direção é uma constante.

$$\frac{P \cdot B}{MB} = \text{constante}$$

$$\frac{P \cdot H}{MH} = \text{constante}$$

Aplicando-se a expressões indicadas acima aos resultados exibidos na saída de dados do programa, podemos identificar que a constante adotada é igual a 0,03. Isolando-se os valores de MB e MH nas equações, podemos chegar em uma expressão que define o momento oriundo da excentricidade mínima para qualquer fundação centrada no AltoQi Eberick:

$$MB = \frac{P \cdot B}{30}$$

$$MH = \frac{P \cdot H}{30}$$

3.3.2 Definição das dimensões de sapatas centradas no AltoQi Eberick

Para definir as dimensões das sapatas centradas em planta, o AltoQi Eberick aplica um processo iterativo onde o programa arbitra dimensões iniciais para o elemento e , então realiza a verificação de pressões nos quatro vértices do elemento. Nesse processo, o software adota a rotina de cálculos recomendada por Montoya (1971). Nessa rotina, inicialmente definem-se os valores da excentricidade, obtidos através da expressão abaixo, para as duas direções da sapata:

$$e = \frac{M}{N_{tot}}$$

Onde:

- e = Excentricidade da sapata na direção considerada;
- M = Momento atuante na direção considerada;
- N_{tot} = Carga vertical total atuante na sapata, considerando-se a carga transmitida pelo pilar adicionada às componentes de peso próprio da sapata e peso do solo sobre a sapata.

Obtido o valor da excentricidade nas duas direções, é realizada uma verificação de limite para definir as equações que serão aplicadas, definida pela expressão abaixo:

$$\frac{e_x}{H} + \frac{e_y}{B} \leq 0,1667$$

Onde:

- e_x, e_y = Excentricidade da sapata na direção considerada;
- H = Dimensão da sapata na direção x ;
- B = Dimensão da sapata na direção y .

Caso a condição descrita acima seja satisfeita, as pressões nos vértices pode ser obtida através das expressões abaixo:

$$\sigma_1 = \frac{N_{tot}}{B \cdot H} \cdot \left(1 + \frac{6e_x}{B} + \frac{6e_y}{H} \right)$$

$$\sigma_2 = \frac{N_{tot}}{B \cdot H} \cdot \left(1 + \frac{6e_x}{B} - \frac{6e_y}{H} \right)$$

$$\sigma_3 = \frac{N_{tot}}{B \cdot H} \cdot \left(1 - \frac{6e_x}{B} + \frac{6e_y}{H} \right)$$

$$\sigma_4 = \frac{N_{tot}}{B \cdot H} \cdot \left(1 - \frac{6e_x}{B} - \frac{6e_y}{H} \right)$$

Sendo:

- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ e σ_4 = Pressões no solo sob os vértices da sapata.

No Eberick, caso todos os valores de pressão obtidos sejam inferiores à pressão admissível do solo e iguais ou maiores que zero, o critério de pressões da base é atendido e o programa então realiza as verificações de estabilidade.

Caso a condicional não seja satisfeita, é necessário obter-se os adimensionais η_x e η_y através das expressões abaixo:

$$\eta_x = \frac{e_x}{H}$$

$$\eta_y = \frac{e_y}{B}$$

Obtidos os valores dos adimensionais, consulta-se o Ábaco de Montoya para a obtenção do coeficiente λ_1 que deve ser aplicado na seguinte expressão para a obtenção da tensão máxima atuante na base da sapata e, nesse caso, considera-se a pressão no vértice oposto igual a zero.

$$\sigma_{max} = \frac{N_{tot}}{\lambda_1 \cdot B \cdot H}$$

Caso a tensão máxima não extrapole a tensão admissível do solo majorada em 1,3 (MONTROYA, 1971), o programa aceita as dimensões da sapata e avança para as verificações de estabilidade do elemento.

Atendidos os critérios de pressão na base da sapata, o programa realiza então as verificações de tombamento e deslizamento. Para ambos os casos, considera-se um fator de segurança igual a 1,5.

Para a definição do momento estabilizante ao tombamento da sapata, o programa adota as seguintes expressões (ALTOQI, 2022):

$$M_{rd,B} = \frac{N_{tot} \cdot B}{2}$$

$$M_{rd,H} = \frac{N_{tot} \cdot H}{2}$$

$$\frac{F_r}{F_{tot}} \geq 1,5$$

Sendo:

- $M_{rd,B}$ e $M_{rd,H}$ = Momentos estabilizantes ao tombamento da sapata nas direções B e H, respectivamente.

Caso a razão entre o momento estabilizante e o momento atuante para cada uma das direções respeitar ao fator de segurança, as dimensões da sapata são aceitas no dimensionamento.

Para a definição da força resistente ao escorregamento na sapata, o programa adota a seguinte expressão (ALTOQI, 2019):

$$F_R = N_{tot} \cdot \tan(r \cdot \theta)$$

Sendo:

- F_R = Força resistente ao desligamento da sapata;
- r = Coeficiente redutor do ângulo de atrito;
- θ = Ângulo de atrito interno do solo.

Para definir a força horizontal atuante na sapata, o programa define uma força resultante da soma vetorial das cargas horizontais atuantes na direção B e na direção H da sapata, conforme expressão abaixo:

$$F_{tot} = \sqrt{FB^2 + FH^2}$$

Sendo:

- F_{tot} = Resultante das cargas horizontais atuantes na sapata;
- FB = Componente da força horizontal na direção B da sapata;
- FH = Componente da força horizontal na direção H da sapata.

Caso a razão entre a força resistente ao deslizamento e a resultante das cargas horizontais atuantes na sapata atender ao fator de segurança, as dimensões atribuídas para a sapata são aceitas.

3.3.3 Análise e dimensionamento das sapatas de divisa com pilar de arranque

De maneira similar às sapatas centradas, o programa aplica uma rotina iterativa para a definição das dimensões das sapatas de divisa. No entanto, para esse caso, existe um componente adicional que é a condição de equilíbrio dos esforços oriundos da excentricidade de forma existente entre o centro geométrico do pilar e da sapata. Para resolver essa condição, o programa utiliza o processo de Montoya de maneira inversa.

É possível observar, através do Relatório de Cálculos das Sapatas, que, para fundações excêntricas, o programa inicialmente considera o elemento como se fosse centrado. Na figura 62, podemos verificar o exemplo da sapata S1, do modelo 3, que apresenta momentos solicitantes zerados em ambas as direções.

Figura 62 – Momentos atuantes na sapata S1, do Modelo 3

Nome	MB MH (kgf.m)
S1	0.00 0.00

Fonte: O Autor (2022)

A partir da condição de sapata centrada, o programa irá buscar através do Ábaco de Montoya, parametrizado pelas dimensões arbitradas, um valor de λ_1 que, aplicado às equações, resulte em uma pressão máxima igual à pressão limite, conforme expressão abaixo (adaptada da expressão descrita no item 3.3.2):

$$B \cdot H = \frac{P}{1,3 \cdot \sigma_{adm} \cdot \lambda_1}$$

Com base na expressão acima, é possível isolar o valor de λ_1 em termos das dimensões da base da sapata:

$$\lambda_1 = \frac{P}{1,3 \cdot \sigma_{adm} \cdot B \cdot H}$$

Como o valor da tensão admissível do solo é conhecido, o programa passa a arbitrar, de maneira iterativa, valores para as dimensões B e H. Assim, com base nos valores arbitrados e conhecendo-se o valor de λ_1 , o programa busca no Ábaco de Montoya (figura 31) os valores dos adimensionais η_x e η_y que, combinados, resultam em λ_1 .

Com os valores adimensionais adquiridos e com as dimensões fixadas para a sapata, o programa calcula a excentricidade nas duas direções, de acordo com as expressões descritas abaixo:

$$e_x = \eta_x \cdot B$$

$$e_y = \eta_y \cdot H$$

Obtidas as excentricidades e considerando os carregamentos verticais atuantes na sapata, o programa calcula o momento oriundo da excentricidade de forma, de acordo com as expressões abaixo:

$$M_B = e_x \cdot N_{tot}$$

$$M_H = e_y \cdot N_{tot}$$

Uma vez definidos os momentos oriundos das excentricidades da sapata em divisa, o programa aplica-os ao nó de apoio do pilar de arranque, equilibrando assim a excentricidade de forma no próprio pórtico.

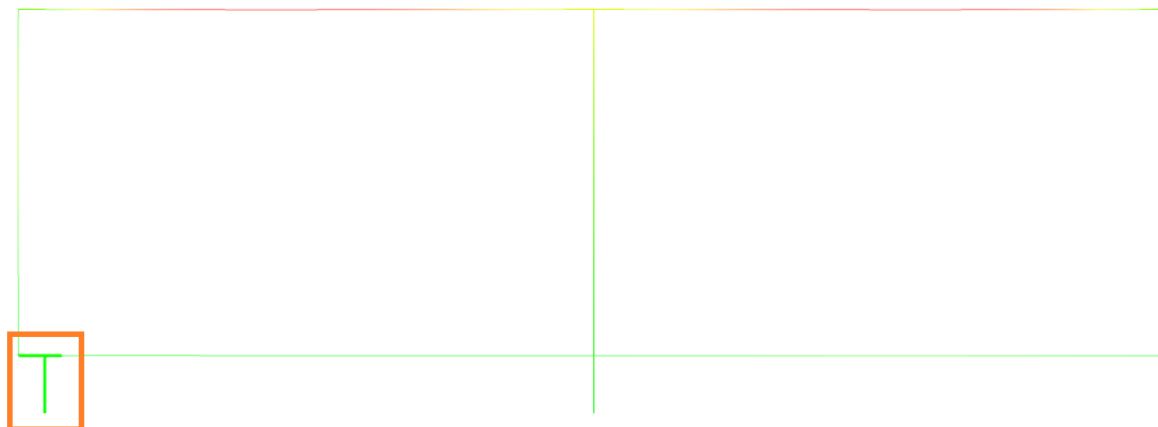
Em seguida, o programa realizará a verificação de estabilidade ao deslizamento da sapata, conforme descrito no item 3.3.2 e, caso a segurança ao deslizamento seja atendida, as dimensões arbitradas serão aceitas. Caso contrário, o software realizará um incremento nas dimensões, aumentando o peso próprio e, por consequência, a carga total atuante na sapata, até que a estabilidade seja garantida.

3.3.4 Análise e dimensionamento das sapatas de divisa sem pilar de arranque

Na representação das sapatas sem pilar de arranque no modelo estrutura, o AltoQi Eberick utiliza-se de barras rígidas na extensão da fundação. As

barras rígidas ficam vinculadas à base do pilar que se apoia à sapata e à extremidade da viga. Essas barras então se conectam verticalmente ao apoio da fundação (figura 63).

Figura 63 – Pórtico unifilar do Modelo 5 no AltoQi Eberick



Fonte: O Autor (2022)

Nos quesitos que tangem a análise desse elemento de fundação, o software considera o elemento de forma centrada, de modo similar às recomendações referentes à sapatas de divisa com viga-alavanca, documentadas na bibliografia por autores consagrados.

Diferente dos modelos de fundações do Eberick com pilar de arranque, apresentados anteriormente, o dimensionamento das dimensões da sapata sem pilar de arranque não é realizado de maneira automática e iterativa pelo software. Nesse caso, ao lançar o elemento na entrada gráfica do programa, o usuário deve definir e informar as dimensões que serão adotadas (figura 64).

Figura 64 – Entrada de dados para o lançamento de fundações sem pilar de arranque no AltoQi Eberick

Fundação

Dados

Nome Ângulo de rotação °

Tipo Elevação cm

Vínculo ... Considerar estacas no modelo ...

Sapata

Lado B cm

Lado H cm

Altura maior (H1) cm

Usar colarinho

Altura menor (H0) cm

LB Colarinho cm

LH Colarinho cm

Excentricidades

Manual

B cm

H cm

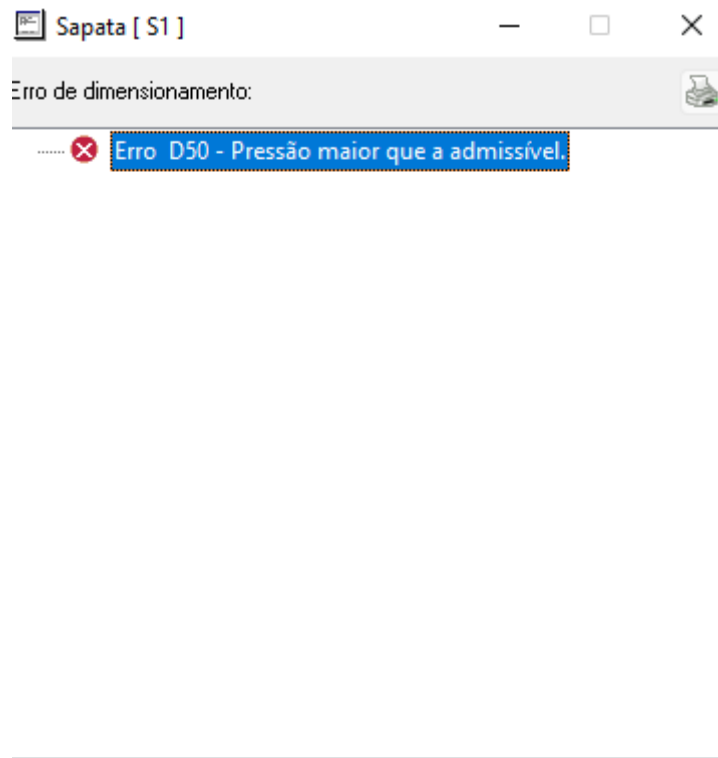
OK Cancelar Desenho... Cargas... Ajuda

Fonte: O Autor (2022)

Uma vez lançados e processados, os elementos de fundação receberão a aplicação de momentos devido à excentricidade mínima, calculados de acordo com as expressões apresentadas no item 3.3.1.

Com as excentricidades aplicadas, o programa verifica as pressões na base e as condições de estabilidade ao tombamento e deslizamento. Caso qualquer desses critérios não seja atendido, o programa emitirá uma mensagem de erro, informando o usuário sobre a condição de não conformidade às verificações (figura 65). Dessa forma, o usuário deve tomar as medidas necessárias para que o elemento atenda aos critérios de dimensionamento.

Figura 65 – Mensagem de erro no dimensionamento de sapata no AltoQi Eberick



Fonte: O Autor (2022)

4 RESULTADOS

Neste item serão apresentados os resultados dos processos realizados durante a elaboração do trabalho. Os dados estão separadas entre a validação dos métodos de cálculo utilizados pelo AltoQi Eberick e adotados para a modelagem de estruturas no Ftool, e um comparativo entre os efeitos observados no pórtico estrutural quando aplicados diferentes critérios de modelagem para a fundação em situação de divisa.

4.1. Validação dos métodos de cálculo

Para uma melhor compreensão dos critérios e mecanismos utilizados pelo AltoQi Eberick, foram realizadas validações dos processos de cálculo utilizados para cada um dos critérios de modelagem para sapatas de divisa adotados na construção dos modelos apresentados neste trabalho. Esse processo foi realizado de forma que seja possível realizar uma comparação com as recomendações consagradas na bibliografia

As memórias de cálculo aqui registradas serão apresentadas em apenas um elemento isolado para cada caso. No entanto, os processos utilizados foram reproduzidos e validados em todos os elementos modelados. A supressão da descrição das rotinas de cálculo se dá em nome da legibilidade do documento, a fim de evitar sucessivas repetições.

4.1.1 Sapata centrada - AltoQi Eberick

Para validar a adoção da rotina de cálculo descrita no item 3.3.2 para os projetos do AltoQi Eberick, é possível exemplificar o dimensionamento da sapata S1, lançada no Modelo 1. Para esse elemento, o programa atribuiu os valores de 75cm para a dimensão B e 90cm para a direção H. Os esforços atuantes no elemento podem ser observados na figura 66, extraída do Relatório de Cálculos da sapata no Eberick.

Figura 66 – Solicitações apresentadas no relatório de cálculo das sapatas do Modelo A

Nome	MB MH (kgf.m)	FB FH (tf)	Carga Carga total (tf)
S1	52.99 113.56	0.09 0.00	11.36 11.78

Fonte: O Autor (2022)

Inicialmente, calculamos as excentricidades para a sapata, conforme segue (na expressão os valores de MB e MH foram convertidos de kgf.m para tf.cm):

$$e_x = \frac{M_B}{N_{tot}} = \frac{5,299}{11,78} = 0,4498 \text{ cm}$$

$$e_y = \frac{M_H}{N_{tot}} = \frac{11,356}{11,78} = 0,964 \text{ cm}$$

Em seguida, verificou-se a condicional dos adimensionais para definir as expressões a serem adotadas para o cálculo das pressões na base da sapata:

$$\frac{e_x}{H} + \frac{e_y}{B} = \frac{0,4498}{75} + \frac{0,964}{90} = 0,02 \leq 0,1667$$

Como a soma dos adimensionais é inferior a 0,1667, descarta-se a necessidade de consultar o Ábaco de Montoya, podendo aplicar-se as expressões abaixo para a definição das pressões na base da sapata (nas expressões, os valores aplicados encontram-se em kgf e cm):

$$\sigma_1 = \frac{11356}{75 \cdot 90} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot 0,4498}{75} + \frac{60,964}{90}\right) = 1,9201 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{11356}{75 \cdot 90} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot 0,4498}{75} - \frac{60,964}{90}\right) = 1,6958 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_3 = \frac{11356}{75 \cdot 90} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot 0,4498}{75} + \frac{60,964}{90}\right) = 1,7945 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_4 = \frac{11356}{75 \cdot 90} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot 0,4498}{75} - \frac{60,964}{90}\right) = 1,5702 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

É possível ratificar os resultados obtidos através do Relatório de Cálculos das sapatas. Podemos observar na figura 67, que os resultados obtidos manualmente são iguais aos resultados do programa, com uma pequena variação decimal devido aos critérios de arredondamento adotados. É importante observar ainda, que todas as pressões obtidas são inferiores a tensão admissível do solo, que é igual a 2kgf/cm².

Figura 67 – Pressões na base da Sapata S1 do Modelo 1

Nome	Pressão Sig1 (kgf/cm ²)	Pressão Sig2 (kgf/cm ²)	Pressão Sig3 (kgf/cm ²)	Pressão Sig4 (kgf/cm ²)
S1	1.79 (lim = 2.00)	1.92 (lim = 2.00)	1.70 (lim = 2.00)	1.57 (lim = 2.00)

Fonte: O Autor (2022)

Em seguida, realizou-se as verificações ao tombamento da sapata, expressas pelas equações abaixo. Os valores apresentados estão convertidos para kgf e m:

$$M_{rd,B} = \frac{N_{tot} \cdot B}{2} = \frac{11365 \cdot 0,75}{2} = 4417,5 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$M_{rd,H} = \frac{N_{tot} \cdot H}{2} = \frac{11365 \cdot 0,9}{2} = 5301,0 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

É possível verificar ainda que a razão entre momento resistente e atuante é superior ao fator de segurança, que é igual a 1,5. Dessa forma, as dimensões aplicadas à base da sapata são aceitáveis para esta verificação de estabilidade.

$$\frac{4417,5}{52,99} = 83,3648 \geq 1,5$$

$$\frac{5301,0}{113,56} = 46,6802 \geq 1,5$$

Pode-se verificar a convergência do cálculo manual com os resultados do programa através do Relatório de Cálculos das sapatas fornecido pelo AltoQi Eberick (figura 68).

Figura 68 – Verificações de tombamento da Sapata S1 do Modelo 1

Nome	Tombamento B		Tombamento H	
	Mrd Msd (kgf.m)	Mrd / Msd	Mrd Msd (kgf.m)	Mrd / Msd
S1	4416.53 52.99	83.34 (lim = 1.50)	5299.83 113.56	46.67 (lim = 1.50)

Fonte: O Autor (2022)

Em seguida, observa-se a verificação de deslizamento da sapata. Inicialmente, definiu-se a força horizontal resultante, obtida através da expressão abaixo:

$$F_{tot} = \sqrt{FB^2 + FH^2} = \sqrt{0,09^2 + 0^2} = 0,09 \text{ tf}$$

Considerando-se o ângulo de atrito interno igual a 30° e um coeficiente redutor igual a 2/3, obtém-se a força resistente ao deslizamento através da seguinte expressão:

$$F_R = N_{tot} \cdot \tan(r \cdot \theta) = 11,78 \cdot \tan\left(\frac{2}{3} \cdot 30\right) = 4,2876 \text{ tf}$$

É possível verificar que a razão entre a força horizontal resistente e a resultante no elemento é superior ao coeficiente de segurança:

$$\frac{4,2876}{0,09} = 47,6397 \geq 1,5$$

A convergência dos resultados da verificação de deslizamento da sapata por meio de cálculo manual e dos resultados obtidos no AltoQi Eberick pode ser observada no Relatório de Cálculos das Sapatas emitido pelo software (figura 69).

Figura 69 – Verificação de deslizamento da Sapata S1 do Modelo 1

Nome	Deslizamento	
	Frd Fsd (tf)	Frd / Fsd
S1	4.31 0.09	47.56 lim = (1.50)

Fonte: O Autor (2022)

4.1.2 Sapata de divisa com pilar de arranque - AltoQi Eberick

Para validar o roteiro apresentado para os modelos do AltoQi Eberick, é possível realizar-se uma análise sobre os resultados obtidos para a sapata S1, do Modelo 3. Inicialmente, por desconhecer as dimensões a serem aplicadas para a sapata, o programa assume valores de momento atuantes iguais a zero no elemento, conforme ratifica-se através do Relatório de Cálculos das sapatas, fornecido pelo programa (figura 69).

Figura 70 – Momentos atuantes na Sapata S1 do Modelo 3

Nome	MB MH (kgf.m)
S1	0.00 0.00

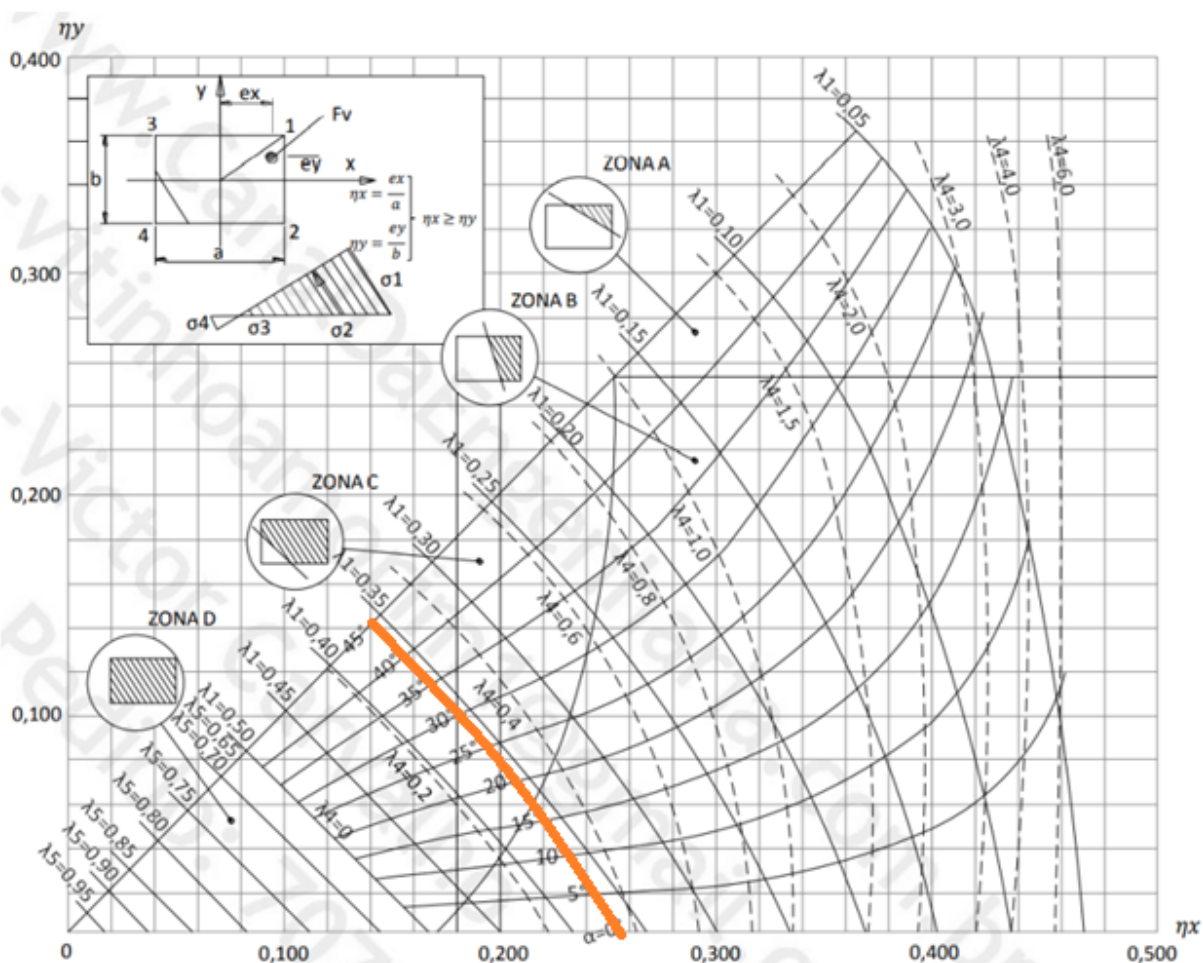
Fonte: O Autor (2022)

Ao arbitrar-se os valores das dimensões da base da sapata como sendo B=110cm e H=115cm, é possível obter o valor de λ_1 através da expressão abaixo (grandezas aplicadas em unidades de kgf e cm):

$$\lambda_1 = \frac{P}{1,3 \cdot \sigma_{adm} \cdot B \cdot H} = \frac{11190}{1,3 \cdot 2 \cdot 110 \cdot 115} = 0,368$$

Obtido o valor de λ_1 , é necessário recorrer ao Ábaco de Montoya para que sejam definidos os valores dos adimensionais (figura 71). No caso da sapata em estudo, a excentricidade ocorre apenas na direção x assim é possível fixar o valor de η_y em 0. É possível visualizar no ábaco que, para a combinação de $\lambda_1 = 0,368$ e $\eta_y = 0$, o valor de $\eta_x = 0,27$ será igual a aproximadamente 0,27.

Figura 71 – Definição dos adimensionais através do Ábaco de Montoya



Fonte: Adaptado de Giacomassi (2021)

Fixados os adimensionais bem como as dimensões da base da sapata, é possível definir o valor das excentricidades, de acordo com as expressões abaixo:

$$e_x = \eta_x \cdot B = 0,27 \cdot 110 = 29,7\text{cm}$$

$$e_y = \eta_y \cdot H = 0 \cdot 115 = 0$$

Obtidas as excentricidades, define-se o momento a ser aplicado na base do pilar de arranque, conforme segue. O valor da carga total atuante na sapata foi extraído do Relatório de Cálculos das sapatas (figura 72).

Figura 72 – Cargas atuantes na Sapata S1 do Modelo 3

Nome	Carga Carga total (tf)
S1	12.09 13.39

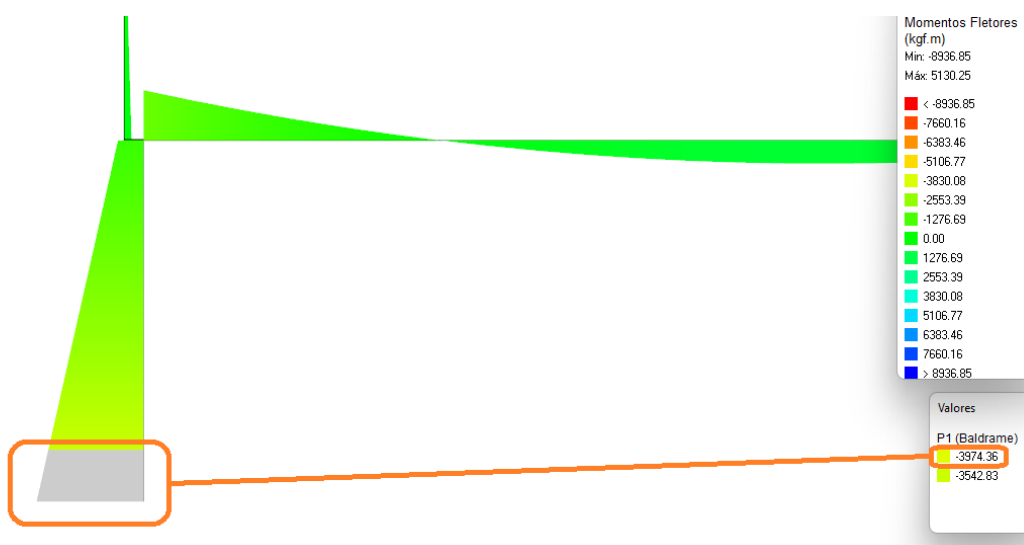
Fonte: O Autor (2022)

$$M_B = e_x \cdot N_{tot} = 0,297 \cdot 13390 = 3976,3 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$M_H = e_y \cdot N_{tot} = 0 \cdot 13390 = 0$$

É possível ratificar o valor calculado através do diagrama de momentos fletores no pórtico unifilar do AltoQi Eberick (figura 73). Em tempo, os valores exibidos no pórtico divergem ligeiramente do calculado pois o programa possui uma solução numérica para a realização dos procedimentos enquanto, no processo de validação acima descrito, a consulta ao ábaco é realizada de forma visual, levando a imprecisão na definição dos valores dos dimensionais.

Figura 73 – Aplicação do momento devido à excentricidade no pórtico do AltoQi Eberick



Fonte: O Autor (2022)

Após a definição do momento da excentricidade, realiza-se a verificação de estabilidade da sapata ao deslizamento, de acordo conforme a expressão que segue.

$$F_R = N_{tot} \cdot \tan(r \cdot \theta) = 13,39 \cdot \tan\left(\frac{2}{3} \cdot 30\right) = 4,87 \text{ tf}$$

Definida a carga horizontal resistida pela sapata, é possível verificar que o elemento atende o fator de segurança para a estabilidade. É possível ratificar os resultados obtidos na verificação manual através do Relatório de Cálculos das Sapatas (figura 74)

$$\frac{4,87}{2,02} = 2,43 \geq 1,5$$

Figura 74 – Verificação de estabilidade ao deslizamento da Sapata 01 no AltoQi Eberick

Nome	Deslizamento	
	Frd Fsd (tf)	Frd / Fsd
S1	4.90 2.02	2.43 lim = (1.50)

Fonte: O Autor (2022)

Dessa forma, como a verificação de deslizamento foi atendida, é possível definir que as dimensões inicialmente arbitradas para a sapata, de 110cm e 115cm, são suficientes para as solicitações. Caso contrário seria necessário incrementar os seus valores e realizar nova rotina de verificação da estabilidade.

4.1.3 Sapata de divisa sem pilar de arranque - AltoQi Eberick

A fim de demonstrar os critérios adotados pelo AltoQi Eberick no dimensionamento de sapatas de divisa sem pilar de arranque, será apresentada a rotina de verificações aplicadas ao caso da Sapata S1, do Modelo 5.

O elemento foi lançado inicialmente considerando-se as dimensões B=65cm e H=110cm. As cargas atuantes no elemento podem ser verificadas através do Relatório de Cálculos das Sapatas, fornecidos pelo software (figura 75).

Figura 75 – Esforços atuantes na sapata S1 do Modelo 5 do AltoQi Eberick

Nome	MB MH (kgf.m)	FB FH (tf)	Carga Carga total (tf)
S1	53.50 114.65	0.53 0.01	11.46 12.93

Fonte: O Autor (2022)

Na figura 75, é possível observar que o programa aplica os momentos MB e MH, conforme critério de excentricidade mínima, como ratifica-se através das expressões abaixo, considerando-se que o pilar apoiado sobre a sapata possui dimensões iguais a 14cm na direção b e 30cm na direção h (valores expressos em kgf e m):

$$MB = \frac{P \cdot B}{30} = \frac{11460 \cdot 0,14}{30} = 53,48 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$MH = \frac{P \cdot H}{30} = \frac{11460 \cdot 0,30}{30} = 114,6 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Obtidos os valores dos momentos mínimos, são verificadas as excentricidades para ambas as direções da sapata, conforme cálculo demonstrado abaixo (valores expressos em tf e cm):

$$e_x = \frac{M_B}{N_{tot}} = \frac{5,348}{12,93} = 0,4136 \text{ cm}$$

$$e_y = \frac{M_H}{N_{tot}} = \frac{11,46}{12,93} = 0,8957 \text{ cm}$$

Obtidas as excentricidades, verifica-se as condicionantes de utilização do Ábaco de Montoya, conforme expressão abaixo:

$$\frac{e_x}{H} + \frac{e_y}{B} = \frac{0,4136}{65} + \frac{0,8957}{110} = 0,02 \leq 0,1667$$

Como a soma das razões entre as excentricidades e a dimensão da sapata em cada direção da sapata foi inferior a 0,1667, é possível aplicar as seguintes expressões para a determinação das pressões na base das sapatas (valores expressos em termos de kgf e cm).

$$\sigma_1 = \frac{N_{tot}}{B \cdot H} \cdot \left(1 + \frac{6e_x}{B} + \frac{6e_y}{H}\right) = \frac{12930}{65 \cdot 110} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot 0,4136}{65} + \frac{6 \cdot 0,8957}{110}\right) = 1,9685 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{N_{tot}}{B \cdot H} \cdot \left(1 + \frac{6e_x}{B} - \frac{6e_y}{H}\right) = \frac{12930}{65 \cdot 110} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot 0,4136}{65} - \frac{6 \cdot 0,8957}{110}\right) = 1,7891 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_3 = \frac{N_{tot}}{B \cdot H} \cdot \left(1 - \frac{6e_x}{B} + \frac{6e_y}{H}\right) = \frac{12930}{65 \cdot 110} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot 0,4136}{65} + \frac{6 \cdot 0,8957}{110}\right) = 1,8277 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_4 = \frac{N_{tot}}{B \cdot H} \cdot \left(1 - \frac{6e_x}{B} - \frac{6e_y}{H}\right) = \frac{12930}{65 \cdot 110} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot 0,4136}{65} - \frac{6 \cdot 0,8957}{110}\right) = 1,651 \frac{kgf}{cm^2}$$

É possível observar que os resultados do cálculo manual convergem com os dados fornecidos na saída do programa, através do Relatório de Cálculos das Sapatas (figura 76).

Figura 76 – Verificação de pressões na base da sapata S1 do Modelo 5 do AltoQi Eberick

Nome	Pressão Sig1 (kgf/cm ²)	Pressão Sig2 (kgf/cm ²)	Pressão Sig3 (kgf/cm ²)	Pressão Sig4 (kgf/cm ²)
S1	1.65 (lim = 2.00)	1.79 (lim = 2.00)	1.96 (lim = 2.00)	1.83 (lim = 2.00)

Fonte: O Autor (2022)

Em sequência, verificam-se as condições de estabilidade da sapata. Aqui, calcula-se o momento estabilizante ao tombamento do elemento para ambas as direções, conforme expressões abaixo (grandezas expressas em kgf e m):

$$M_{rd,B} = \frac{N_{tot} \cdot B}{2} = \frac{12930 \cdot 0,65}{2} = 4202,2 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$M_{rd,H} = \frac{N_{tot} \cdot H}{2} = \frac{12930 \cdot 1,1}{2} = 7111,5 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

É possível, então, verificar que os valores da razão entre os momentos estabilizantes e os momentos atuantes atendem ao fator de segurança para ambas as direções da sapata.

$$\frac{4202,2}{53,48} = 78,5761 \geq 1,5$$

$$\frac{7111,5}{115,81} = 61,4066 \geq 1,5$$

Os resultados obtidos para a verificações de tombamento podem ser validados através dos valores exibidos no Relatório de Cálculos das Sapatas no AltoQi Eberick (figura 77).

Figura 77 – Verificação de estabilidade ao tombamento da sapata S1 do Modelo 5 do AltoQi Eberick

Nome	Tombamento B		Tombamento H	
	Mrd Msd (kgf.m)	Mrd / Msd	Mrd Msd (kgf.m)	Mrd / Msd
S1	4202.40 53.50	78.55 (lim = 1.50)	7111.76 114.65	62.03 (lim = 1.50)

Fonte: O Autor (2022)

Após a verificação de atendimento da sapata ao tombamento, realizou-se a determinação da força resistente ao deslizamento do elemento, conforme a subsequente. Considerou-se o coeficiente redutor de atrito igual a $\frac{2}{3}$ e o ângulo de atrito interno do solo igual a 30° (valores de carga expressos em tf).

$$F_R = N_{tot} \cdot \tan(r \cdot \theta) = 12,93 \cdot \tan\left(\frac{2}{3} \cdot 30^\circ\right) = 4,7061 \text{ tf}$$

A força horizontal atuante na sapata foi definida com a resultante das componentes na direção B e H do elemento:

$$F_{tot} = \sqrt{FB^2 + FH^2} = \sqrt{0,53^2 + 0,01^2} = 0,5301 \text{ tf}$$

Como a razão entre a força atuante e a força resistente resultou superior ao fator de segurança, é possível inferir que o elemento à condição de estabilidade ao deslizamento.

$$\frac{4,7061}{0,5301} = 8,8779 \geq 1,5$$

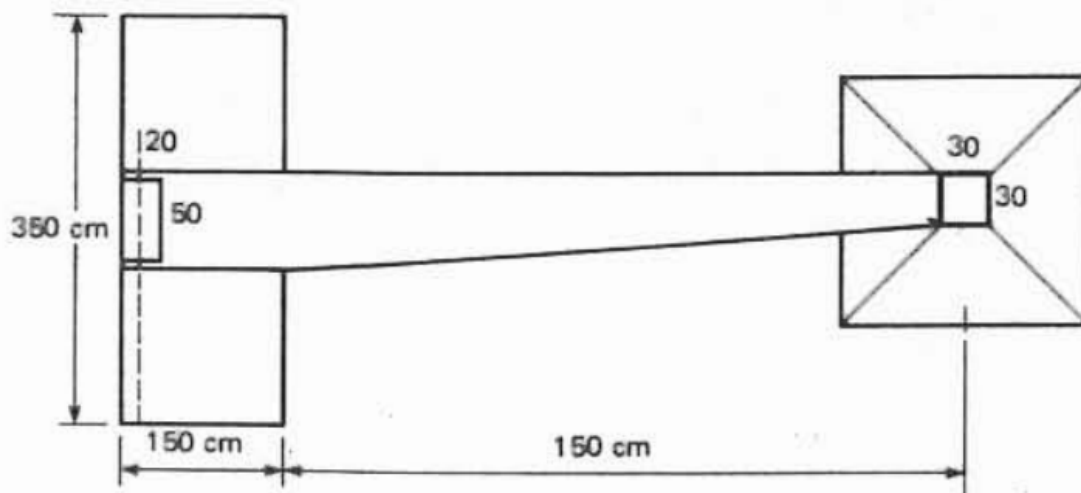
Dessa forma, como todas as verificações do elemento foram atendidas, é possível aceitar as dimensões atribuídas inicialmente ao elemento

4.1.4 Sapata de divisa com viga-alavanca - Ftool

Para validar o modelo computacional lançado no software Ftool para as sapatas de divisa com viga-alavanca, adotou-se a modelagem do problema apresentado por Urbano Rodriguez Alonso (2001). Na questão apresentada,

elabora-se a definição dos esforços atuantes na viga-alavanca descrita na figura 78, considerando-se a carga do pilar apoiado sobre a sapata de divisa sendo igual a 1000kN.

Figura 78 – Esquema do exercício proposto por Alonso



Fonte: Alonso (2001)

Aplicando-se a rotina de cálculo proposta no item 3.2.7, define-se inicialmente o valor da excentricidade de forma como a média entre a dimensão da base da sapata e do pilar na direção da divisa.

$$e_1 = \frac{B-b}{2} = \frac{150-20}{2} = 65\text{cm}$$

Em sequência o coeficiente de majoração da carga do pilar para a definição da reação do solo na sapata (R'_1). O autor recomenda que a carga seja majorada entre 10% a 20%, a fim de representar a contribuição da carga do solo e do peso próprio da sapata no equacionamento do problema.

$$R'_1 = 1,2 \cdot P = 1,2 \cdot 1000 = 1200 \text{ kN}$$

Então, calculou-se um novo valor de reação, com base na distância entre-eixos dos pilares vinculados à viga-alavanca (z) e na excentricidade de forma entre o pilar e a sapata de divisa.

$$R''_1 = P \cdot \frac{z}{z-e_1} = 1000 \cdot \frac{2,9}{2,9-0,65} = 1288,89 \text{ kN}$$

Adotou-se, então, o maior valor de reação entre os resultados obtidos, sendo 1288,89kN.

Em seguida, o valor da carga atuante na base do pilar apoiado sobre a sapata de divisa foi distribuído na extensão de sua dimensão, resultando em uma equivalente distribuída igual a 5000kN/m.

$$q' = \frac{P_c}{b} = \frac{1000}{0,2} = 5000 \text{ kN/m}$$

A distribuição da carga de também foi realizada para a reação do solo na sapata, como a razão entre a carga concentrada calculada e a dimensão da sapata na direção da divisa, resultando em uma carga distribuída igual a 859,3kN/m.

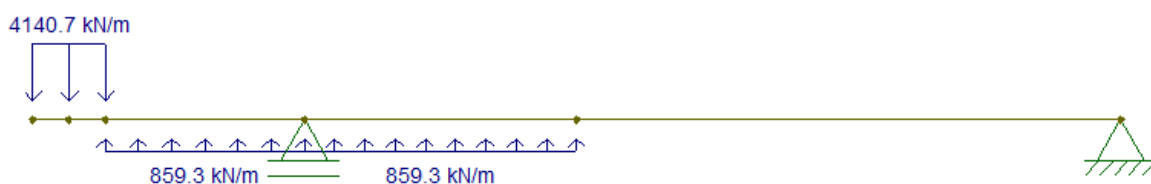
$$q = \frac{R''}{B} = \frac{1288,89}{1,5} = 859,3 \text{ kN/m}$$

Com a obtenção das cargas de divisa, definiu-se a carga distribuída resultante na região interna à seção do pilar como a diferença entre a carga distribuída do pilar (q') e a carga distribuída de reação da sapata (q)

$$q_r = q' - q = 5000 - 859,3 = 4140,7 \text{ kN}$$

Definidos os valores das cargas distribuídas, foi possível elaborar um modelo computacional para o problema utilizando-se o software Ftool (figura 79) e a partir dele, extrair os valores dos esforços atuantes na viga-alavanca. É importante ressaltar que, no modelo computacional, aplicou-se um apoio de primeiro gênero única e exclusivamente com o intuito de fazer com que o programa não considere a estrutura instável, uma vez que a reação da sapata já é considerada no modelo através da carga ascendente distribuída. Dessa forma, a reação pontual do apoio discretizado é igual a zero.

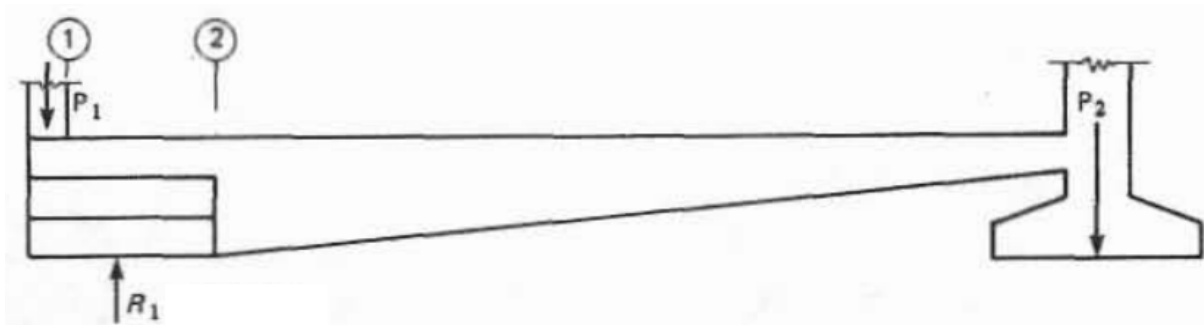
Figura 79– Diagrama de corpo livre da viga-alavanca



Fonte: O Autor (2022)

Na resolução do problema, Alonso define os valores de esforços cortantes em seções de referência da viga (figura 80), sendo o limite externo da face do pilar (1) e no limite externo da face da sapata (2).

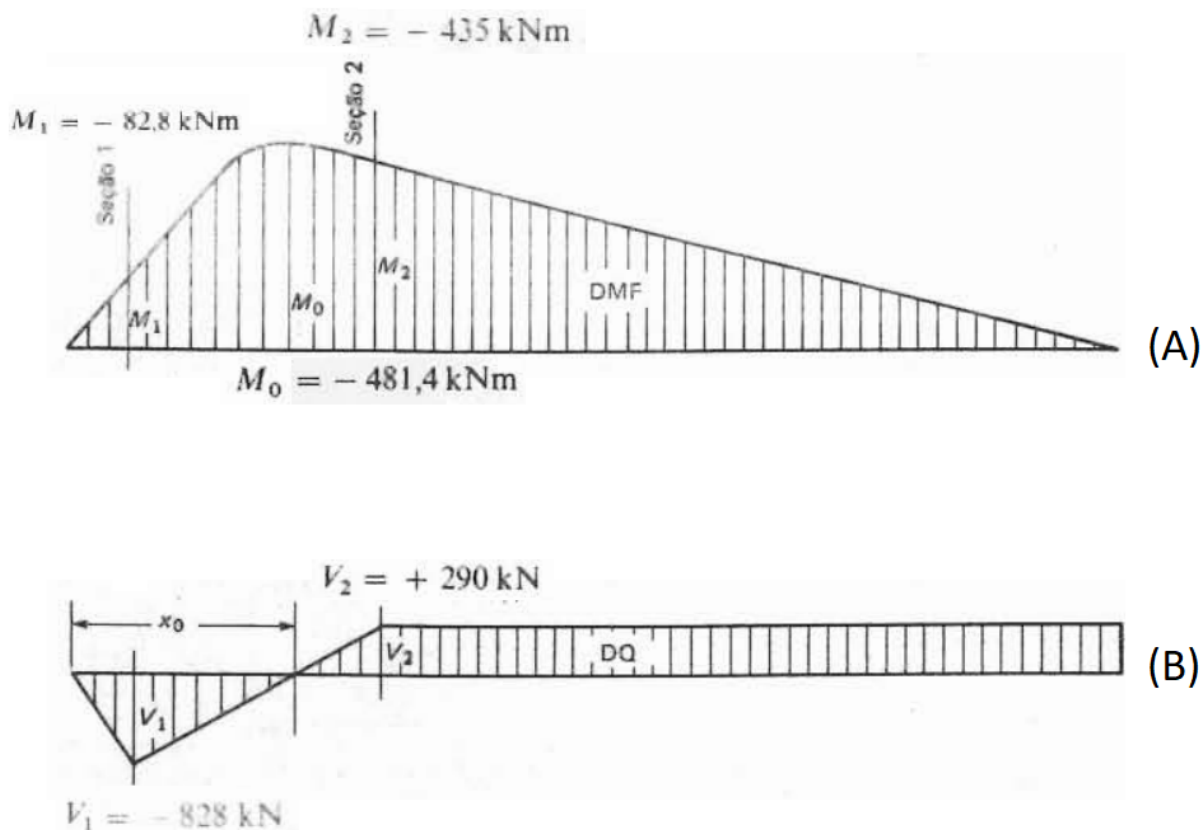
Figura 80 – Seções de referência na viga-alavanca



Fonte: Adaptado de Alonso (2001)

De acordo com o autor, na seção 1, o elemento está submetido a um esforço cortante igual a 828kN e momento fletor igual a -82,8kNm. Já na seção 2, o cortante é igual a 290kN e o momento fletor, -435kNm. O momento máximo calculado é de -481,4kNm (figura 81).

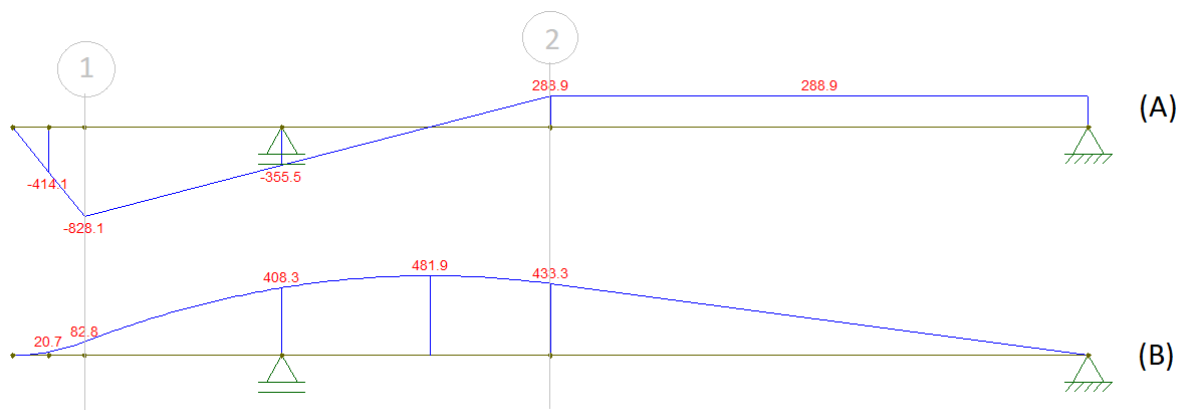
Figura 81 – Diagramas de momento fletor (A) e esforço cortante (B) do exemplo de Alonso



Fonte: Adaptado de Alonso (2001)

É possível observar através dos diagramas de esforços (figura 82) que os valores dos cortantes (A) e momentos (B) do modelo computacional convergem tanto para as seções de referência quanto para o momento máximo. Existe uma pequena discrepância nos valores numéricos devido às diferenças nos métodos de arredondamento adotados no cálculo manual e no cálculo computacional.

Figura 82 – Seções de referência na viga-alavanca



Fonte: O Autor (2022)

Com a convergência dos resultados, é possível inferir que o modelo computacional adotado é adequado para a modelagem e análise de esforços atuantes em vigas-alavanca.

4.2. Efeitos da aplicação dos critérios de modelagem das fundações em divisa

A adoção de diferentes critérios de modelagem para a condição de divisa nas sapatas traz efeitos tanto no dimensionamento dos próprios elementos de fundação, como também nos esforços atuantes nos elementos do pórtico. Ao compararmos os modelos elaborados podemos observar alguns efeitos importantes.

4.2.1 Comportamento global do pórtico

Ao analisarmos os esforços atuantes nos elementos do pórtico, um dos fatores diferenciado pela adoção de diferentes critérios de aplicação da excentricidade nas sapatas de divisa, é a grandeza dos esforços axiais atuantes nas vigas de baldrame. É possível observar que, ao adotar-se a fundação de divisa com pilar de arranque, existe um aumento expressivo dos efeitos de tração nessas vigas. Nos modelos onde a sapata é calculada sob a premissa da aplicação de carga

centrada (todos os modelos exceto Modelo 3 e Modelo 4), os esforços axiais atuantes nesses elementos são consideravelmente menores (tabela 01).

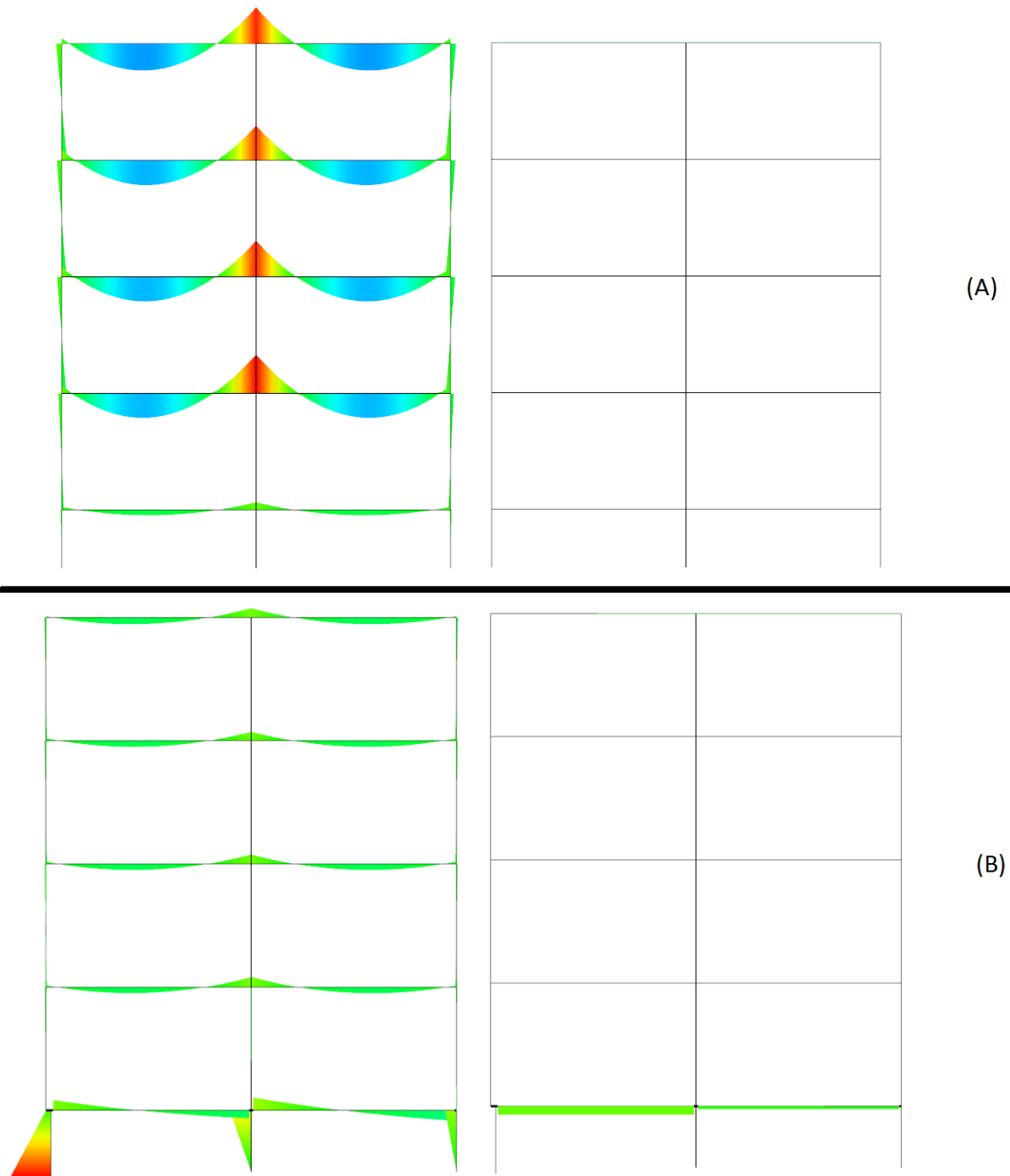
Tabela 01 - Esforços de tração críticos nas vigas de baldrame

ESFORÇOS AXIAIS CRÍTICOS (tf)							
Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo A	Modelo B
0,2	0,23	2,28	17,76	0,62	7,78	1	1,35

Fonte: O Autor (2022)

Esse efeito surge da necessidade de equilibrar-se os momentos adicionais gerados nos pilares de arranque devido à excentricidade que equilibra as tensões no solo. De acordo com esse comportamento, observa-se no Modelo 4, que possui flexão elevada no pilar de arranque de divisa, o maior esforço de tração atuante entre os modelos analisados. O efeito fica evidenciado ao compararmos seus diagramas de momento fletor e esforços axiais, com os do Modelo 2, que possui todas as sapatas centradas (figura 83).

Figura 83– Diagrama de momento fletor no pórtico (esquerda) e esforços axiais nas vigas (direita) para o Modelo 2 (A) e Modelo 4 (B)



Fonte: O Autor (2022)

Ainda nos diagramas da figura 83, é possível observar que os esforços de tração que surgem nas vigas de baldrame equilibram os momentos fletores oriundos da excentricidade da sapata de divisa e impedem que esse efeito de flexão seja transmitido para os demais lances do pórtico. No entanto, as reações dos esforços

axiais quando aplicadas aos nós superiores dos pilares de arranque ficam desbalanceadas, gerando uma resultante na direção da divisa. Dessa forma, os pilares de arranque passam a ser solicitados à flexo-compressão normal.

4.2.2 Comparativo dos elementos de fundação dos modelos

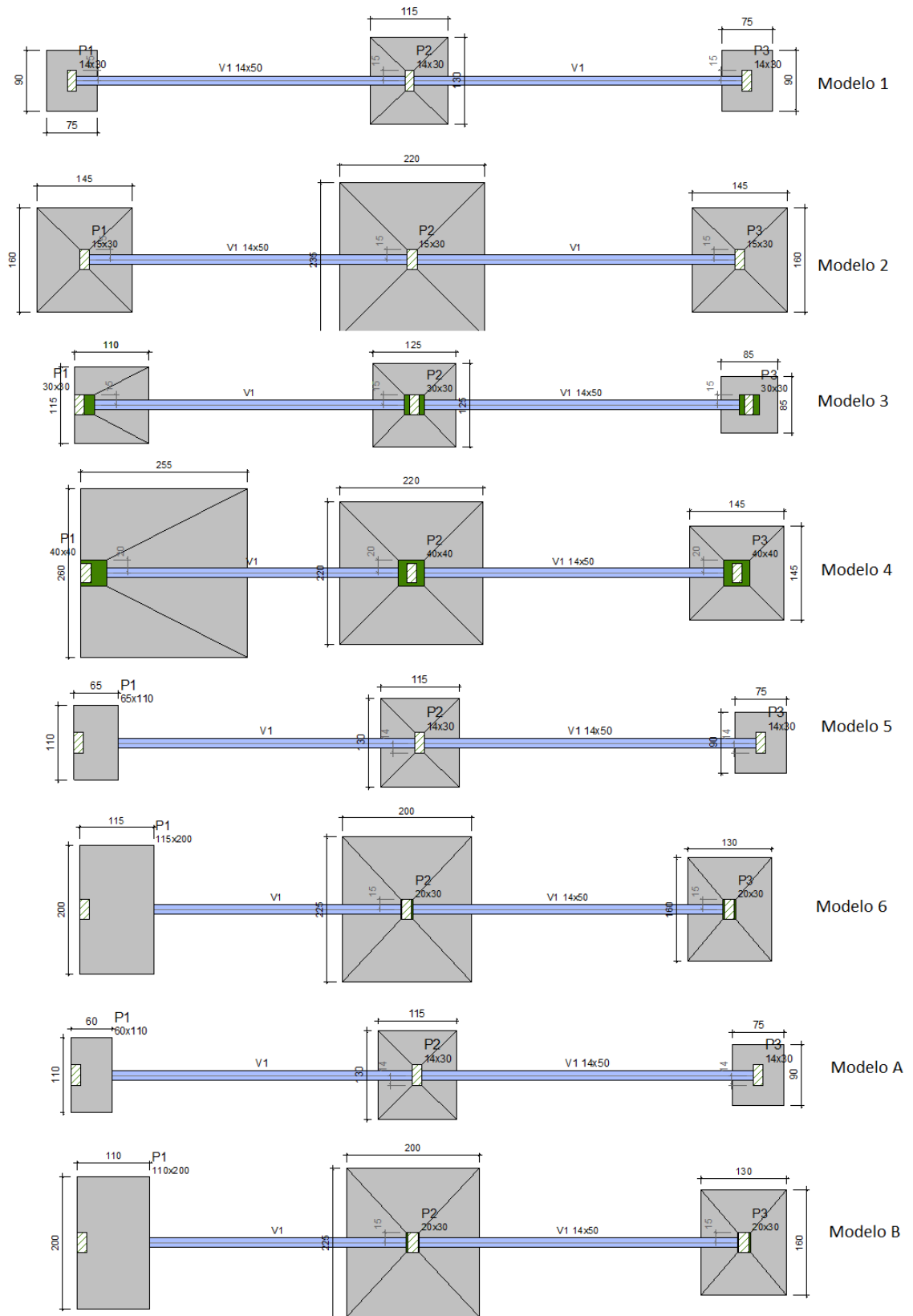
Um dos fatores que é mais impactado pelas alterações nos critérios de modelagem da excentricidade é a dimensão das fundações, explicitadas através da tabela 02 e da figura 84.

Tabela 02 - Dimensões das sapatas dos modelos elaborados

DIMENSÕES DAS SAPATAS									
Modelos de 1 pavimento	Sapata	Modelo 1		Modelo 3		Modelo 5		Modelo A	
		B (cm)	H (cm)	B (cm)	H (cm)	B (cm)	H (cm)	B (cm)	H (cm)
	S1	75	90	110	115	65	110	60	110
	S2	115	130	125	125	115	130	115	130
	S3	75	90	85	85	75	90	75	90
Modelos de 4 pavimentos		Modelo 2		Modelo 4		Modelo 6		Modelo B	
	S1	145	160	275	275	115	200	110	200
	S2	220	235	225	225	200	225	200	225
	S3	145	160	145	145	130	160	130	160

Fonte: O Autor (2022)

Figura 84 – Plantas de forma do pavimento baldrame dos modelos elaborados



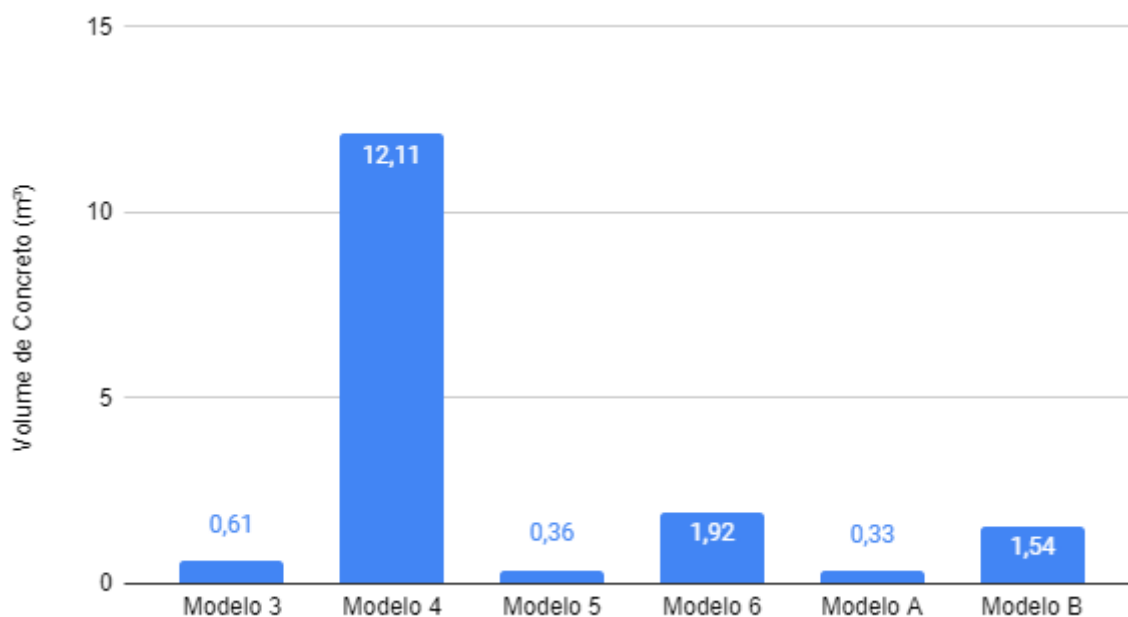
Fonte: O Autor (2022)

Através dos resultados obtidos, é possível verificar que o critério que resulta em sapatas com maior área é o das sapatas de divisa com pilar de arranque (Modelo 3 e Modelo 4). Essa condição se justifica pois essas sapatas estão submetidas a uma excentricidade elevada em comparação aos demais modelos que, por sua vez, estão submetidos apenas ao momento mínimo, no caso do modelo do AltoQi Eberick, ou são dimensionados como sapatas totalmente centradas, no caso dos modelos com viga-alavanca baseados em Alonso (2001).

Devido a essa variação nas dimensões dos elementos de fundação para os modelos, também há uma variação considerável no consumo de materiais para a construção desses elementos.

Definindo-se a altura dos elementos de fundação para que seja admissível a hipótese da sapata rígida, é possível obter os volumes das sapatas de cada modelo. Os resultados obtidos estão registrados na figura 85.

Figura 85 - Volume de concreto para a construção das sapatas de divisa

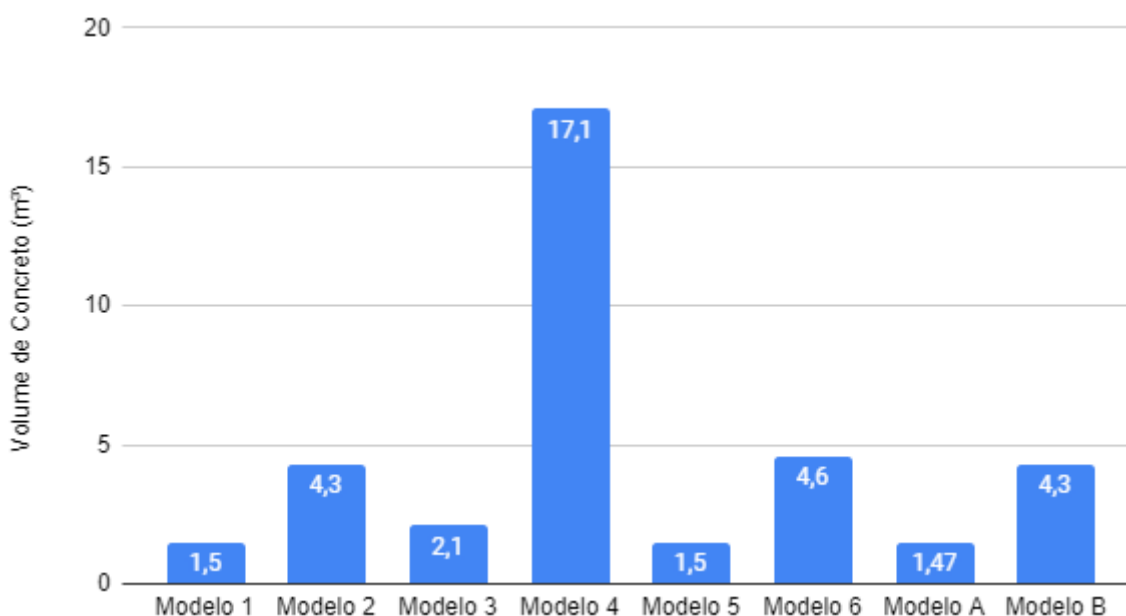


Fonte: O Autor (2022)

Observa-se que o Modelo 4, que possui a fundação em divisa com pilar de arranque, tem um consumo de concreto desproporcionalmente superior às fundações em divisa dos demais modelos.

Além do aumento no tamanho das fundações, a adoção das sapatas de divisa com pilar de arranque também há um incremento no consumo de materiais para a construção dos próprios pilares de arranque. Essa condição se dá devido ao aumento dos efeitos de flexo-compressão atuante nesses elementos. Como o aumento dos esforços solicitantes causou um incremento nas dimensões das seções dos pilares de arranque, é importante verificarmos o impacto que esse efeito causa para todo o pavimento baldrame, incluindo-se fundações, vigas e os próprios pilares de arranque (figura 86). Para os demais pavimentos da edificação não devem haver alterações significativas, pois os efeitos da excentricidade se concentram no pavimento baldrame.

Figura 86 - Volume de concreto para a construção do pavimento baldrame



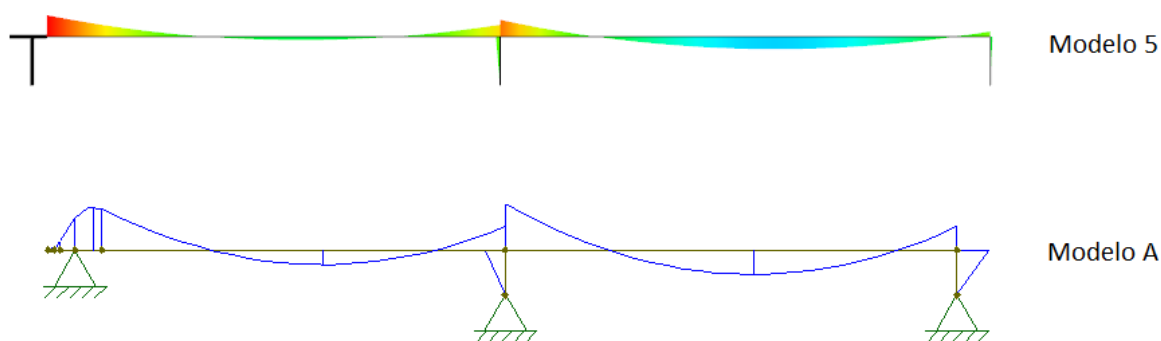
Fonte: O Autor (2022)

Podemos observar que, para o Modelo 4, que possui carregamentos mais elevados e para o qual adotou-se a solução com pilar de arranque na divisa, o consumo de concreto é extremamente aumentado.

Dessa forma, de maneira geral, é possível observar que a fundação de divisa com pilar de arranque, quando submetida a carregamentos mais elevados, se torna antieconômica, uma vez que, a fim de garantir o equilíbrio estrutural, é necessário adotar elementos mais robustos.

Ao comparar-se os modelos de fundação de divisa sem pilar de arranque do AltoQi Eberick com os modelos elaborados de acordo com a abordagem clássica de viga-alavanca, podemos observar que os resultados são bastante próximos. Na figura 87, é possível observar, através de um comparativo entre o Modelo 5 e o Modelo A, que os efeitos da excentricidade sobre o pavimento baldrame são bastante similares em ambos os modelos.

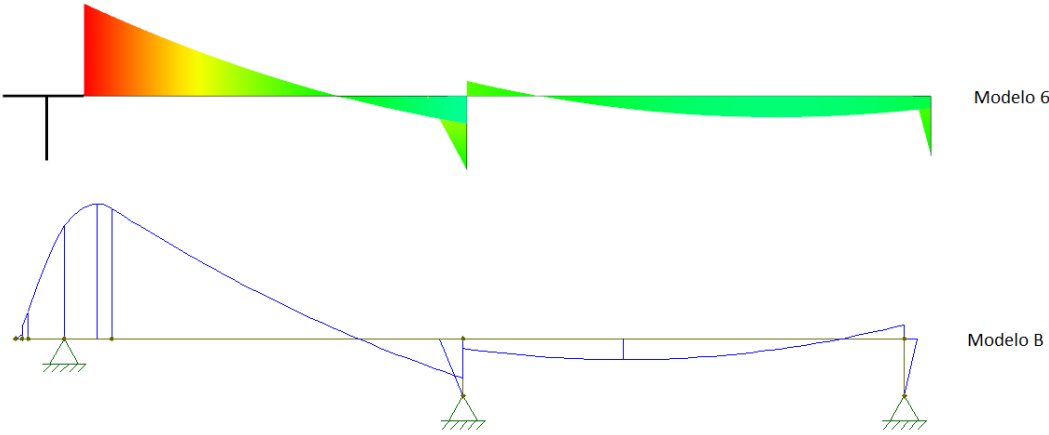
Figura 87 - Diagrama de momento fletor do pavimento baldrame para o Modelo 5 e Modelo A



Fonte: O Autor (2022)

Para os modelos com maior carregamento, é possível observar, através do comparativo entre o Modelo 6 e o Modelo B, que apesar da diferença de grandeza nos resultados, os modelos também apresentam comportamento bastante similares (figura 88)

Figura 88 - Diagrama de momento fletor do pavimento baldrame para o Modelo 6 e Modelo B



Fonte: O Autor (2022)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A excentricidade de forma oriunda da condição de divisa para fundações do tipo sapata pode ser analisada e modelada de diversas formas. Dessa forma, é importante que o projetista, ao definir o critério adotado para a tal modelagem, conheça as limitações e os efeitos diretos e indiretos de sua aplicação.

As fundações de divisa possuem roteiros clássicos e já consagrados em bibliografia, como é o exemplo do método proposto por Alonso (2001), utilizado neste trabalho. No entanto, esses modelos, apesar de oferecerem resultados totalmente adequados, findam por limitar a gama de soluções aplicáveis. As novas tecnologias computacionais e a constante evolução das instruções normativas permitem a adoção de métodos matemáticos. Métodos estes que, por sua vez, permitem a adoção de novos critérios para a modelagem de fundações de divisa, como o caso das sapatas de divisa com pilar de arranque, abordado neste trabalho.

Com base nos resultados obtidos para os modelos elaborados no AltoQi Eberick, é possível observar que as fundações sem pilar de arranque fornecem resultados bem aproximados aos modelos clássicos de viga-alavanca, recomendados na bibliografia. Havendo uma pequena ressalva na definição das próprias fundações de divisa, uma vez que o AltoQi Eberick utiliza o critério de aplicação de momentos mínimos para o dimensionamento das fundações, o que leva à obtenção de fundações ligeiramente maiores, em comparação com o modelo clássico de viga-alavanca.

Ao verificar-se os resultados obtidos para as fundações de divisa com pilar de arranque, é possível observar que, para situações de carregamento axial baixo, como no caso das edificações de um único pavimento, o desempenho da solução viabiliza sua utilização. No entanto, para fundações submetidas a carregamentos axiais mais elevados, sua aplicação implica em um consumo muito maior de materiais para a sua construção. Dessa forma, apesar de também apresentar equilíbrio para grandes carregamentos, essa é uma solução antieconômica.

Também é possível observar que os efeitos da excentricidade se concentram até o nível do pavimento baldrame. Dessa forma, independente da

solução adotada, o comportamento da supraestrutura permanece praticamente inalterado.

Em termos gerais, com os resultados obtidos, o projetista possui diversas soluções válidas para a solução de sapatas de divisa. Assim, é possível adotar a solução mais adequada aos seus critérios de projeto, permitindo a adoção da solução mais adequada para a realidade da obra a ser executada. No entanto, em termos de custo de oneração da construção, a solução de sapata de divisa com pilar de arranque torna-se antieconômica, tornando-se mais cara conforme o aumento do carregamento atuante.

5.1 Limitação do tema e sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho limitou-se a investigar diferentes critérios para a modelagem de fundações do tipo sapata em situação de divisa e os efeitos da adoção de tais critérios no comportamento da estrutura de pórtico unifilar submetido exclusivamente a cargas horizontais. Dessa forma, a fim de enriquecer os resultados e ampliar a gama de materiais referenciais para os estudos de fundações de divisa, sugere-se a elaboração de estudos direcionados nas seguintes áreas:

- Estudo da excentricidade de sapatas de divisa em pórticos espaciais;
- Análise dos efeitos da excentricidade de sapatas em situação de divisa através do método dos elementos finitos;
- Análise dos efeitos da excentricidade de sapatas de divisa para pórticos planos submetidos a carregamentos horizontais;
- Análise dos efeitos da excentricidade para blocos sobre estacas em situação de divisa;
- Realizar o mesmo estudo do presente trabalho apresentando os resultados obtidos através de outros softwares comerciais de cálculo estrutural, como TQS, Cypecad, Strap, entre outros;
- Analisar os efeitos da adoção dos diferentes critérios de modelagem das sapatas de divisa em termos de custos de construção;
- Análise dos efeitos da excentricidade para pórticos planos com dois pilares em situação de divisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014

ABNT. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.

ACCORSI, Patricia de L. **Modelo de bielas e tirantes para blocos sobre duas estacas submetidas à carga excêntrica**. 2017. 88 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2017. Disponível em <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15771/2/bielastirantesblocosestacas.pdf>

ALONSO, Urbano R.. **Exercícios de fundações**, 12^a ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA, 2001

ALTOQI. **Como é feito o dimensionamento de sapatas?** disponível em <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360013665513-Como-%C3%A9-feito-o-dimensionamento-de-sapatas-> Acesso em 20/11/2022

ALTOQI. **Método dos deslocamentos** disponível em <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360003167233-M%C3%A9todo-dos-deslocamentos> Acesso em 25/06/2022

ALVA, Gerson M. S. **Projeto estrutural de sapatas** (apostila de apoio à disciplina Estruturas de Concreto, lecionada na Universidade Federal de Santa Maria). Santa Maria, 2007. Disponível em https://www.academia.edu/download/49692322/Sapatas_1.pdf Acesso em 11 junho 2022.

ARAÚJO, José M. **Projeto estrutural de edifícios de concreto armado**, 3^a ed. Rio Grande, Editora Dunas, 2014

BARROS, Regiane P.; SILVA, Larisse de S.; SANCHES, Thamyres G. **Pórticos isostáticos aplicados na engenharia civil**. In: Encontro de Iniciação Científica 17, 2012. Disponível em <http://www.unitau.br/enic/trabalhos/EPE0287.pdf> Acesso em 25 junho 2022

BASTOS, Paulo S.S.B. **Histórico e principais elementos estruturais de concreto armado** (apostila de apoio à disciplina Estruturas de Sistemas Estruturais I, lecionada na Universidade Estadual Paulista - UNIESP), Bauru, 2006. Disponível em https://www.academia.edu/download/58857715/HIST_DOS_SANTOS.pdf Acesso em 26/06/2022.

BASTOS, Paulo S.S.B. **Sapatas de fundação** (apostila de apoio à disciplina Estruturas de Concreto III, lecionada na Universidade Estadual Paulista - UNIESP), Bauru, 2019. Disponível em <https://www.feb.unesp.br/pbastos/concreto3/Sapatas.pdf> Acesso em 26/06/2022.

BENINCÁ, Matheus E. **Comparação entre modelos de análise estrutural de edifícios em concreto armado: estudo de caso**. 2016 196f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/159614/001019434.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em 26/06/2022

CAMPOS, João C. de. **Elementos de fundações em concreto**. Oficina de textos, São Paulo, 2015.

CARVALHO, José C.. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR6118:2014**, 4ª ed. São Carlos, Edufscar, 2009.

CINTRA, José C.A. **Projeto de fundações** (apostila de apoio à disciplina Fundações, lecionada na Escola de Engenharia de São Carlos - USP), São Carlos, 1984.

COLARES, George M. **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios** 83p. 2006. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Estruturas), São Carlos, 2006. Disponível em http://web.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2006ME_GeorgeMouraColares.pdf Acesso em 03 julho 2022.

CORRÊA, Márcia R. S. **Aperfeiçoamento de modelos usualmente empregados no projeto de sistemas estruturais de edifícios** 331f. 1991. Tese de doutorado (Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 1991. Disponível em http://web.set.eesc.usp.br/static/media/producao/1991DO_MarcioRobertoSilvaCorrea.pdf Acesso em 25 junho 2022.

FERREIRA, Rafael A. **Estudo comparativo de técnica e custo entre fundações rasas: estudo de caso entre radier e sapata isolada**. 117f. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) - Centro Universitário do Sul de Minas (UNISMG), Varginha, 2017. Disponível em <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/131> Acesso em 11 junho 2022.

FONTES, Fernando F. **Análise estrutural de elementos lineares segundo a NBR6118:2003**. 137f. 2005. Tese de mestrado (Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos (USP), São Carlos, 2005. Disponível em http://sistemas.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2005ME_FernandoFernandesFontes.pdf Acesso 02 julho 2022.

GIACOMASSI, Thales S. **Análise do dimensionamento por software das sapatas de um edifício de múltiplos pavimentos** 2021 80f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2021. Disponível em http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/25213/1/GP_COECI_2020_2_01.pdf Acesso em 25/06/2022

IWAMOTO, Roberto K. **Alguns aspectos dos efeitos da interação solo-estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda** 157f. 2000. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2000. Disponível em <https://pdfs.semanticscholar.org/3426/80eacaf62dcd1b3de7c49a165c6544b96649.pdf> Acesso em 03 julho 2022

KIMURA, Alio **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com uso de sistemas computacionais**. Editora PINI, São Paulo, 2007.

MARTHA, Luiz F. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**, Elsevier Editora, São Paulo, 2010.

NELSO SCHNEIDER. **Bulbo de tensões: o guia completo**, disponível em <https://nelsoschneider.com.br/bulbo-de-tensoes/> Acesso em 11 junho 2022.

PIRES, Gustavo M. **Estudo do pré-dimensionamento de pilares** 2011 113f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2011. Disponível em <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/743/TCC%20GUSTAVO%20MENEGUSSO%20PIRES.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em 02 julho 2022.

PUEL, André **Modelagem de lajes planas simétricas e assimétricas em concreto armado - análise integrada laje x pilar** Dissertação de mestrado (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. Disponível em <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/93145/268494.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em 25/06/2022

REIS, Eduardo M. **Análise de pavimentos de edifícios utilizando a analogia de grelha** Dissertação de mestrado (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. Disponível em <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/90204/244863.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em 25/06/2022

SILVA, Edja, L. **Análise dos modelos estruturais para determinação dos esforços resistentes em sapatas isoladas**, São Carlos-SP, 1998. Disponível em <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-16032018-162543/pt-br.php>

SOUSA, Alvaro A.; VENDER, Karolina; MARQUES, Amanda R.; JÚNIOR, José L. A. **Discutindo o conceito de fundações**, Mineiros-GO, 2018. Disponível em <https://unifimes.edu.br/ojs/index.php/coloquio/article/view/398> Acesso em 11 junho 2022.

SPERNAU, Wilson; **Noções de fundações - Parte II: Estruturas de fundações** (apostila de apoio à disciplina Noções de fundações, lecionada na Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC), Florianópolis, s.d.

TEIXEIRA, Alberto H.; GODOY, Nelson S. **Fundações: teoria e prática**, 3ª ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2019

VELLOSO, Dirceu A.; LOPES, Francisco R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**, São Paulo, Oficina de Textos, 2010