

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

ROBSON HUMBERTO ROSSATTO HAEFLIGER

COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES PARA FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS DE DIVISA
EM UM SOBRADO

BENTO GONÇALVES

2021

ROBSON HUMBERTO ROSSATTO HAEFLIGER

**COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES PARA FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS DE DIVISA
EM UM SOBRADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador Prof. Me. em Engenharia Civil Luciano Zatti

BENTO GONÇALVES

2021

ROBSON HUMBERTO ROSSATTO HAEFLIGER

**COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES PARA FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS DE DIVISA
EM UM SOBRADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador Prof. Me. em Engenharia Civil Luciano Zatti

Aprovado em 03/12/2021

Banca examinadora

Prof. Me. Luciano Zatti

Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Gustavo Ribeiro da Silva

Universidade de Caxias do Sul

Prof.^a Dra. Henriette Justina Manfredini Baroni

Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

O desenvolvimento de estudos na área da construção civil, além de sempre buscar soluções economicamente favoráveis, é demandado também pela redução do consumo de materiais cuja a produção seja agressiva ao meio ambiente. Ao construir uma obra junto aos limites do terreno, é necessária a utilização de fundações especiais que não invadam o terreno vizinho, sendo esse um caso bem específico que ocasiona o aumento de insumos e, conseqüentemente, do investimento. Sendo assim, este trabalho analisa soluções distintas para sapatas de divisa na construção de um sobrado de 150 m² em Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, local que possui um solo que justifique a utilização de fundações superficiais. São analisadas quatro opções com o auxílio do *software* CYPECAD: sapata excêntrica sem travamento, sapata excêntrica com viga de equilíbrio, sapata centrada com viga de transição e sapata em formato “T”, uma vez que se comparam os resultados referentes a: consumo e orçamentação do aço, concreto e madeira, e esforço axial e de flexão. Por fim, é apresentada a solução de sapata em formato “T” como a mais vantajosa economicamente, além de ser demonstrado que os métodos mais utilizados no Brasil são também os menos econômicos para esta situação.

Palavras-chave: fundações de divisa; fundações superficiais; sapata excêntrica; sapata; concreto armado; tecnologia; CYPECAD; comparativo; projeto estrutural.

ABSTRACT

The development of studies in construction area, in addition to seeking economically positive solutions, is also required by the reduction of materials consume, which production is considered aggressive for the environment. When building close to the land boundaries, is necessary to use special foundations that do not encroach the neighboring land, this being a very specific case that causes an increase in inputs and, consequently, in investment. That considerer, this work analyzes different solutions for boundary footing in the construction of a 150m² two-story house in Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, place that has soil that justifies the use of shallow foundations. Four options are analyzed with the help of the CYPECAD software: eccentric footing without balance beam, eccentric footing with balance beam, centered footing with transition beam and “T” shaped footing, being the results compared regarding: consumption and budgeting of steel, concrete and wood, and axial and bending effort. Finally, the “T” shaped footing solution is presented as the most economically advantageous, in addition to demonstrating that the methods that are most used in Brazil are also the least economical for this situation.

Key words: boundary foundation; shallow foundation; eccentric footing; footing; reinforced concrete; technology; CYPECAD; comparative; structural project.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fundações profundas	16
Figura 2 - Fundações superficiais	17
Figura 3 - Sapata isolada	18
Figura 4 - Sapata corrida	19
Figura 5 - Sapata associada	19
Figura 6 - Sapata com viga de equilíbrio	20
Figura 7 - Sapata excêntrica	22
Figura 8 - Sapata de divisa com tirante	23
Figura 9 - Soluções atípicas para sapata de divisa	24
Figura 10 - Dimensões da sapata em planta	30
Figura 11 - Região de aplicação de carga em excentricidade em uma direção	32
Figura 12 - Regiões de aplicação de carga em excentricidade em duas direções	33
Figura 13 - Carga nas regiões 3 e 4 para duas excentricidades	35
Figura 14 - Balanço "c" na sapata isolada	37
Figura 15 - Dimensões para a Equação 16	37
Figura 16 - Diagrama de tensões no eixo que possui momento atuante	38
Figura 17 - Tombamento em relação ao ponto "o"	41
Figura 18 - Notações da sapata com viga de equilíbrio	42
Figura 19 - 3D do projeto arquitetônico	47
Figura 20 - Sapata excêntrica sem travamento	48
Figura 21 - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio	49
Figura 22 - Sapata centrada com viga de transição	50
Figura 23 - Sapata em formato "T"	50
Figura 24 - Diagrama de esforços da viga de equilíbrio	51
Figura 25 - Modelo 3D - Projeto sem sapatas de divisa	56
Figura 26 - Fôrmas do térreo - Projeto sem sapatas de divisa	57
Figura 27 - Carga axial - Projeto sem sapatas de divisa	59
Figura 28 - Flexão - Projeto sem sapatas de divisa	59
Figura 29 - Modelo 3D - Sapata excêntrica sem travamento	60
Figura 30 - Fôrmas do térreo - Sapata excêntrica sem travamento	60
Figura 31 - Flexão - Sapata excêntrica sem travamento	62

Figura 32 - Modelo 3D - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio	63
Figura 33 - Fôrmas do térreo - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio	63
Figura 34 - Flexão - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio.....	65
Figura 35 - Modelo 3D - Sapata centrada com viga de transição	66
Figura 36 - Fôrmas do térreo - Sapata centrada com viga de transição	67
Figura 37 - Carga axial - Sapata centrada com viga de transição	68
Figura 38 - Flexão - Sapata centrada com viga de transição.....	69
Figura 39 - Modelo 3D - Sapata em formato "T"	69
Figura 40 - Fôrmas do térreo - Sapata em formato "T"	70
Figura 41 - Carga axial - Sapata em formato "T"	72
Figura 42 - Flexão - Sapata em formato "T"	72
Figura 43 - Comparativo de consumo de materiais	73
Figura 44 - Comparativo de carga axial.....	76
Figura 45 - Comparativo de flexão no eixo X	77
Figura 46 - Comparativo de flexão no eixo Y	78
Figura 47 - Comparativo da orçamentação final.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência de concretos estruturais	26
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.	27
Tabela 3 - Correspondência entre a CAA e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$	28
Tabela 4 - Valor de n para a Equação 5	31
Tabela 5 - Cobrimentos para CAA II.....	51
Tabela 6 - Propriedades dos materiais	52
Tabela 7 - Parâmetros para ação do vento	53
Tabela 8 - Carregamento acidental	53
Tabela 9 - Carregamento permanente	53
Tabela 10 - Aspectos geotécnicos	54
Tabela 11 - Quantitativos - Projeto sem sapatas de divisa.....	57
Tabela 12 - Orçamentação - Projeto sem sapatas de divisa	58
Tabela 13 - Dimensões das sapatas excêntricas.....	60
Tabela 14 - Quantitativos - Sapata excêntrica sem travamento	61
Tabela 15 - Orçamentação - Sapata excêntrica sem travamento.....	61
Tabela 16 - Quantitativos - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio	64
Tabela 17 - Orçamentação - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio.....	64
Tabela 18 - Quantitativos - Sapata centrada com viga de transição	67
Tabela 19 - Orçamentação - Sapata centrada com viga de transição.....	68
Tabela 20 - Quantitativos - Sapata em formato "T"	70
Tabela 21 - Orçamentação - Sapata em formato "T"	71
Tabela 22 - Custo por insumo para cada opção	79

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	TEMA DE PESQUISA	13
1.2	QUESTÃO DE PESQUISA.....	13
1.3	OBJETIVOS.....	13
1.3.1	Objetivo geral	13
1.3.2	Objetivos específicos.....	13
1.4	HIPÓTESE	14
1.5	PRESSUPOSTOS	14
1.6	DELIMITAÇÕES	14
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	CLASSIFICAÇÃO DE FUNDAÇÕES DO TIPO SAPATA.....	16
2.1.1	Quanto a rigidez	17
2.1.1.1	Sapata rígida.....	17
2.1.1.2	Sapata flexível.....	18
2.1.2	Quanto a posição	18
2.1.2.1	Sapata isolada.....	18
2.1.2.2	Sapata corrida.....	19
2.1.2.3	Sapata associada.....	19
2.1.2.4	Sapata com viga de equilíbrio	20
2.1.3	Quanto a solicitação	20
2.1.3.1	Sapata sob carga centrada.....	20
2.1.3.2	Sapata sob carga excêntrica.....	20
2.2	SAPATA DE DIVISA.....	21
2.2.1	Sapata excêntrica.....	21
2.2.2	Viga de equilíbrio	22
2.2.3	Soluções atípicas	23
2.3	PARÂMETROS DE CÁLCULO.....	24
2.3.1	Aspectos geotécnicos.....	25
2.3.2	Concepção estrutural	25

2.3.3	Resistência dos materiais	26
2.3.4	Classe de agressividade	26
2.3.5	Ações na estrutura.....	28
2.3.5.1	Ações permanentes (g)	28
2.3.5.2	Ações variáveis (q).....	29
2.4	DIMENSIONAMENTO	29
2.4.1	Sapata isolada	29
2.4.1.1	Dimensionamento geométrico.....	29
2.4.1.2	Excentricidade	32
2.4.1.3	Dimensionamento à flexão.....	36
2.4.1.4	Força cortante	38
2.4.1.5	Diagonal comprimida	39
2.4.1.6	Punção	39
2.4.1.7	Estabilidade	40
2.4.2	Sapata excêntrica com viga de equilíbrio.....	41
2.4.2.1	Dimensionamento geométrico da sapata.....	42
2.4.2.2	Dimensionamento da viga de equilíbrio.....	43
2.5	ORÇAMENTAÇÃO	45
3	METODOLOGIA DE PESQUISA.....	47
3.1	SOLUÇÕES PARA AS SAPATAS DE DIVISA.....	48
3.1.1	1ª opção - sapata excêntrica sem travamento	48
3.1.2	2ª opção - sapata excêntrica com viga de equilíbrio.....	49
3.1.3	3ª opção - sapata centrada com viga de transição	49
3.1.4	4ª opção - sapata em formato “T”	50
3.2	PARÂMETROS DO PROJETO	51
3.2.1	Ação do vento.....	52
3.2.2	Carregamento acidental.....	53
3.2.3	Carregamento permanente.....	53
3.2.4	Aspectos geotécnicos.....	54
3.3	ORÇAMENTAÇÃO	54
3.4	APRECIÇÃO DOS RESULTADOS	54
3.5	SOFTWARE	55

4	RESULTADOS.....	56
4.1	PROJETO SEM SAPATAS DE DIVISA	56
4.1.1	Observações de dimensionamento	56
4.1.2	Quantitativos.....	57
4.1.3	Orçamentação.....	58
4.1.4	Esforços	58
4.2	1ª OPÇÃO - SAPATA EXCÊNTRICA SEM TRAVAMENTO	59
4.2.1	Observações de dimensionamento	60
4.2.2	Quantitativos.....	61
4.2.3	Orçamentação.....	61
4.2.4	Esforços	62
4.3	2ª OPÇÃO - SAPATA EXCÊNTRICA COM VIGA DE EQUILÍBRIO.....	62
4.3.1	Observações de dimensionamento	63
4.3.2	Quantitativos.....	64
4.3.3	Orçamentação	64
4.3.4	Esforços	65
4.4	3ª OPÇÃO - SAPATA CENTRADA COM VIGA DE TRANSIÇÃO	65
4.4.1	Observações de dimensionamento	66
4.4.2	Quantitativos.....	67
4.4.3	Orçamentação.....	67
4.4.4	Esforços	68
4.5	4ª OPÇÃO - SAPATA EM FORMATO “T”	69
4.5.1	Observações de dimensionamento	70
4.5.2	Quantitativos.....	70
4.5.3	Orçamentação.....	71
4.5.4	Esforços	71
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	73
5.1	CONSUMO DE MATERIAIS	73
5.1.1	Fôrmas.....	73
5.1.2	Aço	74
5.1.3	Concreto	75
5.2	ESFORÇOS.....	75

5.2.1	Carga axial.....	75
5.2.2	Flexão.....	76
5.3	ORÇAMENTAÇÃO.....	78
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
	ANEXO A – PAVIMENTO TÉRREO E PAVIMENTO SUPERIOR.....	86
	ANEXO B – PLANTA DE COBERTURA, FACHADA LESTE E CORTE AA.....	88
	APÊNDICE A – DETALHAMENTO DAS FUNDAÇÕES DO PROJETO BASE.....	90
	APÊNDICE B – DETALHAMENTO DAS FUNDAÇÕES DA 1ª OPÇÃO.....	92
	APÊNDICE C – DETALHAMENTO DAS FUNDAÇÕES DA 2ª OPÇÃO.....	94
	APÊNDICE D – DETALHAMENTO DAS FUNDAÇÕES DA 3ª OPÇÃO.....	96
	APÊNDICE E – DETALHAMENTO DAS FUNDAÇÕES DA 4ª OPÇÃO.....	98

1 INTRODUÇÃO

O projeto de estruturas em concreto armado possui como diretriz principal a NBR 6118 (ABNT, 2014) que exige alguns requisitos principais da estrutura como: capacidade resistente, desempenho em serviço e durabilidade, as quais são garantidas durante a execução da estrutura. Entretanto, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), também são determinadas algumas exigências de qualidade de projeto, como por exemplo a das soluções adotadas buscando integrar os demais projetos (arquitetônico, elétrico, hidráulico, etc.).

Em entrevista a Diniz (2017), aponta-se que o concreto é o segundo material mais consumido do mundo, perdendo apenas para a água, sendo que em quase sua totalidade é utilizado na construção civil. Desta forma, o engenheiro civil, responsável técnico pelo cálculo e dimensionamento de estruturas de concreto armado, encara uma grande demanda por conhecimento nessa área.

Contudo, com a evolução em escala mundial da construção civil, garantir a estabilidade da estrutura não é mais o único requisito de um bom projeto. Segundo Rodgers (2018) 8% das emissões mundiais de CO₂ vêm do processo de produção do cimento. Assim, o estudo aprofundado da metodologia de cálculo e dos processos de execução somados com a utilização de *softwares* para o dimensionamento, busca atingir um nível de otimização estrutural que além de ser agradável ao bolso do cliente agrida menos o meio ambiente.

Araújo (2014a) destaca que, dentro de um projeto estrutural de edificações, o dimensionamento das fundações é uma das fases de maior complexidade, além disso, Lopes e Velloso (2011) delimitam um pouco mais o tema ressaltando as dificuldades de projetar e executar uma obra com pilares nas divisas. Resumidamente, entende-se que estudar e desenvolver métodos apropriados para essas situações otimizaria o dimensionamento da estrutura, agindo diretamente nas situações ecológicas e econômicas.

Desta forma, o presente trabalho apresenta quatro diferentes soluções para as fundações superficiais de divisa em um sobrado, residência unifamiliar de padrão médio cujo a construção deste tipo de obra é de alta frequência. Busca-se assim determinar qual das soluções se torna a mais vantajosa tecnicamente e economicamente no contexto geral da edificação, além de apresentar essas diferenças considerando, para o mesmo projeto, nenhum pilar na divisa.

1.1 TEMA DE PESQUISA

Fundações superficiais de divisa em concreto armado.

1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

Para um sobrado com fundações superficiais na divisa, entre sapata excêntrica sem travamento, sapata excêntrica com viga de equilíbrio, sapata centrada com viga de transição e sapata em formato “T”, qual apresenta a melhor solução técnica e econômica?

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho se dividem em duas categorias: objetivo geral e objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo geral

Comparar, estruturalmente e economicamente, quatro soluções para fundações superficiais de divisa aplicadas para um sobrado, utilizando o *software* CYPECAD.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) dimensionar o sobrado completo, através do CYPECAD, sem considerar nenhuma fundação de divisa, obtendo assim um projeto base para comparações com a obra na divisa;
- b) dimensionar as fundações do sobrado, através do CYPECAD, utilizando nas divisas a opção de sapata excêntrica sem travamento (1ª opção);
- c) dimensionar as fundações do sobrado, através do CYPECAD, utilizando nas divisas a opção de sapata excêntrica com viga de equilíbrio (2ª opção);
- d) dimensionar as fundações do sobrado, através do CYPECAD, utilizando nas divisas a opção de deslocar a carga do pilar com uma viga de transição, considerando uma sapata centrada (3ª opção);

- e) dimensionar as fundações do sobrado, através do CYPECAD, utilizando nas divisas a opção de engrossar o pilar na largura da sapata, encarregando a baldrame com a função de equilíbrio, modelando uma sapata em formato “T” (4ª opção);
- f) comparar os esforços das quatro opções de fundação de divisa;
- g) comparar o consumo de aço, concreto e fôrmas das quatro opções de fundação de divisa;
- h) identificar a melhor solução econômica e técnica para o sobrado dentre as quatro opções apresentadas.

1.4 HIPÓTESE

A melhor solução para fundação superficial de divisa para o sobrado dentre as quatro opções apresentadas, principalmente pelo fator econômico, se trata do modelo que realiza o engrossamento do pilar e encarrega a baldrame de realizar o travamento, sendo modelado uma sapata em formato “T” (4ª opção).

1.5 PRESSUPOSTOS

O sobrado em questão possuirá uma estrutura unicamente de concreto armado e, tanto o dimensionamento das fundações quanto do restante da estrutura, serão feitos através do *software* CYPECAD, o qual atende às prescrições normativas das Normas Brasileiras (ABNT NBR) com as devidas verificações para edificações desse tipo. Além disso, por causa das variações no gráfico de deformação, o concreto utilizado será do Grupo I, ou seja, com a resistência característica (f_{ck}) menor ou igual à 50 MPa.

1.6 DELIMITAÇÕES

As verificações para cada opção de sapata superficial de divisa apresentada serão efetuadas a partir de um projeto arquitetônico base, portanto não será alterado nenhum vão ou qualquer outro ponto da estrutura que interfira na análise correta dos resultados. Além disso, o f_{ck} do concreto, cobrimento das armaduras, tipo de agregado graúdo, entre outras características dos materiais também permanecerão as mesmas. Para o solo, será admitido um valor aproximado médio de tensão admissível que se encontra na região da serra gaúcha, local do

desenvolvimento do presente trabalho, e que a fundação do tipo superficial é a melhor solução para esse caso.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho tem como segundo capítulo a fase de referencial teórico, através de bibliografias, normas técnicas, artigos científicos e trabalhos acadêmicos, o qual possui como intuito o aprofundamento no conhecimento sobre o dimensionamento de fundações superficiais em concreto armado. Dentro dessa categoria, o estudo é concentrado no tipo sapata padrão e sapata de divisa, avaliando as soluções mais utilizadas e buscando novas soluções para fundações junto aos limites do terreno com justificativas técnicas.

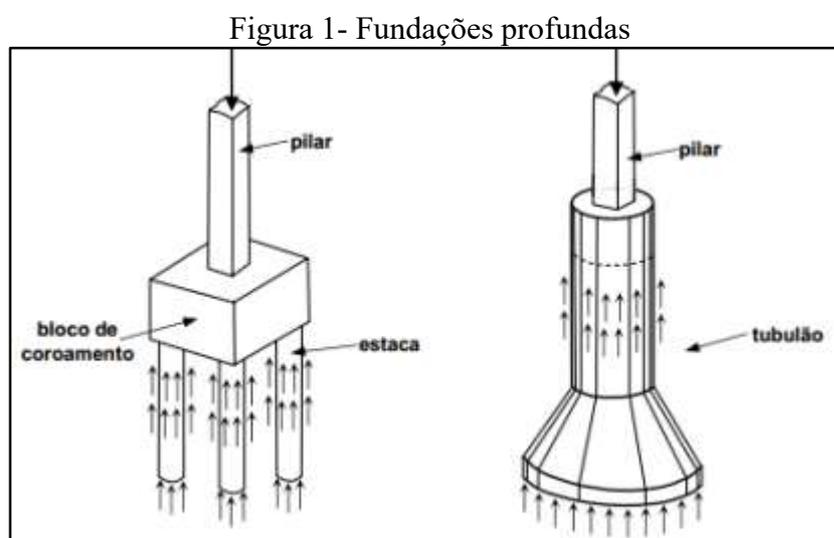
O terceiro capítulo ocorre através do desenvolvimento e da definição detalhada da metodologia de pesquisa, ou seja, como o trabalho será encaminhado até serem encontrados os resultados. Determina-se o projeto arquitetônico do objeto de estudo, os principais parâmetros de cálculo e também as quatro diferentes soluções de sapata de divisa a serem utilizadas para o desenvolvimento do projeto.

Sendo assim, no quarto capítulo são organizados todos os resultados de pesquisa, referentes a consumo de material, esforços e orçamentação, para cada uma das soluções apresentadas e também para o projeto base que se refere à uma obra padrão que não estaria junto a nenhum limite do terreno. A partir disso é realizada uma análise crítica desses resultados no quinto capítulo, buscando atingir todos os objetivos do estudo e, desenvolvendo assim, as suas considerações finais no sexto capítulo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CLASSIFICAÇÃO DE FUNDAÇÕES DO TIPO SAPATA

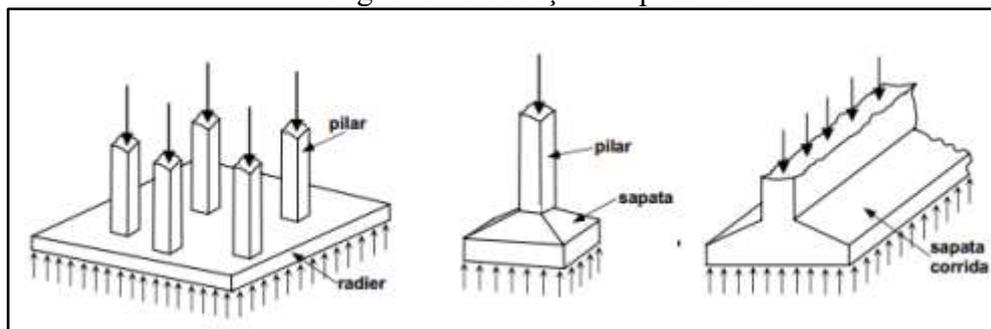
Inicialmente, a NBR 6122 (ABNT, 2019) define que a fundação pode ser do tipo profunda, a qual pode transmitir a carga para o terreno pela ponta e pelo fuste, ou do tipo superficial, caracterizada por estar assentada em no máximo duas vezes a sua menor dimensão. Azeredo (1997) exemplifica as fundações profundas com estacas e tubulões, as quais o comprimento é preponderante sobre a seção, conforme a Figura 1.



Fonte: Seminário de fundações e contenções – Area/IT (2014)

Contudo, quando se trata de fundações diretas (superficiais), a NBR 6122 (ABNT, 2019) cita como exemplo a sapata, modelo mais usual, assim como o radier e a sapata corrida, conforme Figura 2. Desta forma, dentro da classificação de elemento de fundação superficial do tipo sapata, Alva (2007) ainda elabora três diferentes classificações para esse tipo: quanto a rigidez, quanto a posição e quanto a sollicitação.

Figura 2 - Fundações superficiais



Fonte: Seminário de fundações e contenções – Area/IT (2014)

2.1.1 Quanto a rigidez

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define a Equação 1 como parâmetro para determinar a rigidez da sapata, uma vez que, aplicando-se para as duas direções, a condição deverá ser verificada para ser considerado rígida, caso contrário, será considerada flexível.

$$h \geq (a - a_p)/3 \quad (1)$$

Sendo:

h é a altura da sapata

a é a dimensão da sapata em uma determinada direção

a_p é a dimensão do pilar na mesma direção

2.1.1.1 Sapata rígida

Araújo (2014a) cita que esse tipo de fundação é mais econômico ao ser adotado em solos de boas resistências, sendo que, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) para o dimensionamento das armaduras longitudinais de flexão admite-se que a tração seja uniformemente distribuída na largura correspondente da sapata. Já para o cisalhamento, Campos (2015) explica que, embora a punção possa ser ignorada pelo fato de a sapata estar inteiramente dentro do cone hipotético, existe a necessidade da verificação da ruptura por compressão diagonal do concreto na ligação sapata-pilar.

2.1.1.2 Sapata flexível

A NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 189) apresenta que, “Embora de uso mais raro, essas sapatas são utilizadas para fundações de cargas pequenas e solos relativamente fracos.” Além disso, a sapata flexível apresenta o comportamento estrutural de uma peça fletida, ou seja, a NBR 6118 (ABNT, 2014) esclarece que devem ser verificados a concentração de flexão junto ao pilar, assim como o fenômeno de punção.

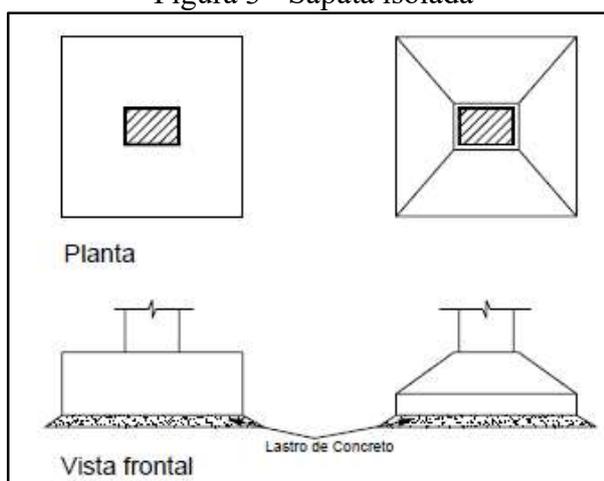
2.1.2 Quanto a posição

A NBR 6118 (ABNT, 2014) elabora algumas classificações para a fundação do tipo sapata que, segundo Campos (2015), são consideradas em relação a carga que ela transfere ao solo, podendo ser dos tipos: isolada, corrida, associada ou com viga de equilíbrio.

2.1.2.1 Sapata isolada

Conforme Araújo (2014a), ela tem a função de transmitir as ações de apenas um pilar, podendo apresentar bases quadradas, retangulares, circulares ou poligonais, como demonstrado na Figura 3. Campos (2015) ainda se refere a ela como um elemento que distribui nas duas direções a carga recebida.

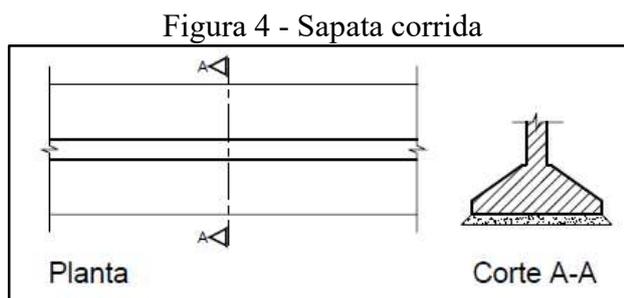
Figura 3 - Sapata isolada



Fonte: Alva (2007)

2.1.2.2 Sapata corrida

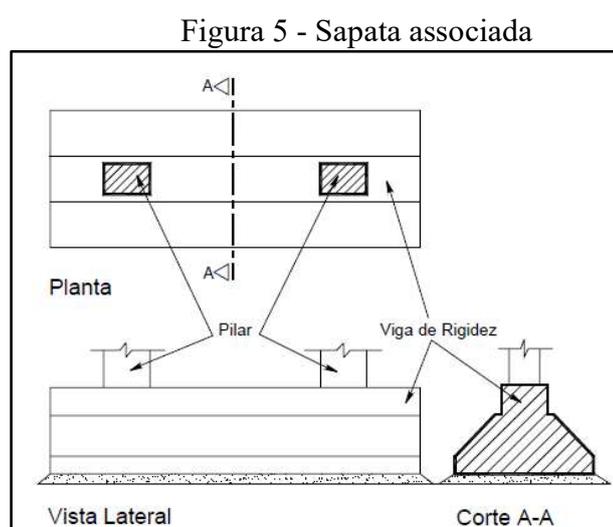
A NBR 6118 (ABNT, 2014) se refere a esse tipo de fundação como um elemento que recebe uma carga linearmente distribuída, ou de três ou mais pilares em um mesmo alinhamento. Campos (2015) também comenta que esse é um elemento que distribui ao solo, em apenas uma direção, uma carga linear recebida (parede), conforme Figura 4.



Fonte: Alva (2007)

2.1.2.3 Sapata associada

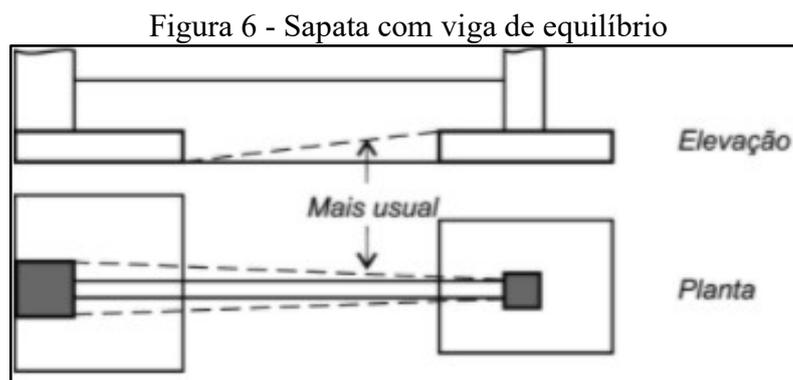
A NBR 6118 (ABNT, 2014) denomina esse tipo de fundação como uma sapata comum a dois pilares como demonstrado na Figura 5, contudo não necessariamente eles precisam estar alinhados. Hachich et al. (1998) explicam essa utilização para casos em que dois pilares estão muito próximos, o que provocaria uma sobreposição em suas bases e impossibilitaria a utilização de duas sapatas isoladas.



Fonte: Alva (2007)

2.1.2.4 Sapata com viga de equilíbrio

Hachich et al. (1998) explicam que, no caso de pilares junto a divisa, é possível ligar a sapata de divisa com um pilar interno da obra através de uma viga de equilíbrio, conforme Figura 6. Essa conexão através de um novo elemento estrutural faz com que a viga absorva a excentricidade de carga e faça com que a sapata trabalhe com carga centrada.



Fonte: Lopes e Velloso (2011)

2.1.3 Quanto a solicitação

Ao contrário da classificação quanto a posição, determinada por Campos (2015) como a forma que a sapata transmite sua carga ao solo, na classificação quanto a solicitação, Alva (2007) esclarece que ocorre pela posição da carga que a fundação está submetida, podendo ser sob carga centrada ou sob carga excêntrica.

2.1.3.1 Sapata sob carga centrada

A NBR 6122 (ABNT, 2019) determina que para esse caso admite-se que a carga recebida pela fundação é distribuída uniformemente ao solo. Hachich et al. (1998) explicam que essa situação ocorre quando a resultante do carregamento passa pelo centro de gravidade da área da base.

2.1.3.2 Sapata sob carga excêntrica

Campos (2015) explica que nem sempre é possível coincidir o centro da carga vertical do pilar com o centro gravitacional da sapata, sendo necessário o dimensionamento por flexão composta, como por exemplo uma sapata de divisa. A NBR 6122 (ABNT, 2019) complementa

que, para esse caso, também é necessário considerar que o solo é um elemento não resistente a tração.

2.2 SAPATA DE DIVISA

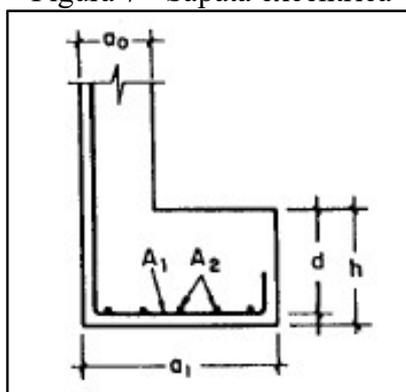
Em face ao nosso modelo construtivo e a as características dos diversos tipos de fundação, a NBR 6122 (ABNT, 2019) pontua que pequenas excentricidades executivas, principalmente em fundações, são inevitáveis e ainda estabelece alguns critérios de cálculos para levar em conta esses efeitos. Contudo, existem tipos de excentricidades que geram momentos consideráveis na sapata, e segundo Azeredo (1997), uma dessa situações é quando o pilar se encontra na divisa, fato que impede a fundação de penetrar no terreno do vizinho.

Lopes e Velloso (2011) ressaltam quão problemática é a prática de projetos com pilares de divisa, uma vez que essa situação impõe flexão ao pilar, onde uma obra de retirada de solo vizinha que cause uma descompressão do terreno aumentaria a excentricidade e, conseqüentemente, a flexão. Os autores exemplificam um fato de 1955 no centro da cidade do Rio de Janeiro, o qual levou um edifício ao colapso total através dos fatores supracitados.

2.2.1 Sapata excêntrica

Azeredo (1997) comenta que usualmente, no Brasil, é utilizada a sapata excêntrica para caso de fundações superficiais de divisa, como na Figura 7, podendo ela ser utilizada com viga alavanca ou sem. A NBR 6122 (ABNT, 1996) prescrevia especificamente que as sapatas de pilares junto às divisas deveriam ter suas excentricidades eliminadas, obrigatoriamente, por viga de equilíbrio, além de algumas outras prescrições que deviam ser seguidas caso a fundação possuísse excentricidade de cargas, mas não fosse relacionada a divisa. Contudo, de acordo com Lopes e Velloso (2011) a normativa extinguiu essas obrigatoriedades, uma vez que ela passou a adotar o conceito de área efetiva.

Figura 7 - Sapata excêntrica



Fonte: Montoya (2001)

Lopes e Velloso (2011, p. 138) complementam que, “entretanto, os autores são de opinião que a limitação das excentricidades é critério recomendável e prudente, mesmo adotando-se o conceito de área efetiva”. Montero (2016) explica que a utilização da sapata excêntrica sem viga alavanca é utilizável apenas para cargas baixas, sendo que, quando essa carga se torna alta, o volume da sapata isolada necessário para absorver sozinha essa excentricidade se torna excessivo. Sendo assim, entende-se que apesar da normatização oferecer meios de executar uma fundação de divisa sem um elemento que ajude a absorver a excentricidade, não é recomendado por profissionais da área.

2.2.2 Viga de equilíbrio

A NBR 6122 (ABNT, 2019) define a viga de equilíbrio, ou viga alavanca, a qual recebe a carga de pilar e é dimensionada ao ponto de transmitir essa mesma carga de forma centrada às fundações. Esse elemento, conforme os autores Lopes e Velloso (2011), é executado ligando a sapata de divisa com um pilar interno da obra, prática essa que frequentemente culmina em complicações durante a execução que exigem outras soluções, como por exemplo quando o pilar central mais próximo não possui alinhamento ou quando o terreno da edificação é muito estreito, resultando em obra em duas divisas.

Ainda, a NBR 6122 (ABNT, 2019) salienta que a profundidade mínima das fundações de divisa, com exceção em casos de obra cujas sapatas tenham a maioria das dimensões inferiores que 1 metro, deve ser de 1,5 metros, com isso entende-se que a viga de equilíbrio se encontra nessa mesma profundidade, uma vez que a mesma fica engastada na sapata e não no fuste. Sendo assim, a combinação da necessidade de escavação de uma vala profunda, em conjunto

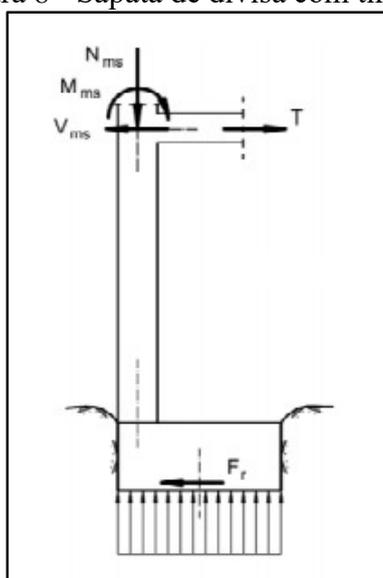
com as frequentes complicações de projeto, torna a utilização da viga alavanca de complexidade maior que os outros elementos.

2.2.3 Soluções atípicas

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define sapata como um elemento de volume especial para transmitir cargas ao terreno, sendo definidas pela NBR 6122 (ABNT, 2019) algumas nomenclaturas usuais para diferentes formatos, conforme citado anteriormente, entretanto, ambas normativas não definem sapata excêntrica e nem especificam obrigatoriedades geométricas referentes a fundações superficiais de divisa. Com isso, entende-se que apesar de existirem situações usualmente utilizadas, há a possibilidade de utilização de modelos de diferentes formas, espessuras ou concepções desde que as sapatas resistam aos esforços e absorvam a excentricidade de carga que estão presentes em pilares de divisa.

Um exemplo de modelo incomum, principalmente no Brasil, é a sapata excêntrica com colaboração da viga superior, sobre o qual Montero (2016) explica que a viga de baldrame trabalharia como tirante a flexo tração, como ilustrado na Figura 8, podendo admitir uma distribuição uniforme da pressão ao solo. Montoya (2001) alerta que esse método é recomendado para suportar cargas pequenas.

Figura 8 - Sapata de divisa com tirante

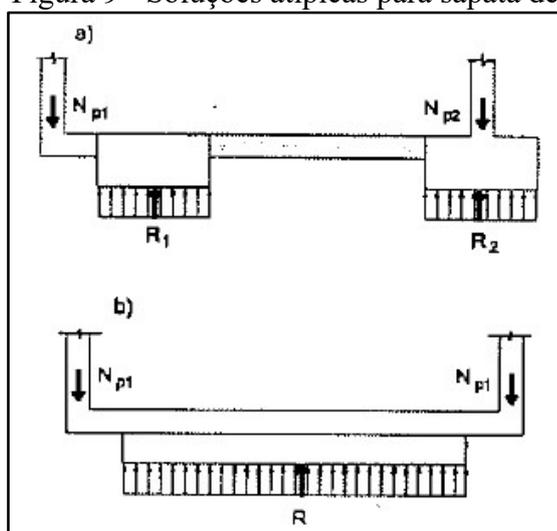


Fonte: Montero (2016)

Além disso, Calavera (2000) também apresenta diversas soluções possíveis para pilares de divisa que diferem um pouco das usuais. Um modelo possível de ser utilizado seria uma

sapata recuada, conforme Figura 9-a, de forma que a viga de equilíbrio receberia a função de transição em relação a carga excêntrica. O autor sugere também como opção a utilização de uma espécie de sapata corrida abaixo da viga que apoiaria dois pilares de divisa, como ilustrada na Figura 9-b.

Figura 9 - Soluções atípicas para sapata de divisa



Fonte: Calavera (2000)

2.3 PARÂMETROS DE CÁLCULO

A carga suportada por uma estrutura de concreto armado segue um caminho de transferência até o solo que respeita os princípios da estática que, de acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2017), inicia-se com a laje suportando os carregamentos provenientes de ocupações, revestimentos, entre outros, transmitindo-os para as vigas e sucessivamente para os pilares e fundações, sempre carregando o peso próprio de cada elemento. Sendo assim, independentemente de sua classificação, Azeredo (1997) afirma que os elementos de fundações possuem a função de receber essa carga da estrutura e transmiti-la para o terreno.

Dessa forma, entende-se que os parâmetros adotados em toda estrutura influenciam no dimensionamento e detalhamento final da fundação, uma vez que os mesmos determinam a carga que ela recebe. Além disso, Berberian (1986) ressalta que nessa interação solo-estrutura, o projeto de fundação deve receber ênfase no solo, por ser o elemento mais fraco e complexo.

2.3.1 Aspectos geotécnicos

Segundo Hachich et al. (1998), a engenharia de fundações é aprimorada pela experiência, observações e interpretações, e isso não se faz sem atentar-se para as propriedades do solo. A NBR 6122 (ABNT, 2019) determina que para qualquer edificação deverá ser feita a investigação geotécnica, buscando determinar a estratigrafia e tipo do solo, o nível d'água e o índice de resistência à penetração N_{SPT} , utilizado para a determinação da tensão admissível do solo. Hachich et al. (1998) explicam que o *Standart Penetration Test* (SPT) é de longe o ensaio mais executado na maioria dos países do mundo, inclusive no Brasil, o qual consiste resumidamente na cravação em queda livre de um peso de 65 kg à uma altura de 75 cm.

A NBR 6122 (ABNT, 2019, p. 21) define que “a grandeza fundamental para o projeto de fundações rasas é a tensão admissível”, termo que a normativa ainda define como “máxima tensão que, aplicada ao terreno pela fundação rasa ou pela base de tubulão, atende, com fatores de segurança predeterminados, aos estados limites últimos e de serviço”. Berberian (1986), guiado pela norma brasileira define que existem algumas formas para determinação tensão através do estado limite último, sendo eles: prova de carga sobre placa, métodos teóricos ou métodos semiempíricos. Além da tensão admissível, a coesão ou ângulo de atrito interno, são aspectos do solo que influenciam diretamente nas verificações de deslizamento da sapata. Contudo, o autor destaca que por mais elaboradas que sejam os ensaios “*in situ*”, os ensaios laboratoriais e as teorias para cálculo da capacidade de carga, o bom senso, a análise de obras vizinhas e a comparação com formulações simples deverão ser determinantes de um bom projeto de fundações.

2.3.2 Concepção estrutural

Alva (2007) explica que não são só os aspectos geotécnicos que implicam na decisão do tipo de fundação, ainda devem ser observados o custo de implantação, as limitações do mercado da região que se encontra a obra, as edificações vizinhas, etc. Por isso Baroni e Viero (2007) afirmam que a concepção “para o engenheiro estrutural é um conhecimento necessário para dar subsídios ao lançamento e ao dimensionamento final dos elementos estruturais”. Além disso, como citado por Lopes e Velloso (2011) sobre as problemáticas da fundação de divisa, ela deve ser evitada durante a concepção do posicionamento dos pilares, tornando a obra menos complexa e conseqüentemente mais barata.

2.3.3 Resistência dos materiais

Dentre todas as propriedades do concreto, ele pode ser classificado de acordo com sua resistência característica à compressão (f_{ck}) uma vez que a NBR 8953 (ABNT, 2015) divide em duas classes conforme a Tabela 1. Além disso, a NBR 8953 (ABNT, 2015) afirma que “Os concretos com classe de resistência inferior a C20 não são estruturais e, caso sejam utilizados, devem ter seu desempenho atendido como descrito pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015).”

Tabela 1 - Classes de resistência de concretos estruturais

Classes de resistência do grupo 1	Resistência característica à compressão (MPa)	Classes de resistência do grupo 2	Resistência característica à compressão (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8953:2015

De acordo com Porto e Fernandes (2015) a utilização do concreto simples se torna muito limitada uma vez que não apresenta uma boa resistência à tração, então para isso, associa-se ao concreto o aço. A NBR 6118 (ABNT, 2014) orienta que o valor característico da resistência de escoamento do aço (f_{yk}) deve estar nas categorias CA-25, CA-50 e CA-60, assim como as suas seções transversais estabelecidas pela NBR 7480 (ABNT, 2007). Além disso, deve ser observada a aderência mecânica entre aço e concreto, que pode ser quantificada através do coeficiente de deformação superficial das barras, com valores mínimos obtidos na NBR 7480 (ABNT, 2007).

2.3.4 Classe de agressividade

A classe de agressividade ambiental tem relação com a localização da edificação e afeta diretamente a durabilidade do concreto, uma vez que, de acordo com a NBR 6118 (ABNT,

2014, p. 16) “A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre a estrutura de concreto armado.” Com isso, a NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que a CAA deve ser classificada de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 – Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana (a,b)	Pequeno
III	Forte	Marinha (a)	Grande
		Industrial (a,b)	
IV	Muito Forte	Industrial (a,c)	Elevado
		Respingos de maré	

a- Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura.

b- Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

c- Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, industriais químicas.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014

Determinada a CAA busca-se qual espessura de cobertura da armadura e qualidade de concreto que supre as necessidades da estrutura no ambiente referido. Com isso, a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece na Tabela 2 qual a classe de concreto e relação água/cimento mínima para o CAA definido, além disso, na Tabela 3 ela determina qual o cobrimento nominal mínimo da armadura relacionando a classe de agressividade com o tipo de elemento estrutural.

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto (a)	Tipo (a)	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação a/c em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
		$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

a - CA corresponde a concreto armado e CP a concreto protendido

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014

Tabela 3 - Correspondência entre a CAA e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV (c)
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje (b)	20	25	35	45
	Viga / Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo (d)	30	30	40	50
Concreto protendido (a)	Laje	25	30	40	50
	Viga / Pilar	30	35	45	55

a- Cobrimento nominal das bainhas ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

b- Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, com pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitando um cobrimento nominal $\geq 15\text{mm}$.

c- Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensivamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

d- No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal $\geq 45\text{mm}$.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014

2.3.5 Ações na estrutura

A carga que será recebida por uma estrutura acaba sendo o ponto de partida após a concepção e pré-dimensionamento e, mesmo sendo um cálculo simples para encontrar o seu peso próprio, ela varia muito conforme suas outras características. Com isso a NBR 6120 (ABNT, 2019), que fala sobre as ações para cálculo de estruturas de edificações, prioriza esse assunto e divide essa carga em duas categorias: ações permanentes e ações variáveis.

2.3.5.1 Ações permanentes (g)

Usualmente a ação mais preponderante nessa categoria é o peso próprio da estrutura, na qual busca-se o volume nominal do elemento a ser dimensionado e multiplica-se pelo peso específico (γ) do material, o qual Carvalho e Figueiredo Filho (2017) estipulam um valor

aproximado de 25 kN/m³. Além disso, a NBR 6120 (ABNT, 2019) estipula as diferentes cargas a serem consideradas referentes aos diferentes componentes construtivos: alvenarias, divisórias, revestimentos de pisos, telhados, enchimentos, tubos, entre outros.

2.3.5.2 Ações variáveis (q)

As cargas variáveis referem-se especialmente a valores que não são constantes, por exemplo, caso busca-se o dimensionamento de uma escola, refere-se à carga dos alunos na estrutura além de materiais como classes e cadeiras. A NBR 6120 (ABNT, 2019) estabelece uma tabela com todos valores característicos nominais das cargas variáveis para uso e ocupação de maneira uniformemente distribuída ou pontual.

A NBR 6123 (ABNT, 1988) ainda demonstra os parâmetros para considerar a força do vento na estrutura, também definida como carga variável, sendo que se encontra a pressão dinâmica do vento através da velocidade característica. Essa velocidade leva em conta quatro fatores da construção, especialmente topográficos, sendo eles:

- a) V_0 - Velocidade básica definida pelo mapa de isopletas da NBR 6123 (ABNT, 1988) para a região em que a edificação se encontra;
- b) S_1 - Relevo do terreno onde o empreendimento será construído;
- c) S_2 - Rugosidade do terreno, dimensões e altura sobre o terreno, sendo necessário classificar a estrutura pelos obstáculos dos arredores e pelas suas dimensões totais;
- d) S_3 - Fator estatístico da obra que se refere ao grau de segurança requerido e a vida útil da edificação.

2.4 DIMENSIONAMENTO

2.4.1 Sapata isolada

2.4.1.1 Dimensionamento geométrico

Segundo Araújo (2014a) inicialmente estima-se uma área da base da sapata considerando a pressão admissível do solo, conforme Equação 2. Além disso, adota-se o acréscimo do peso próprio da fundação.

$$S_{sap} = \frac{N_k \cdot W_k}{\sigma_{solo}} \quad (2)$$

Sendo:

S_{sap} é a área da base da sapata

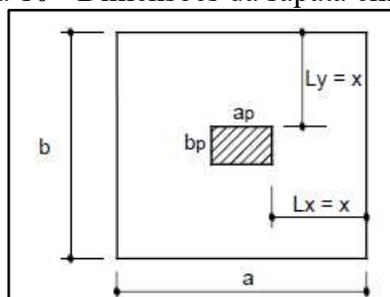
N_k é a carga vertical característica atuante na sapata

W_k é o peso próprio característico da sapata

σ_{solo} é a tensão admissível do solo

Hachich et al. (1998, p. 228) trazem que “o dimensionamento mais econômico será aquele que conduza a momentos aproximadamente iguais nas duas abas, em relação à mesa da sapata.” Para isso, busca-se determinar suas dimensões de modo que seus balanços sejam iguais, L_x e L_y conforme Figura 10. Dessa forma determina-se a menor dimensão da sapata através da Equação 3 e depois realiza-se uma relação com a área da base na Equação 4 buscando encontrar a outra medida. Os autores ainda comentam ser comum arredondar esses valores em questão para múltiplos de 5cm e a favor da segurança.

Figura 10 - Dimensões da sapata em planta



Fonte: Alva (2007)

$$b = 0,5 \cdot (b_p - a_p) + \sqrt{0,25 \cdot (b_p - a_p)^2 + S_{sap}} \quad (3)$$

$$a = \frac{S_{sap}}{b} \quad (4)$$

Sendo:

a é a maior dimensão da sapata

b é a menor dimensão da sapata

b_p é a menor dimensão do pilar

a_p é a maior dimensão do pilar

S_{sap} é a área da base da sapata

Já para a determinação da altura da sapata, de acordo com Alva (2007), ela deve ser suficiente para permitir a correta ancoragem da armadura longitudinal do pilar respeitando as condições do item 9.4 da NBR 6118 (ABNT, 2014) e ainda, busca-se inicialmente trabalhar com sapatas rígidas respeitando a altura mínima para isso na Equação 1. No caso da altura mínima em relação à aderência da armadura do pilar, a NBR 6118 (ABNT, 2014) nos traz que pode ser considerado o efeito favorável da compressão transversal às barras, por isso, Araújo (2014a) determina essa dimensão através da Equação 5 nas situações mais usuais de projetos. Nesse caso, o comprimento de ancoragem l_b é resumido ao produto da multiplicação entre o diâmetro da armadura longitudinal do pilar, e o adimensional n , o qual parte da relação entre a resistência de cálculo do aço e da resistência de aderência de cálculo entre o concreto e o aço.

$$h \geq 0,6 \cdot (n \cdot \phi_b) + c \quad (5)$$

Sendo:

h é a altura da sapata

n é o valor encontrado através da Tabela 4

ϕ_b é o diâmetro da armadura longitudinal do pilar

c é o cobrimento inferior da armadura

Tabela 4 - Valor de n para a Equação 5

Aço	Concreto estrutural		
	C20	C25	C30
CA 25 (barras lisas)	51	43	38
CA 50 (barras nervuradas)	45	38	34
CA 60 (barras entalhadas)	87	72	65

Fonte: Adaptado de Ibracon (2003 apud ZATTI, 2020)

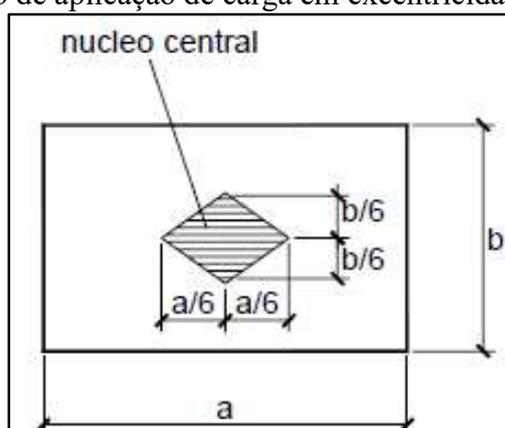
Uma vez que o *CYPECAD* se trata de um *software* para cálculo computacional, ele possui um método iterativo para cálculo chegando nas dimensões mínimas da fundação após realizar todas as verificações. Não necessariamente deve ser estimado medidas iniciais para isso, porém com o pré-dimensionamento é possível perceber grandes divergências de resultados e prováveis problemas de má utilização do programa.

2.4.1.2 Excentricidade

Bastos (2019) explica que, além das sapatas de divisa, as sapatas centradas também podem sofrer ações excêntricas devido a alguma carga horizontal que possa gerar momento fletor na mesma, utilizando o vento como exemplo preponderante. Nesse caso, de acordo com o autor, classifica-se primariamente se a excentricidade é em uma ou duas direções, depois a posição da aplicação da força vertical em relação ao núcleo central da sapata, para enfim, possibilitar a verificação das tensões na sua base.

A Figura 11 demonstra a região citada, para sapatas de base retangular, os casos que possuam excentricidade em apenas uma direção e as distâncias desse núcleo central de inércia que devem ser comparadas com a mesma. A excentricidade encontra-se através da divisão do momento fletor (M) na mesma direção pela carga vertical (N).

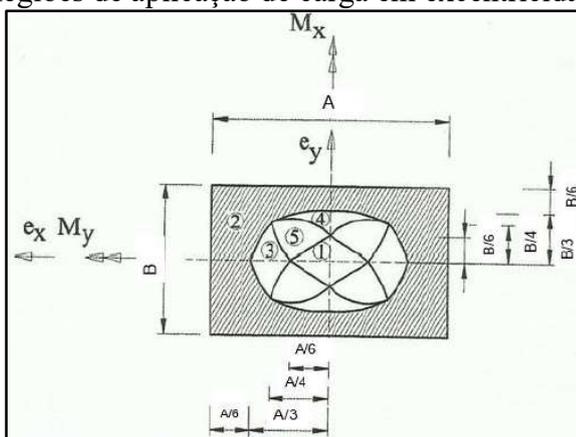
Figura 11 – Região de aplicação de carga em excentricidade em uma direção



Fonte: Alva (2007)

Já a Figura 12, conforme Lopes e Velloso (2010), demonstra as regiões que a resultante da carga vertical pode estar posicionada em relação ao eixo da fundação quando se trata de excentricidade em duas direções. As distâncias devem ser comparadas com a excentricidade total encontrada a fim de obter as tensões máximas aplicadas.

Figura 12 - Regiões de aplicação de carga em excentricidade em duas direções



Fonte: Baroni (2018 apud ZATTI, 2020)

a) Excentricidade em uma direção e carga dentro do núcleo

Para essa situação encontra-se a tensão máxima e mínima através da Equação 6, utilizando o sinal de positivo para a primeira situação e negativo para a segunda. Segundo Bastos (2012 apud ZATTI, 2020) a tensão máxima de compressão na borda da sapata deve respeitar a condição de ser menor que a tensão admissível do solo, já a tensão mínima deverá ser positiva ou nula, pois não deve produzir tensões de tração no solo.

$$\sigma = \frac{N}{a.b} \left(1 \pm \frac{6.e}{a} \right) \quad (6)$$

Sendo:

σ é a tensão encontrada na base da sapata

N é a carga vertical aplicada

a é a maior dimensão da sapata

b é a menor dimensão da sapata

e é a excentricidade em na direção “a”

b) Excentricidade em uma direção e carga no limite do núcleo

Para essa situação, segundo Bastos (2019), encontra-se a tensão máxima através da Equação 7, uma vez que as variáveis são as mesmas da Equação 6, e a tensão mínima é encontrada da mesma forma utilizada na situação “a”. Além disso, as condições devem ser respeitadas da mesma forma que citadas para a carga dentro da região do núcleo.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 2 \cdot \frac{N}{a \cdot b} \quad (7)$$

c) Excentricidade em uma direo e carga fora do núcleo.

De acordo com Bastos (2019), nesse caso uma parte da sapata e do solo ficam sob trao ($\sigma_{m\acute{i}n} < 0$). Contudo, exclui-se essa zona tracionada e adota-se um novo diagrama triangular onde seu centro geométrico coincida com o limite do novo núcleo central. Sendo assim a tensão de compressão máxima, que deverá ser menor que a tensão admissível do solo, passa a ser determinada conforme Equao 8, uma vez que as variáveis são as mesmas da Equao 6.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot b \cdot (0,5 \cdot a - e)} \quad (8)$$

d) Excentricidade em duas direoes e carga dentro da região 1.

Segundo Bastos (2012 apud ZATTI, 2020), nesse caso toda a seo estará sendo comprimida, encontrando-se a tensão máxima e mínima através das Equaoes 9 e 10, respectivamente, considerando que as variáveis descritas são as mesmas da Equao 6. A comparao dessas tensoes ocorre da mesma forma que para a situao “a”.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{N}{a \cdot b} \cdot \left[1 + \frac{6e_a}{a} + \frac{6e_b}{b} \right] \quad (9)$$

$$\sigma_{m\acute{i}n} = \frac{N}{a \cdot b} \cdot \left[1 - \frac{6e_a}{a} - \frac{6e_b}{b} \right] \quad (10)$$

e) Excentricidade em duas direoes e carga dentro da região 2.

Nesse caso a sapata não estaria em equilíbrio, e, de acordo com Bastos (2012 apud ZATTI, 2020), a carga não deve ser aplicada. Dessa forma, busca-se modificar as dimensoes da mesma ou algum outro parâmetro de cálculo que favorea a segurana e mantenha a excentricidade da carga vertical dentro das regioes propostas.

f) Excentricidade em duas direções e carga dentro das regiões 3 ou 4.

Para as regiões 3 e 4, de acordo com Bastos (2012 apud ZATTI, 2020), encontra-se a inclinação da linha neutra da carga em relação ao seu eixo de excentricidade, conforme Figura 13, através das Equações 11, 12 e 13, sendo as variáveis “ s ” e “ a ” com relação à região 3 e “ t ” e “ β ” em relação à região 4. As tensões podem ser interpretadas da mesma forma que para a situação “c”.

$$s = \frac{b}{12} \cdot \left(\frac{b}{e_y} + \sqrt{\frac{b^2}{e_y^2} - 12} \right) : t = \frac{a}{12} \cdot \left(\frac{a}{e_x} + \sqrt{\frac{a^2}{e_x^2} - 12} \right) \quad (11)$$

$$\tan \alpha = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{a-2e_x}{s+e_y} \right) : \tan \beta = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{b-2e_y}{t+e_x} \right) \quad (12)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{12.N}{b \cdot \tan \alpha} \cdot \left(\frac{b+2.s}{b^2+12.s^2} \right) : \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{12.N}{a \cdot \tan \beta} \cdot \left(\frac{a+2.t}{a^2+12.t^2} \right) \quad (13)$$

Sendo:

s e t são as distâncias da seção de referência, conforme Figura 13

α e β são as inclinações da linha neutra em relação a seção de referência

σ é a tensão encontrada na base da sapata

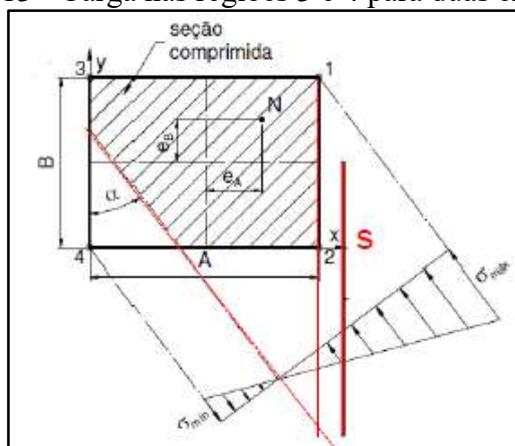
N é a carga vertical aplicada

a é a maior dimensão da sapata

b é a menor dimensão da sapata

e é a excentricidade em determinada direção

Figura 13 - Carga nas regiões 3 e 4 para duas excentricidades



Fonte: Baroni (2018 apud ZATTI, 2020)

g) Excentricidade em duas direções e carga dentro da região 5.

Para região 5, segundo Bastos (2012 apud ZATTI, 2020), encontra-se a excentricidade total “ Δ ” da fundação através da Equação 14 e aplica-se na Equação 15 para a tensão máxima. As variáveis dispostas nas fórmulas são as mesmas da Equação 13 e as tensões podem ser interpretadas como descrito no item “c”.

$$\Delta = \frac{e_x}{a} + \frac{e_y}{b} \quad (14)$$

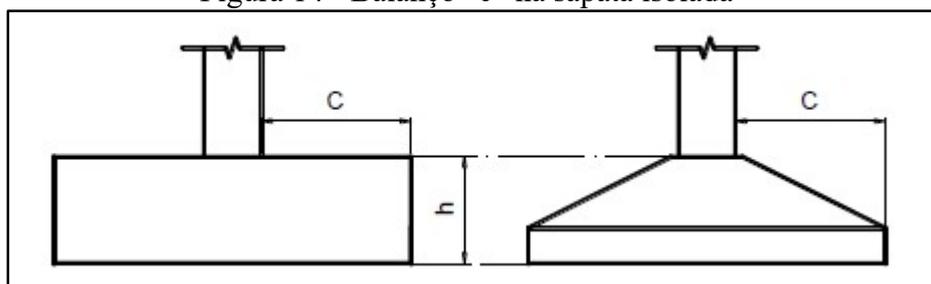
$$\sigma_{m\acute{a}x} = \left(\frac{N}{b.a}\right) \cdot \Delta \cdot [12 - 3,9 \cdot (6 \cdot \Delta - 1) \cdot (1 - 2 \cdot \Delta) \cdot (2,3 - 2 \cdot \Delta)] \quad (15)$$

O *CYPECAD* propõe um diagrama de tensões do terreno trapezoidal e tridimensional em função dos esforços. Dessa forma, “não se admitem trações, pelo que, quando a resultante sair do núcleo central, aparecerão zonas sem tensão.” (*CYPECAD* – Memorial de cálculo, 2003). Além disso, é verificado se a tensão média não supera a do terreno e nem se a tensão máxima na borda não supere numa determinada porcentagem a tensão média dependendo do tipo de combinação.

2.4.1.3 Dimensionamento à flexão

A NBR 6118 (ABNT, 2014) possibilita para o cálculo e dimensionamento de sapatas a utilização de modelos tridimensionais lineares ou modelo biela-tirante, podendo ser utilizados modelos de flexão. No método das bielas proposto por Lebel, segundo Bastos (2019), nota-se que o limite para sua utilização corresponde à denominação de sapata flexível, de forma que existe uma pequena faixa de valores para a altura útil que resultarão em sapata flexível, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). Já no modelo de flexão CEB-70, proposto pelo “*Comite Euro-International Du Beton*” e traduzido pelo Professor Lauro Modesto dos Santos, de acordo com Bastos (2019), só pode ser aplicado quando a divisão entre o balanço “ c ” e a altura total da sapata “ h ”, como ilustrado na Figura 14, for maior ou igual que 0,5 e menor ou igual que 2.

Figura 14 - Balanço “c” na sapata isolada



Fonte: Bastos (2019)

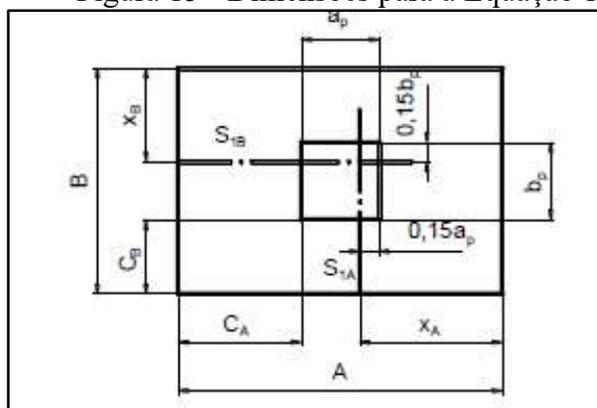
De acordo com Bastos (2019), “no caso do CEB-70, os momentos fletores são calculados, para cada direção, em relação a uma seção de referência plana, perpendicular à superfície de apoio, ao longo da sapata e situada internamente ao pilar, distante $0,15a_p$.” Dessa forma, o autor explica que, para as sapatas de carga centrada, inicialmente encontra-se a pressão que a mesma exerce sobre o solo, desconsiderando o seu peso próprio, apenas dividindo a carga “ N_k ” pela área da base.

Uma vez obtida essa pressão “ p ”, aplica-se as Equações 16 com suas variáveis demonstradas na Figura 15 para encontrar o momento em cada direção e eles são utilizados para encontrar a área de aço necessária através da Equação 17. No *CYPECAD*, “o dimensionamento à flexão obriga a dispor alturas para que não seja necessária armadura de compressão.” (*CYPECAD* – Memorial de cálculo, 2003)

$$M_{1A} = p \cdot B \cdot \frac{(C_A + 0,15 \cdot a_p)^2}{2} : M_{1B} = p \cdot A \cdot \frac{(C_B + 0,15 \cdot b_p)^2}{2} \quad (16)$$

$$A_s = \frac{M_d}{0,85 \cdot d_1 \cdot f_{yd}} \quad (17)$$

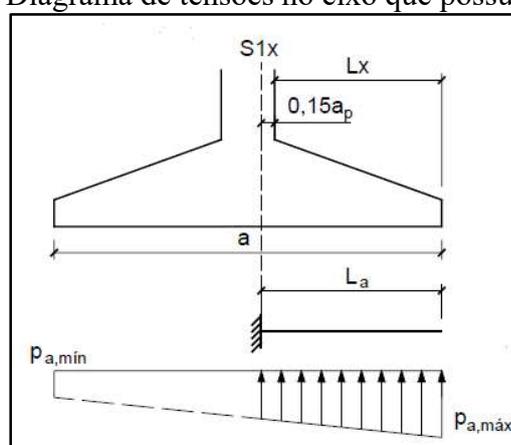
Figura 15 - Dimensões para a Equação 16



Fonte: Bastos (2019)

Para as sapatas que possuem momento fletor atuante, o dimensionamento à flexão, segundo Bastos (2019), deve abranger o diagrama de tensões do solo que ocorre entre a seção S_1 e a extremidade da sapata, distantes pelo valor X_a , conforme Figura 15. Esse diagrama, de acordo com Bastos (2012 apud ZATTI, 2020), assume um formato trapezoidal que para encontrar a pressão no solo, busca-se pela relação entre a tensão máxima e mínima, como na Figura 16. Já no eixo que não ocorre excentricidades, pode-se adotar um diagrama da pressão constante, que de acordo com Bastos (2012 apud ZATTI, 2020), utiliza-se a tensão média do solo.

Figura 16 - Diagrama de tensões no eixo que possui momento atuante



Fonte: Bastos (2019)

2.4.1.4 Força cortante

Bastos (2019) explica que o método CEB-70 considera que o esforço deve ser verificado nas duas direções à uma distância igual a metade da altura útil da sapata. Como a NBR 6118 (ABNT, 2014) explica que nas sapatas rígidas não acontece ruptura por tração diagonal, sendo que apenas a superfície crítica “C” precise ser verificada, Machado (1985) recomenda não considerar nos projetos desse tipo de fundação, sendo utilizada apenas para sapatas flexíveis.

Ainda conforme as incógnitas descritas pela Figura 15, as mesmas devem ser aplicadas na Equação 18 e para encontrar o esforço cortante em cada direção. Além disso, os mesmos devem respeitar a condição do esforço cortante limite encontrada através da Equação 19. Assim como para a flexão, segundo seu memorial de cálculo (2003), o *CYPECAD* dimensiona ao esforço transversal obrigando a dispor alturas para que não seja necessário colocar reforço transversal.

$$V_A = p \cdot B \cdot c_{2b} : V_B = p \cdot A \cdot c_{2a} \quad (18)$$

$$V_{d,lim} = 0,63 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot b_2 \cdot d_2 \quad (19)$$

2.4.1.5 Diagonal comprimida

Em conformidade com a NBR 6118 (ABNT, 2014), como citado anteriormente, é necessário, nas sapatas rígidas, a verificação da diagonal comprimida, na superfície crítica C . Segundo Bastos (2019) essa região acontece na ligação pilar-sapata, uma vez que o perímetro “ u ” desse contorno é a soma dos lados do pilar. De acordo com Baroni (2018 apud ZATTI, 2020) e respeitando a NBR 6118 (ABNT, 2014), a condição é verificada enquanto a tensão solicitante de compressão (τ_{sd0}) permanecer menor ou igual à tensão resistente de compressão (τ_{Rd2}) através das equações 20, 21 e 22, nas quais considera-se “ d_0 ” como a altura útil da sapata e “ v_d ” como a carga vertical majorada em 1,4 vezes.

$$\tau_{sd0} = \frac{V_d}{u \cdot d_0} \quad (20)$$

$$\tau_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_v \cdot f_{cd} \quad (21)$$

$$\alpha_v = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (22)$$

Sendo:

f_{ck} é a resistência à compressão característica do concreto

f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto

2.4.1.6 Punção

Além da tensão de cisalhamento na superfície crítica C , para as sapatas do tipo flexível, a NBR 6118 (ABNT, 2014) estipula que deve ser verificado o cisalhamento através do fenômeno de punção, no mesmo modelo utilizado para lajes, na superfície crítica C' , que segundo a própria normativa, acontece em um perímetro em torno do pilar a uma distância de duas vezes a altura útil da sapata.

NBR 6118 (ABNT, 2014) diz que a tensão solicitante de compressão na superfície C' ($\tau_{sd,C'}$) deverá ser menor ou igual que a tensão resistente do esforço (τ_{Rd}), conforme as Equações 23 e 24, uma vez que a taxa geométrica de armadura de flexão aderente (ρ) é resultado

da raiz quadrada da multiplicação das taxas de armaduras nas duas direções ortogonais calculadas (ρ_x e ρ_y). A equação ainda carrega uma parcela de tensão resistente para lajes em que ocorrem a protensão (σ_{cp}), não sendo o caso das sapatas.

$$\tau_{Sd,Cr} \leq \tau_{Rd1} = 0,13 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}}\right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,10 \cdot \sigma_{cp} \quad (23)$$

$$d = (d_x + d_y)/2 \quad (24)$$

2.4.1.7 Estabilidade

Bastos (2019) explica que, quando o elemento de fundação superficial do tipo sapata recebe uma carga que se caracteriza por ser horizontal ou uma carga de momento fletor, deve-se verificar a estabilidade da mesma. Ainda, segundo o autor, essa estabilidade se caracteriza pela segurança ao deslizamento, garantida pelo atrito entre a base da sapata e o solo e pela segurança ao tombamento, comparando-se os momentos fletores em torno de um ponto no extremo do elemento.

A verificação quanto ao deslizamento, ou escorregamento, de acordo com Bastos (2012 apud ZATTI, 2020), ocorre quando a força de atrito do solo (F_{estab}) dividido pela força horizontal aplicada na sapata (F_{desliz}) seja maior ou igual que 1,5. Sendo assim, o autor também demonstra que essa força resistente é encontrada a partir do tipo de solo, sendo utilizada a Equação 25 para solos coesivos e a Equação 26 para solos arenosos (não coesivos).

$$F_{estab} = S_{sapata} \cdot c \cdot \left(\frac{2}{3}\right) \quad (25)$$

$$F_{estab} = (N + P) \cdot \tan \alpha \quad (26)$$

Sendo:

S_{sapata} é a área da base da sapata

c é o fator de coesão do solo

N é a carga vertical aplicada na sapata

P é o peso próprio da sapata

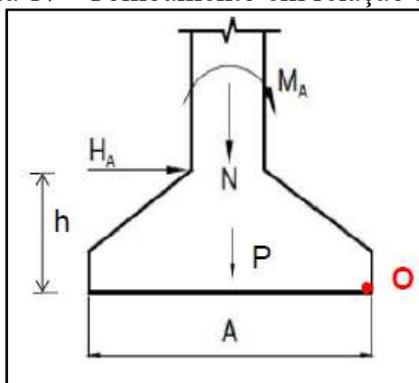
α é o ângulo de atrito entre solo e a sapata

Já na verificação ao tombamento, semelhante ao escorregamento, Bastos (2012 apud ZATTI, 2020) explica que o momento estabilizante (M_{estab}) dividido pelo momento de tombamento (M_{tomb}), ambos em relação ao ponto "o", conforme Figura 17, deve ser maior ou igual a 1,5 para garantir a segurança. Esses valores são encontrados através das Equações 27 e 28, uma vez que suas variáveis também estão descritas na Figura 17. Bastos (2019) complementa que o peso do solo sobre a sapata pode também ser considerado para o momento estabilizante.

$$M_{tomb} = M_A + H \cdot h \quad (27)$$

$$M_{estab} = (N + P) \cdot 0,5 \cdot A \quad (28)$$

Figura 17 - Tombamento em relação ao ponto "o"



Fonte: Baroni (2018 apud ZATTI, 2020)

2.4.2 Sapata excêntrica com viga de equilíbrio

Conforme citado anteriormente, Montero (2016) explica que quando a carga sobre a sapata de divisa se torna considerável, o volume necessário para ela absorver a excentricidade, sem a utilização de viga de equilíbrio, se torna considerável. Com isso, quando se opta pela utilização desse elemento linear para auxiliar no equilíbrio, ocorre uma redução das dimensões da sapata e, em contrapartida, se torna necessário o dimensionamento do elemento de viga. Bastos (2019) demonstra um roteiro diferente para a estimativa das dimensões da sapata, uma vez que o restante das verificações ocorra da mesma forma que para sapata centrada (sem excentricidades).

2.4.2.1 Dimensionamento geométrico da sapata

Alva (2007) explica que uma opção para o dimensionamento geométrico das sapatas é o método iterativo no qual, conforme Figura 18, estima-se um valor inicial para a reação “ R_1 ” igual a 20% maior que a carga vertical “ N ”. Dessa forma, segundo Bastos (2019), encontra-se a área de apoio da sapata de divisa “ S_1 ” substituindo a carga vertical da Equação 2 pela reação encontrada. O autor ainda demonstra que a divisão entre a maior dimensão da sapata pela menor sugere-se que seja menor ou igual a 3, com isso, através das Equações 29 e 30, encontra-se o valor para sua menor dimensão e, respectivamente, a excentricidade da mesma.

$$B_1' = \sqrt{\frac{S_1'}{2}} \quad (29)$$

$$e_1' = 0,5 \cdot B_1' - 0,5 \cdot b_{p1} \quad (30)$$

Sendo:

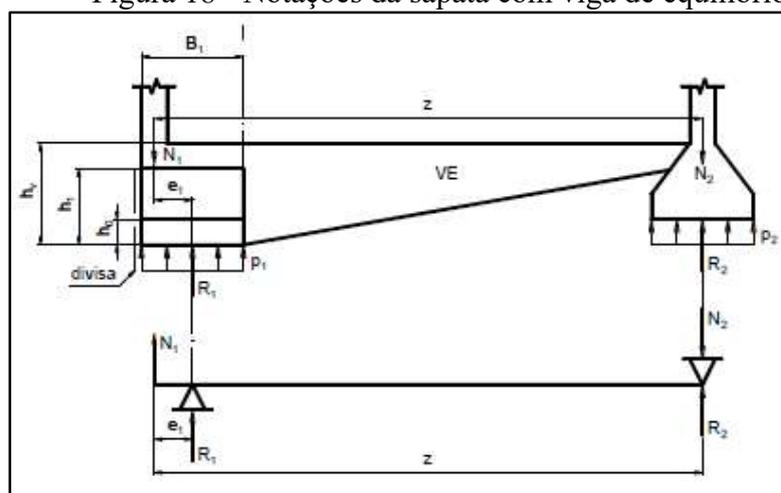
B_1' é a menor dimensão da sapata

S_1' é a área de apoio da sapata

e_1' é a excentricidade

b_{p1} é a dimensão do pilar paralela a menor dimensão da sapata

Figura 18 - Notações da sapata com viga de equilíbrio



Fonte: Bastos (2019)

Através da Equação 31, que possui suas variáveis descritas na Figura 18, conforme Bastos (2019), encontra-se a reação “ R_1 ” que deverá ser comparada com a estimativa de “ R_1' ” de forma que, se forem iguais, adota-se “ B_1 ” e “ S_1 ”, encontrados durante o cálculo para

determinar o restante das dimensões. Já se a diferença entre as duas reações estiver dentro de uma margem de 5%, adota-se também a mesma dimensão “ B_1 ”. Contudo recalcula-se “ S_1 ” através da Equação 2, utilizando “ R_1 ” como carga vertical. Por fim, o autor ainda demonstra que, caso as reações extrapolarem esse limite de diferença, o dimensionamento geométrico deve ser refeito substituindo “ R_1 ” pelo valor encontrado de “ R_1 ”. Para o restante das dimensões da sapata, utiliza-se o mesmo roteiro da sapata isolada.

$$R_1'' = N_1 \cdot \left(\frac{z}{z - e_1'} \right) \quad (31)$$

2.4.2.2 Dimensionamento da viga de equilíbrio

Segundo Araújo (2014a), em vigas, os seus esforços solicitantes são dimensionados através da análise estrutural considerando o regime elástico, ou seja, admitindo-se que toda a viga se encontra no estágio I. Carvalho (2017) define esse estágio como quando a resistência característica à tração do concreto não é atingida pela tensão de tração solicitante. Nesse caso, para todos os tipos de vigas, as principais verificações a serem consideradas se tratam da flexão e da cortante em cada peça, descritas abaixo. Além disso, em conformidade com a NBR 6118 (ABNT, 2014), nos casos em que a viga passe de uma altura útil de 60 cm é necessário o dimensionamento de uma armadura de pele dispostas nas faces laterais da mesma.

a) Flexão

De forma geral, com o momento fletor de serviço M_k , dimensiona-se a armadura necessária para suportar esse esforço. Conforme Araújo (2014a), para o dimensionamento de seção retangulares sob flexão normal simples, determina-se o momento solicitante reduzido μ através da Equação 32 a fim de encontrar o adimensional ξ através da Equação 33. Além disso, em conformidade com as falas do autor, o momento reduzido deve ser comparado a um limite de 0,2952 em concretos de f_{ck} menor ou igual a 35 MPa para o dimensionamento ser feito com armadura simples, caso contrário trata-se de um caso de armadura dupla.

Araújo (2014a) explica que o adimensional ξ , o qual possui relação direta com a profundidade da linha neutra do elemento, é utilizado na Equação 34 para enfim determinar a área de aço necessária. No caso do dimensionamento para armadura dupla, observa-se que é encontrada uma segunda área de aço a ser acrescentada a armadura utilizada para o momento

de sinal contrário ao calculado. Além disso, como descrito pela NBR 6118 (ABNT, 2014), deve ser verificada uma quantidade mínima de armadura, além de garantir, durante o detalhamento, o transpasses e dobras necessárias no aço para manter a aderência ao concreto e os espaçamentos mínimos e máximos entre barras.

$$\mu = \frac{M_d}{bd^2\sigma_{cd}} \quad (32)$$

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} \quad (33)$$

$$A_s = \xi bd \frac{\sigma_{cd}}{f_{yd}} \quad (34)$$

Sendo:

M_d é o momento fletor de cálculo

b é a largura da viga

d é a altura útil da viga

σ_{cd} é a tensão no concreto

f_{yd} é a resistência a tração de cálculo do aço

b) Cortante

O dimensionamento ao esforço cortante, de modo geral, além das recomendações da norma brasileira, segue os princípios da treliça idealizada de Morsch que, conforme Araújo (2014a, p. 212), “imagina-se que, após a fissuração, o esforço cortante é equilibrado pela associação de bielas comprimidas de concreto e de diagonais tracionadas acompanhando as trajetórias das tensões principais”. Com isso, o autor explica que a utilização de estribos na angulação de 45° seria vantajoso para a estrutura, porém, por razões de praticidade executiva, emprega-se quase sempre o estribo vertical.

Desta forma, em conformidade com os ditames da NBR 6118 (ABNT, 2014), define-se inicialmente a tensão convencional de cisalhamento τ_{wd} , através da Equação 35. Essa tensão deve ser verificada com a tensão de cisalhamento limite τ_{wu} , encontrada a partir da Equação 36, uma vez que se deve modificar as dimensões da seção transversal da viga nos casos em que o limite for extrapolado.

$$\tau_{wd} = \frac{V_d}{b_w d} \quad (35)$$

$$\tau_{wu} = 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} \quad (36)$$

Sendo:

V_d é o esforço cortante de cálculo

d é a altura útil da viga

b_w é a largura útil da viga

f_{ck} é a resistência a compressão de cálculo do concreto

f_{cd} é a resistência a compressão característica do concreto

Verificada a condição da biela de compressão, em conformidade com a NBR 6118 (ABNT, 2014), define-se através da Equação 37 a tensão τ_d para cálculo da armadura transversal, a qual será utilizada na Equação 38 que será encontrada a área de aço necessária para resistir ao esforço cortante da peça. Além disso, conforme a mesma norma, assim como para flexão devem ser verificadas as quantidades mínimas, transpasses e espaçamentos durante o detalhamento da armadura.

$$\tau_d = 1,11 \left\{ \tau_{wd} - \left[0,09 (f_{ck})^{\frac{2}{3}} \right] \right\} \quad (37)$$

$$A_{sw} = 100 b_w \frac{\tau_d}{f_{yd}} \quad (38)$$

2.5 ORÇAMENTAÇÃO

De certa forma, um empreendimento gira em torno do aspecto financeiro e sempre demandará um equilíbrio entre ele e os outros aspectos como técnico ou estético, Mattos (2006, p. 22) expõe isso explicando que “independente de localização, recursos, prazo, cliente e tipo de projeto, uma obra é iminente uma atividade econômica e, como tal, o aspecto custo reverte-se de especial importância”. Sendo assim, a orçamentação de uma obra e suas diversas técnicas de aplicação, giram em torno de se aproximar ao máximo de real valor gasto em obra, uma vez que, ainda segundo o autor, o lucro e o sucesso do cronograma para um construtor estão diretamente ligados a uma boa técnica orçamentária.

Gerolla (2016) explica que, dentro de um orçamento para edificação unifamiliar média, a estrutura compõe de 15% a 27% do valor total, sendo que somente as fundações equivalem de

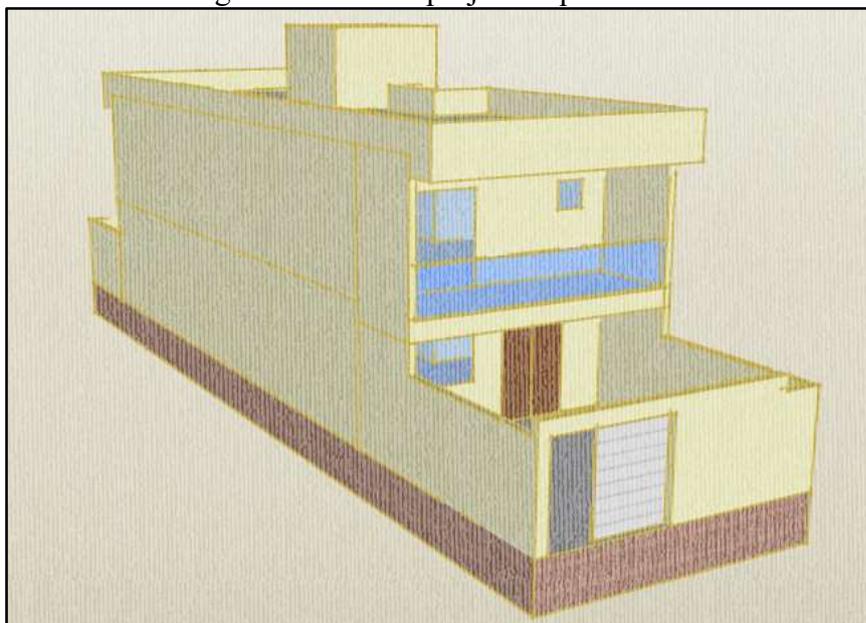
3% a 7%. Entende-se, nesse caso, que a variação desse percentual equivale a limitações topográficas e arquitetônicas, contudo a escolha de soluções adequadas para a estrutura influencia diretamente nesse custo. O SINAPI do Estado do Rio Grande do Sul fornece valores de referência através de tabelas possibilitando estimativas detalhadas desses custos através do preço unitário de cada material, como por exemplo o concreto em m³ e o aço em kg.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

O objeto de estudo se trata de uma residência unifamiliar em concreto armado localizada na cidade de Bento Gonçalves com uma área total construída de aproximadamente 150 m². A construção estará localizada em um terreno de 24 metros de comprimento e 10 metros de largura, sendo que a lateral sul da obra se encontrará na divisa com um terreno vizinho. A Figura 19 demonstra uma visualização 3D da construção com o lado que não possuirá afastamento da divisa.

O empreendimento possui um total de dois pavimentos sendo que o pavimento térreo possui sala de jantar, cozinha, lavanderia, banheiro e quarto, já no pavimento superior possui três quartos, sendo uma suíte, escritório e banho social, conforme Anexo A. Além disso, na cobertura, a residência é dotada de platibandas, uma calha central e um reservatório de mil e quinhentos litros para abastecimento da mesma, representada no Anexo B juntamente com o corte da edificação, o qual demonstra nos dois pavimentos uma altura de 3 m de piso a piso e de 2 m de altura na região do reservatório.

Figura 19 - 3D do projeto arquitetônico



Fonte: Engenheiro Estrutural (2021)

O fato de a edificação estar na divisa acarreta na necessidade da utilização de fundações especiais para os pilares que se encontram nessa lateral, conforme citado anteriormente. Com isso, utilizando o *CYPECAD*, foram feitos o dimensionamento e a comparação técnica e econômica de quatro soluções distintas para esse elemento de sapata de divisa, uma vez que,

assume-se, para o estudo, que a solução de fundações superficiais do tipo sapata seria a melhor dentre os outros tipos desse elemento. Além disso, para auxiliar nos comparativos, considerou-se um modelo em que a construção não estivesse junto a divisa, possibilitando a utilização de sapata centrada em todos os pilares da obra.

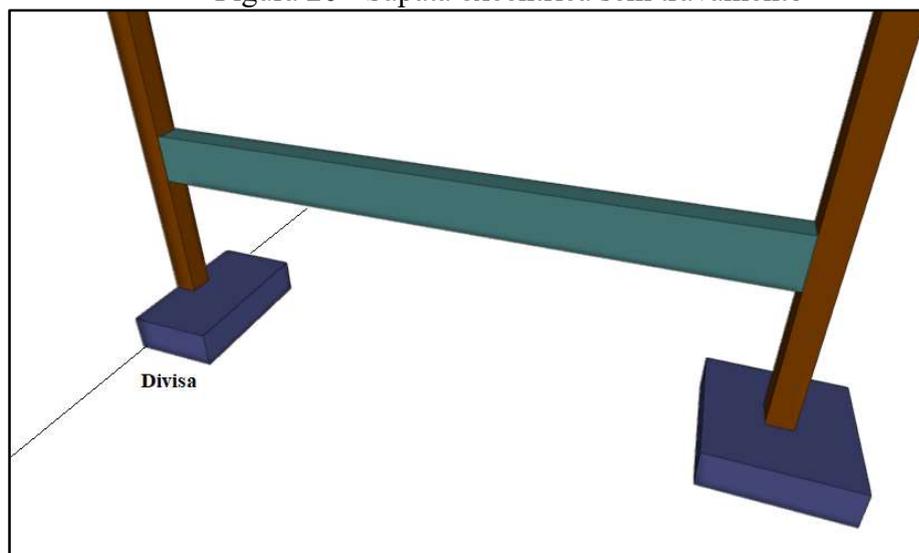
3.1 SOLUÇÕES PARA AS SAPATAS DE DIVISA

O comparativo das fundações superficiais de divisa se divide em quatro soluções: sapata excêntrica sem travamento, sapata excêntrica com viga de equilíbrio, sapata centrada com viga de transição e sapata em formato “T”.

3.1.1 1ª opção - sapata excêntrica sem travamento

A primeira solução para sapata de divisa analisada foi a sapata excêntrica sem possuir nenhum elemento de auxílio para absorver a excentricidade, solução essa que, apesar de não infringir a norma brasileira, contraria a recomendação de autores e estudiosos desse tema. O modelo é demonstrado na Figura 20, uma vez que a sapata é encarregada de absorver todos os esforços e excentricidades. Além disso, o projeto possui vigas de baldrame, porém elas não exercem nenhuma função de equilíbrio, apenas a sua função padrão.

Figura 20 - Sapata excêntrica sem travamento

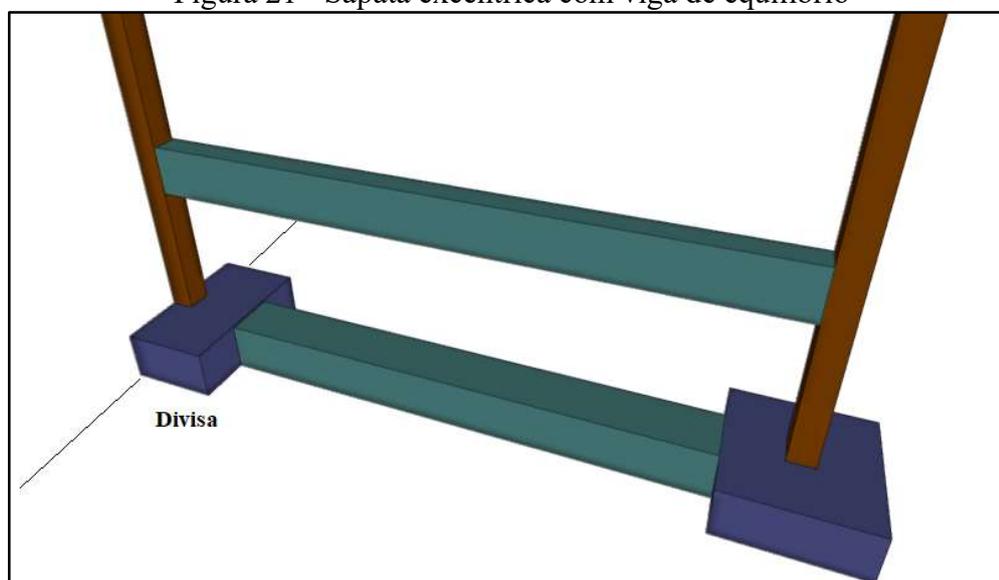


Fonte: Autor (2021)

3.1.2 2ª opção - sapata excêntrica com viga de equilíbrio

A segunda solução para sapata de divisa analisada foi a sapata excêntrica com viga de equilíbrio, solução mais tradicional adotada pelos autores brasileiros, na qual a viga de equilíbrio auxilia a sapata a absorver a excentricidade de carga, além de garantir a segurança contra a descompressão do solo no terreno vizinho. O modelo acontece conforme Figura 21, no qual viga de equilíbrio tem ligação com um pilar interno da obra. Além disso, o projeto possui vigas de baldrame, porém elas não exercem nenhuma função de equilíbrio, apenas a sua função padrão.

Figura 21 - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio

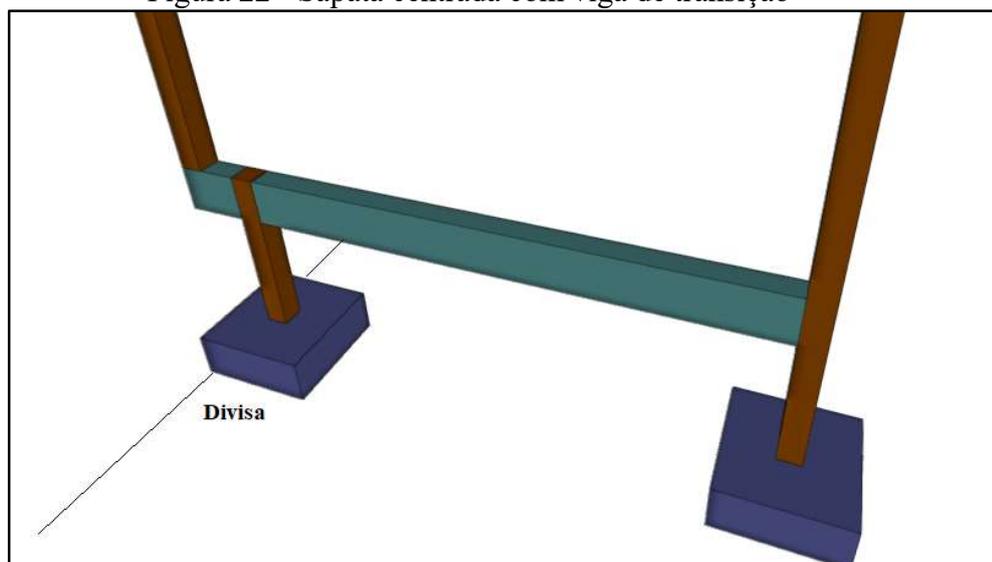


Fonte: Autor (2021)

3.1.3 3ª opção - sapata centrada com viga de transição

A terceira solução para sapata de divisa analisada foi a sapata centrada com viga de transição, na qual, como na Figura 22, a carga do pilar antes de chegar ao solo é transmitida para uma posição recuada através de uma viga de transição, possibilitando a utilização de uma sapata centrada. Além disso, a viga de transição possui também a função de viga de baldrame, suportando igualmente as cargas do pavimento e das paredes.

Figura 22 - Sapata centrada com viga de transição

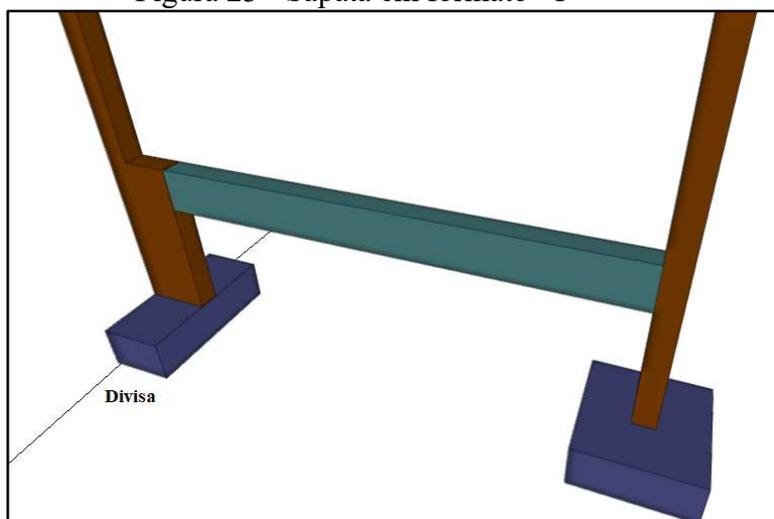


Fonte: Autor (2021)

3.1.4 4ª opção - sapata em formato "T"

A quarta solução para sapata de divisa analisada foi a sapata em formato "T", conforme Figura 23, na qual o pilar sofre um engrossamento da mesma largura que a sapata, a qual possui uma dimensão maior em seu eixo paralelo a divisa. Nesse modelo, a viga de baldrame além de exercer sua função padrão, também será encarregada de auxiliar no equilíbrio. Além disso, a base da sapata possui a mesma largura que o fuste, uma vez que caso houvesse um balanço nessa região, iria ser gerado uma excentricidade e a sapata seria uma sapata excêntrica.

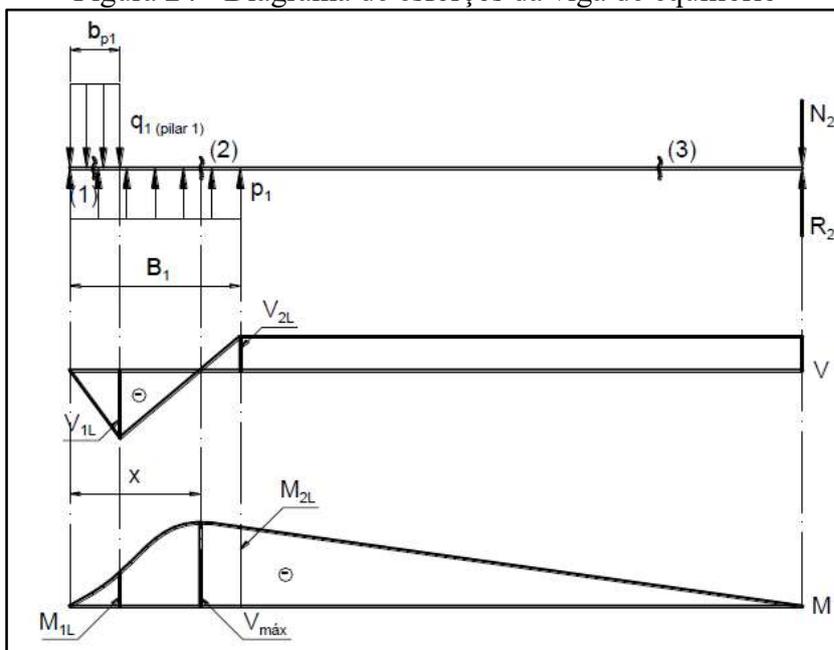
Figura 23 - Sapata em formato "T"



Fonte: Autor (2021)

O modelo parte da análise dos diagramas de esforços solicitantes da viga de equilíbrio em uma situação igual à solução dois, conforme Figura 24. Nesse caso, o engrossamento do pilar é de forma que as regiões onde ocorrem a cortante máxima e o momento máximo fiquem dentro do fuste da sapata, reduzindo a sollicitação no restante da viga que auxilia no equilíbrio.

Figura 24 - Diagrama de esforços da viga de equilíbrio



Fonte: Alva (2007)

3.2 PARÂMETROS DO PROJETO

Uma vez que a edificação será inserida em um ambiente urbano de agressividade moderada, em conformidade com os ditames da NBR 6118 (ABNT, 2014), empregou-se a CAA II para a determinação dos demais parâmetros de projetos. Desta forma, como descrito na Tabela 5, optou-se pelo cobrimento de 2,5 cm para lajes e 3 cm para os demais elementos estruturais, incluindo os que possuam contato com o solo, exceto para os trechos de pilares junto ao elemento de fundação, onde adotou-se um cobrimento de 4,5 cm.

Tabela 5 - Cobrimentos para CAA II

Elemento	Cobrimento nominal (cm)
Laje	2,5
Viga/pilar	3
Em contato com o solo (a)	3

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014

Para a resistência característica do concreto, optou-se inicialmente pelo valor mínimo possibilitado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para a CAA II, sendo de 25 MPa, uma vez que além de ser um valor usual para habitações unifamiliares, é uma escolha a favor da segurança, já que resistências muito elevadas exigem materiais e mão-de-obra mais qualificados. O tipo de agregado graúdo escolhido para o concreto armado foi o basalto, bastante comum na região em questão, com diâmetro máximo de 19 mm.

Ainda, o aço utilizado foi do tipo CA60 para diâmetros abaixo de 6,3 mm e do tipo CA50 para diâmetros iguais ou maiores que 6,3 mm, sendo consideradas as barras do tipo nervuradas, as quais apresentam uma maior aderência com o concreto. As descrições dos materiais escolhidos podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades dos materiais

Material	Tipo
Concreto	C25
Aço	CA-50 e CA-60
Agregado graúdo	Basalto - 19mm

Fonte: Autor (2021)

3.2.1 Ação do vento

Na determinação da ação do vento sobre a estrutura, levando-se em conta a região que compreende a construção, adotou-se os parâmetros da NBR 6123 (ABNT, 1988). Com isso, para a velocidade básica do vento (V_o), adotou-se o valor de 45 m/s, de acordo com o mapa de isopleias para a cidade de Bento Gonçalves, além de ser considerado um vento de alta turbulência ao admitir que a altura da edificação em questão não exceda em duas vezes a altura média das edificações em um raio de 500 metros. Para as variações do relevo do terreno, considerou-se a opção de relevo fracamente acidentado, chegando em um valor de 1 para o fator topográfico S_1 .

Para o fator S_2 referente a rugosidade do terreno, dimensões e altura sobre o terreno, o *software* determina para cada altura da edificação, uma vez que se considerou, para esse caso, a categoria IV de rugosidade do terreno (cidades pequenas e seus arredores) e Classe B para dimensões da edificação (dimensões entre 20 m e 50 m). Ainda, para o fator estatístico S_3 , adotou-se o Grupo 2, com um valor igual à 1, para edificações do tipo residência. A Tabela 7 apresenta de forma sintética os parâmetros de vento que foram considerados para todos os modelos de fundações.

Tabela 7 - Parâmetros para ação do vento

Variável	Valor
V_0	45 m/s
S_1	1
S_2	Determinado para cada altura
S_3	1

Fonte: Autor (2021)

3.2.2 Carregamento acidental

Para as cargas acidentais, que são provenientes do uso e ocupação da edificação, conforme NBR 6120 (ABNT, 2019), adotou-se os valores descritos na Tabela 8, uma vez que o *software* permite a utilização de diferentes carregamentos para cada ambiente.

Tabela 8 - Carregamento acidental

Ambiente	Carregamento
Área de serviço	2 kN/m ²
Sacada e Escada	2,5 kN/m ²
Demais ambientes	1,5 kN/m ²

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014

3.2.3 Carregamento permanente

Assim como o carregamento acidental, a carga permanente também segue os ditames da NBR 6120 (ABNT, 2020), uma vez que o *software* possui ferramentas para lançamento de cargas lineares, pontuais e superficiais. Dessa forma, levou-se em consideração todos os materiais apresentados em projeto arquitetônico, conforme Tabela 9. Além disso, para a alvenaria de vedação foi considerado o bloco cerâmico vazado de 14 cm de espessura e com 2 cm de revestimento em cada uma de suas faces.

Tabela 9 - Carregamento permanente

Material	Carregamento
Forro de gesso em placas	0,15 kN/m ²
Telhado de fibrocimento ondulada	0,4 kN/m ²
Bloco cerâmico vazado	1,9 kN/m ²
Instalações	0,15 kN/m ²
Piso cerâmico + 2cm de massa	0,5 kN/m ²

Fonte: Autor (2021)

3.2.4 Aspectos geotécnicos

Entende-se que, para o presente estudo, apesar do dimensionamento das fundações estar totalmente ligado ao comportamento do solo, o comparativo foi entre quatro soluções dimensionadas sobre as mesmas características geotécnicas. Sendo assim, definiu-se apenas características básicas do solo e a profundidade para atingir tais parâmetros, os quais justificam a utilização de fundações superficiais. Entretanto, o estudo não foi aprofundado a ponto de uma caracterização geotécnica minuciosa, já que o comportamento estudado era entre as quatro opções e não entre sapata e solo. Desta forma, as características principais utilizadas para o estudo estão descritas na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10 - Aspectos geotécnicos

Característica	Valor
Tipo de solo	Saprolito argiloso
Tensão admissível	3,5 kg/cm ²
Profundidade	1,5 m
Coesão	5 kPa

Fonte: Autor (2021)

3.3 ORÇAMENTAÇÃO

A análise econômica das soluções apresentadas é um dos principais objetivos do estudo. Com isso, através de planilhas eletrônicas do *Excel* e dos resumos de materiais exportados diretamente do *Software* CYPECAD, quantificou-se o peso total de aço de cada tipo de elemento, assim como o seu volume de concreto e sua área de fôrma. O levantamento dos custos se deu através das planilhas do SINAPI da base de agosto de 2021, além do auxílio de referências bibliográficas.

3.4 APRECIÇÃO DOS RESULTADOS

O *software* utilizado realiza o dimensionamento completo da estrutura e realiza todas as verificações necessárias para garantir que os requisitos da norma brasileiras sejam atendidos. Com isso, ele disponibiliza ferramentas para análise dos esforços podendo ser elaborado um comparativo entre todas as soluções. Sendo assim, os valores estimados através da

orçamentação, em conjunto com a comparação técnica das soluções, possibilitaram apresentar a melhor solução para edificações semelhantes ao estudo de caso.

Todas opções apresentadas partiram de uma mesma modelagem estrutural, sendo modificados apenas os elementos que envolvem essa solução e realizadas apenas as adequações cruciais na concepção da estrutura. Esse modelo inicial se trata da estrutura no caso em que a edificação não estivesse junto a nenhuma divisa. Dessa forma, além de direcionar o dimensionamento das soluções adotadas, ainda permitiu a análise econômica a fim de quantificar financeiramente o aumento no custo em construir uma obra junto aos limites do terreno.

3.5 SOFTWARE

O *software* utilizado no estudo das quatro soluções de fundação superficial de divisa para um projeto específico foi o CYPECAD V2021.b, da empresa *CYPE Ingenieros, S.A.* O CYPECAD é um programa computacional que proporciona a modelagem, o dimensionamento e o detalhamento de estruturas em concreto armado, com possibilidades de integração com outros tipos de materiais.

A análise das solicitações feita pelo *software* é através de uma modelagem em 3D e o seu cálculo espacial, considerando métodos matriciais de rigidez, a qual transmite esforços por elementos de barras conectadas por ligações do tipo nó, uma vez que são considerados seis graus de liberdade em cada um dele. O *software* considera os pilares e as vigas como elementos do tipo barra na vertical e na horizontal, respectivamente. Já para lajes maciças, o mesmo discretiza os panos como uma malha de elementos do tipo barra.

Ainda, referente à interação solo-estrutura, o programa fornece a opção de escolher se deve ser considerada essa hipótese, além de possibilitar também configurar a condição de contorno das fundações, partindo de 0 (rotula) até 1 (engaste). Para esse caso, considerou-se pilares engatados na função, além de ser desconsiderada as interações solo-estrutura pelas fundações terem respeitado os limites dessa hipótese impostos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 6122 (ABNT, 2019).

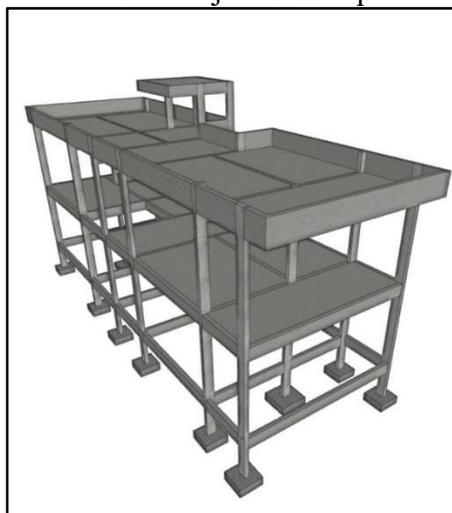
4 RESULTADOS

A seguir estão elencados os resultados obtidos após a realização de todos dimensionamentos através do *software* CYPECAD, uma vez que os dados foram retirados do próprio programa. Os parâmetros apresentados se referem a: consumo de materiais, esforços, detalhamento e orçamentação, onde inicialmente é apresentado o modelo de projeto sem considerar divisas e, após isso, as informações referentes as quatro opções de sapata de divisa estudadas. É importante ressaltar que, na convenção para o projeto, o eixo X está paralelo a divisa e o eixo Y está perpendicular.

4.1 PROJETO SEM SAPATAS DE DIVISA

Com o projeto base dimensionado e otimizado, o qual não possuía fundação de divisa, foi obtida a modelagem 3D da estrutura, conforme apresentada na Figura 25. No Apêndice A, verifica-se a planta de fôrmas das fundações, assim como o detalhamento das sapatas do modelo.

Figura 25 - Modelo 3D - Projeto sem sapatas de divisa



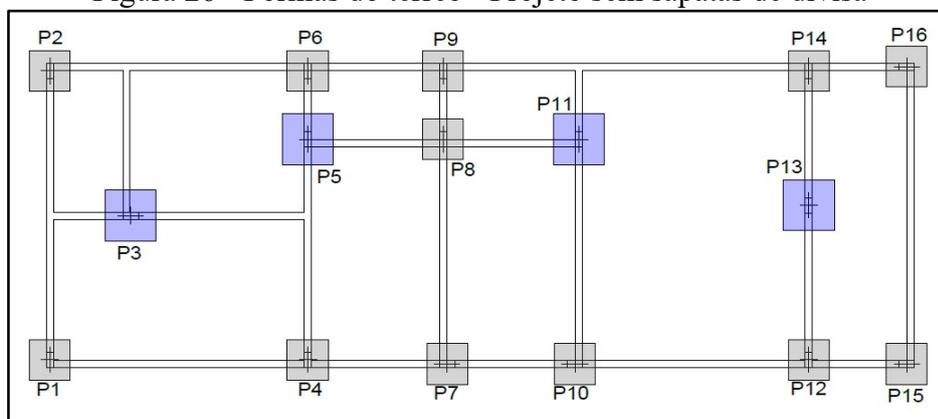
Fonte: Autor (2021)

4.1.1 Observações de dimensionamento

Conforme Figura 26, para o projeto sem sapatas de divisa foram utilizados 16 pilares com dimensões de 14 cm x 30 cm. Consequentemente foram utilizadas 16 sapatas centradas, sendo todas com altura de 30 cm e dimensões de 80 x 80 cm para a cor cinza e 100 x 100 cm para a

cor azul. No nível do Térreo foi considerado um contrapiso armado que descarrega o peso direto no solo. Sendo assim, foram utilizadas vigas de baldrame de 14 x 40 cm apenas nos locais necessários para suportar carga de alvenaria.

Figura 26 - Fôrmas do térreo - Projeto sem sapatas de divisa



Fonte: Autor (2021)

Para os pavimentos superiores, elementos que não sofreram modificações em nenhuma das opções de divisa, foi utilizada laje do tipo maciça com 10 cm de espessura com os carregamentos determinados anteriormente. Na cobertura optou-se por utilizar vigas de 70 cm de altura nas platibandas, no lugar de alvenaria.

4.1.2 Quantitativos

Para o projeto base, são apresentados na Tabela 11 os quantitativos totais da edificação referentes ao volume de concreto, peso do aço com coeficiente de perda e área de fôrmas separados por elementos: vigas, pilares, lajes e fundações. A taxa atingida de aço por metro cúbico de concreto foi de 70,17 kg/m³.

Tabela 11 - Quantitativos - Projeto sem sapatas de divisa

Elemento	Concreto (m ³)	Aço (Kg)	Fôrmas (m ²)
Fundações	3,5	225	16,32
Lajes	18,12	1034	181,18
Vigas	17,05	1206	202,25
Pilares	4,48	563	93,63
Total	43,15	3028	493,38

Fonte: Autor (2021)

4.1.3 Orçamento

Utilizando os valores de referência com base no mês de agosto de 2021, foi realizada a orçamentação do projeto sem sapatas de divisa com as tabelas SINAPI do estado do Rio Grande do Sul. Destaca-se que, conforme Tabela 12, foram considerados apenas os insumos de valores desonerados, totalizando para o projeto base um custo de R\$65.561,46 com insumos para a execução da estrutura.

Tabela 12 - Orçamento - Projeto sem sapatas de divisa

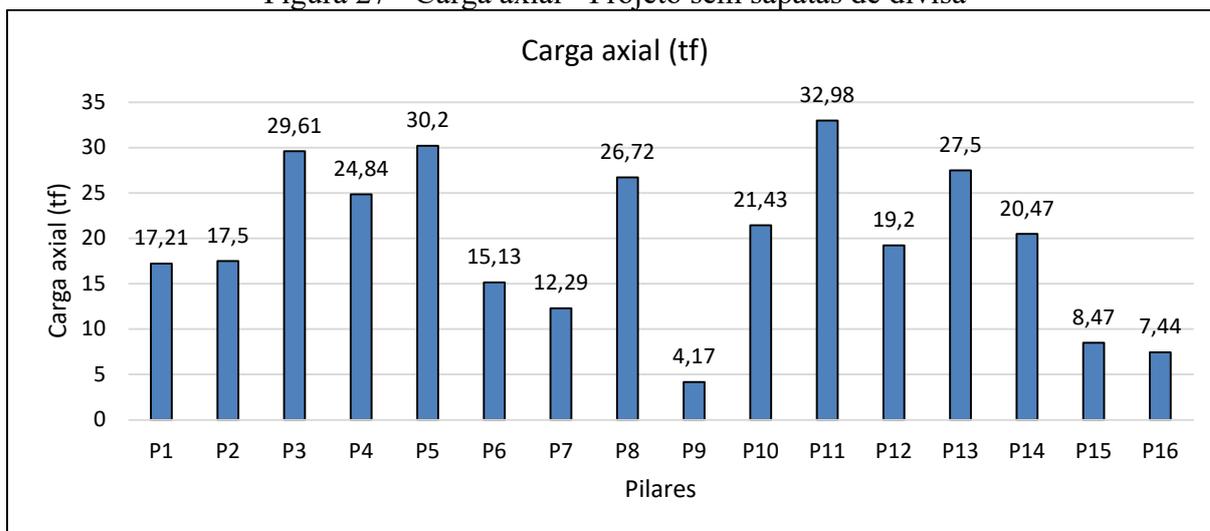
SINAPI	Material	Unid.	Qnt.	Unit. (R\$)	Total (R\$)
43059	Aço CA-60 - Ø5 mm - Vergalhão	kg	735	11.26	8,276.10
43053	Aço CA-50 - Ø6.3 mm - Vergalhão	kg	484	11.42	5,527.28
43053	Aço CA-50 - Ø8.0 mm - Vergalhão	kg	398	11.42	4,545.16
34	Aço CA-50 - Ø10.0 mm - Vergalhão	kg	1157	11.90	13,768.30
43055	Aço CA-50 - Ø12.5 mm - Vergalhão	kg	254	10.31	2,618.74
1527	Concreto usinado bombeável - C25 com brita 0 e 1. <i>slump</i> 100 +/- 20mm	m ³	43.15	407.67	17,590.96
1358	Fôrmas para concreto - Chapa de madeira compensada resinada - E=17mm (2 Util.)	m ²	493.4	53.65	13,234.92

Fonte: Autor (2021)

4.1.4 Esforços

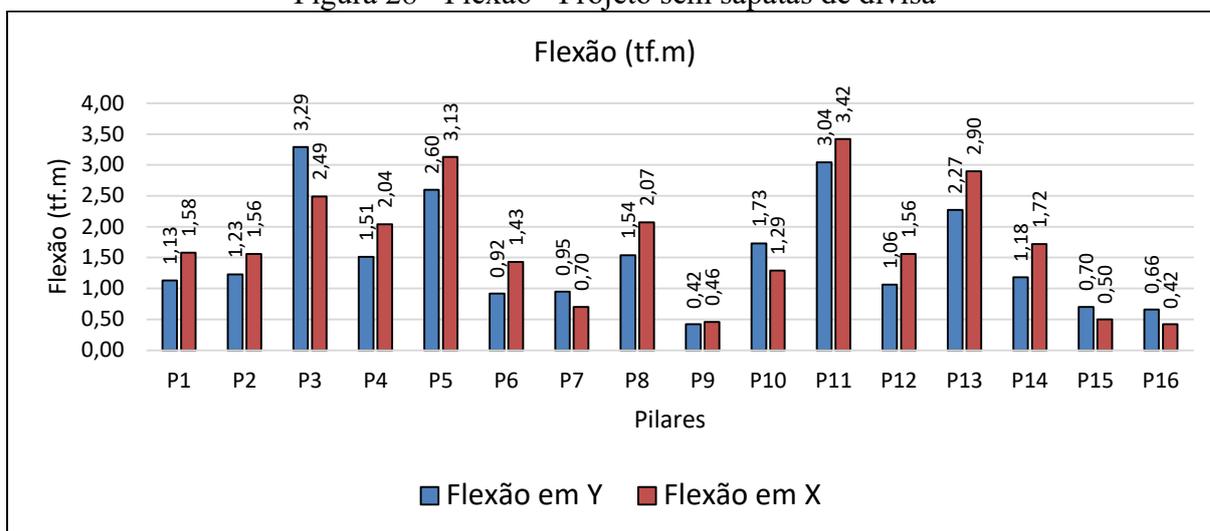
Para os esforços de dimensionamento das fundações, a Figura 27 apresenta os valores de carga axial em cada um dos 16 pilares, uma vez que o maior carregamento se encontra no P11, que se trata de um pilar central, e o menor se refere ao pilar P9, um pilar de canto. Já na Figura 28, observa-se o esforço de flexão organizado por pilares.

Figura 27 - Carga axial - Projeto sem sapatas de divisa



Fonte: Autor (2021)

Figura 28 - Flexão - Projeto sem sapatas de divisa

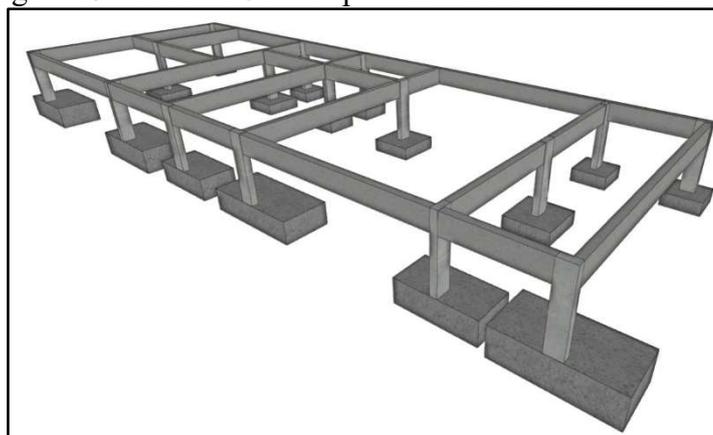


Fonte: Autor (2021)

4.2 1ª OPÇÃO - SAPATA EXCÊNTRICA SEM TRAVAMENTO

A partir do projeto base, considerando uma das laterais do sobrado como a divisa do terreno, o projeto foi adaptado para a primeira opção de sapata de divisa: sapata excêntrica sem travamento. Foi obtida, então, a modelagem 3D da estrutura, conforme apresentado para o Pavimento Térreo na Figura 29 e, no Apêndice B, verifica-se a planta de fôrmas das fundações, assim como o detalhamento das sapatas do modelo.

Figura 29 - Modelo 3D - Sapata excêntrica sem travamento

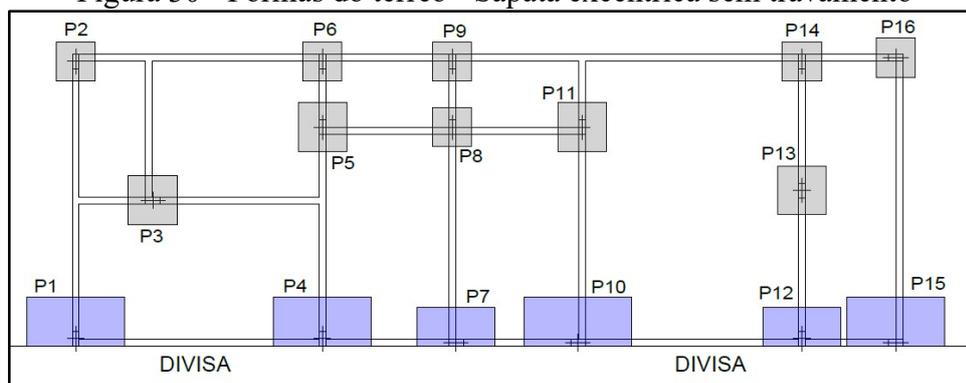


Fonte: Autor (2021)

4.2.1 Observações de dimensionamento

Conforme Figura 30, para a primeira opção de divisa com sapata excêntrica sem travamento, foram modificadas 6 fundações com a coloração azul, as quais possuem dimensões conforme Tabela 13. Tornou-se necessária nessas sapatas a utilização de armadura superior, uma vez que elas passaram a absorver momentos negativos devido a excentricidade de carga. As demais fundações com a coloração cinza e todos os outros elementos da estrutura não sofreram alterações em relação ao projeto base.

Figura 30 - Fôrmas do térreo - Sapata excêntrica sem travamento



Fonte: Autor (2021)

Tabela 13 - Dimensões das sapatas excêntricas

Sapata	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Altura (cm)
P1, P4 e P15	100	200	60
P7 e P12	80	160	50
P10	100	220	50

Fonte: Autor (2021)

4.2.2 Quantitativos

Para a primeira opção de sapata de divisa, são apresentados na Tabela 14 os quantitativos totais da edificação referentes ao volume de concreto, peso do aço com coeficiente de perda e área de fôrmas separados por elementos: vigas, pilares, lajes e fundações. A taxa atingida de aço por metro cúbico de concreto foi de 68,01 kg/m³.

Tabela 14 - Quantitativos - Sapata excêntrica sem travamento

Elemento	Concreto (m ³)	Aço (Kg)	Fôrmas (m ²)
Fundações	8,33	460	29,36
Lajes	18,12	1034	181,18
Vigas	17,05	1206	202,25
Pilares	4,48	563	93,63
Total	47,98	3263	506,42

Fonte: Autor (2021)

4.2.3 Orçamentação

Utilizando os valores de referência com base no mês de agosto de 2021, foi realizada a orçamentação do projeto com sapata excêntrica sem travamento, com as tabelas SINAPI do estado do Rio Grande do Sul. Destaca-se que, conforme Tabela 15, foram considerados apenas os insumos de valores desonerados, totalizando para o projeto um custo de R\$70.420,81 com insumos para a execução da estrutura.

Tabela 15 - Orçamentação - Sapata excêntrica sem travamento

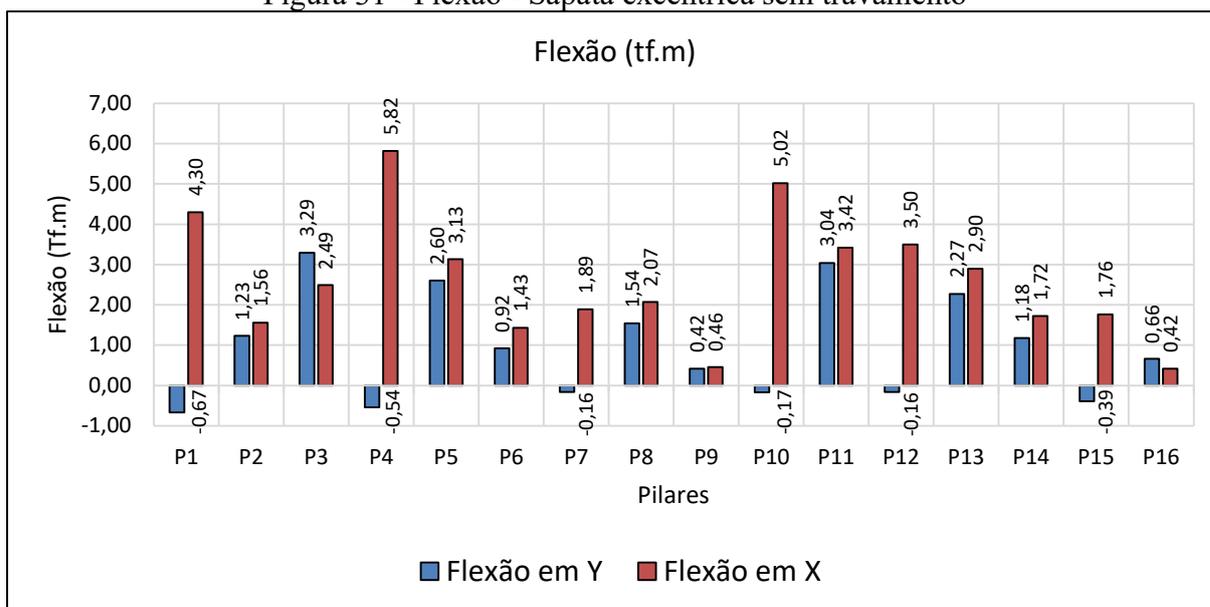
SINAPI	Material	Unid.	Qnt.	Unit. (R\$)	Total (R\$)
43059	Aço CA-60 - Ø5 mm - Vergalhão	kg	735	11.26	8,276.10
43053	Aço CA-50 - Ø6.3 mm - Vergalhão	kg	484	11.42	5,527.28
43053	Aço CA-50 - Ø8.0 mm - Vergalhão	kg	398	11.42	4,545.16
34	Aço CA-50 - Ø10.0 mm - Vergalhão	kg	1231	11.90	14,648.90
43055	Aço CA-50 - Ø12.5 mm - Vergalhão	kg	415	10.31	4,278.65
1527	Concreto usinado bombeável - C25 com brita 0 e 1. <i>slump</i> 100 +/- 20mm	m ³	47.98	407.67	19,560.01
1358	Fôrmas para concreto - Chapa de madeira compensada resinada - E=17mm (2 Util.)	m ²	506.4	53.65	13,584.72

Fonte: Autor (2021)

4.2.4 Esforços

Para os esforços de dimensionamento das fundações, a carga axial permaneceu igual ao modelo sem sapatas de divisa. Já na Figura 31, observa-se o esforço de flexão organizado por pilares, onde deve ser destacado o surgimento de momentos negativos no eixo Y das fundações que se encontram no limite do terreno.

Figura 31 - Flexão - Sapata excêntrica sem travamento

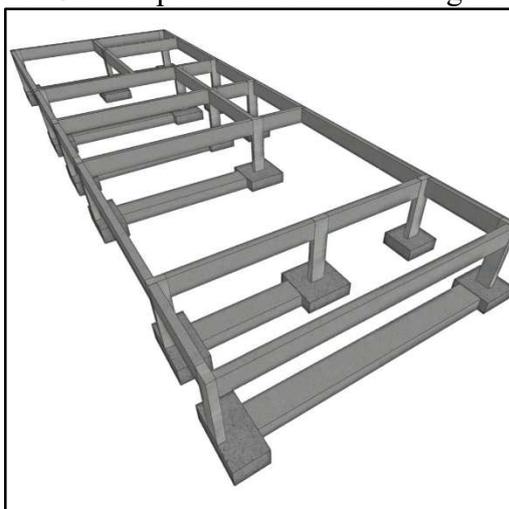


Fonte: Autor (2021)

4.3 2ª OPÇÃO - SAPATA EXCÊNTRICA COM VIGA DE EQUILÍBRIO

A partir do projeto base, considerando uma das laterais do sobrado como a divisa do terreno, o projeto foi adaptado para a segunda opção de sapata de divisa: sapata excêntrica com viga de equilíbrio. Foi obtida, então, a modelagem 3D da estrutura, conforme apresentado para o Pavimento Térreo na Figura 32 e, no Apêndice C, verifica-se a planta de fôrmas das fundações, assim como o detalhamento das sapatas do modelo e das vigas de equilíbrio.

Figura 32 - Modelo 3D - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio

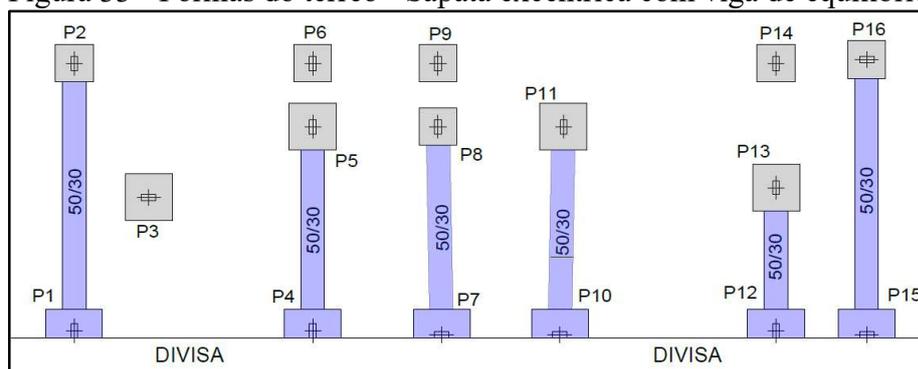


Fonte: Autor (2021)

4.3.1 Observações de dimensionamento

Conforme Figura 33, para a segunda opção de divisa referente a sapata excêntrica com viga de equilíbrio, foram modificadas 6 fundações com a coloração azul, as quais possuem dimensões idênticas de 60 x 120 cm e 40 cm de altura. Além disso, para realizar o equilíbrio desses elementos excêntricos, foram utilizadas 6 vigas com dimensões de 50 x 30 cm ligando com pilares centrais da obra. As demais fundações com a coloração cinza e todos os outros elementos da estrutura não sofreram alterações em relação ao projeto base.

Figura 33 - Fôrmas do térreo - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio



Fonte: Autor (2021)

As vigas de equilíbrio foram projetadas a uma profundidade de 1,5 m, o mesmo valor da base das fundações. Como as sapatas centradas possuem a mesma altura de 30 cm, optou-se, então, por manter essa altura para as vigas, sendo necessária uma largura de 50 cm para esse caso.

4.3.2 Quantitativos

Para a segunda opção de sapata de divisa, são apresentados na Tabela 16 os quantitativos totais da edificação referentes ao volume de concreto, peso do aço com coeficiente de perda e área de fôrmas separados por elementos: vigas, pilares, lajes e fundações. A taxa atingida de aço por metro cúbico de concreto foi de 72,38 kg/m³.

Tabela 16 - Quantitativos - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio

Elemento	Concreto (m ³)	Aço (Kg)	Fôrmas (m ²)
Fundações	7,41	603	30,71
Lajes	18,12	1034	181,18
Vigas	17,05	1206	202,25
Pilares	4,48	563	93,63
Total	47,06	3406	507,77

Fonte: Autor (2021)

4.3.3 Orçamentação

Utilizando os valores de referência com base no mês de agosto de 2021, foi realizada a orçamentação do projeto com sapata excêntrica com viga de equilíbrio, com as tabelas SINAPI do estado do Rio Grande do Sul. Destaca-se que, conforme Tabela 17, foram considerados apenas os insumos de valores desonerados, totalizando para o projeto um custo de R\$71.713,80 com insumos para a execução da estrutura.

Tabela 17 - Orçamentação - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio

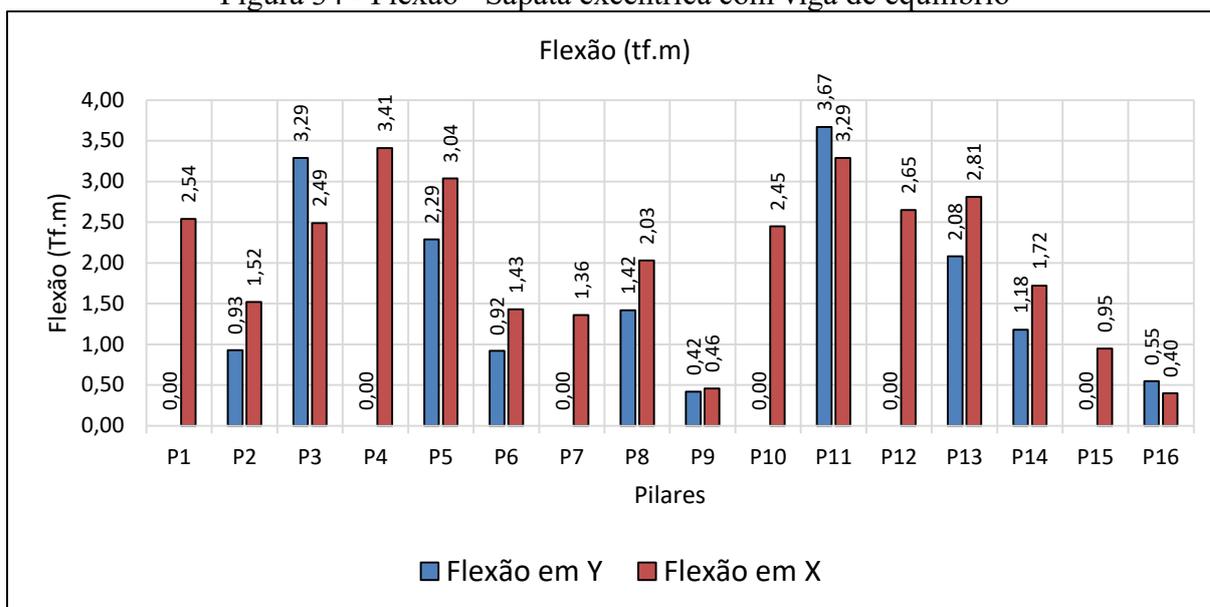
SINAPI	Material	Unid.	Qnt.	Unit. (R\$)	Total (R\$)
43059	Aço CA-60 - Ø5 mm - Vergalhão	kg	735	11.26	8,276.10
43053	Aço CA-50 - Ø6.3 mm - Vergalhão	kg	484	11.42	5,527.28
43053	Aço CA-50 - Ø8.0 mm - Vergalhão	kg	527	11.42	6,018.34
34	Aço CA-50 - Ø10.0 mm - Vergalhão	kg	1240	11.90	14,756.00
43055	Aço CA-50 - Ø12.5 mm - Vergalhão	kg	420	10.31	4,330.20
1527	Concreto usinado bombeável - C25 com brita 0 e 1. <i>slump</i> 100 +/- 20mm	m ³	47.06	407.67	19,184.95
1358	Fôrmas para concreto - Chapa de madeira compensada resinada - E=17mm (2 Util.)	m ²	507.8	53.65	13,620.93

Fonte: Autor (2021)

4.3.4 Esforços

Para os esforços de dimensionamento das fundações, a carga axial permaneceu igual ao modelo sem sapatas de divisa. Já na Figura 34, observa-se o esforço de flexão organizado por pilares, onde devem ser destacados os momentos iguais à 0 no eixo Y das fundações que se encontram no limite do terreno.

Figura 34 - Flexão - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio

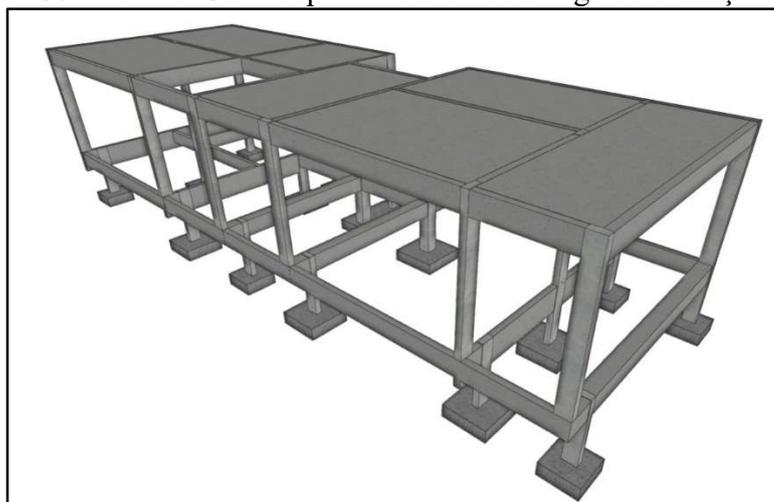


Fonte: Autor (2021)

4.4 3ª OPÇÃO - SAPATA CENTRADA COM VIGA DE TRANSIÇÃO

A partir do projeto base, considerando uma das laterais do sobrado como a divisa do terreno, o projeto foi adaptado para a terceira opção de sapata de divisa: sapata centrada com viga de transição. Foi obtida, então, a modelagem 3D da estrutura, conforme apresentado para o Pavimento Térreo na Figura 35 e, no Apêndice D, verifica-se a planta de fôrmas das fundações, assim como o detalhamento das sapatas do modelo e das vigas de transição.

Figura 35 - Modelo 3D - Sapata centrada com viga de transição



Fonte: Autor (2021)

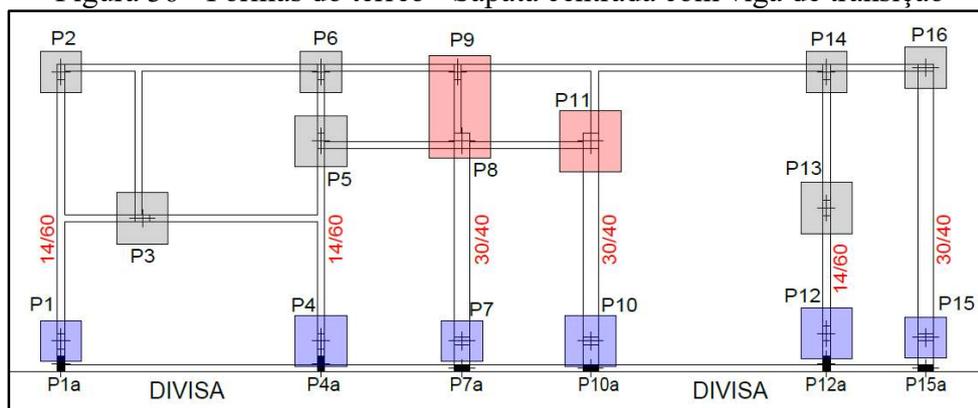
4.4.1 Observações de dimensionamento

Conforme Figura 36, para a terceira opção de divisa referente a sapata centrada com viga de transição, os 6 pilares da obra que estavam na divisa tiveram transições de 60 cm para o interior do terreno. Sendo assim, possibilitou-se a utilização de sapatas centradas das mesmas dimensões das outras: 80 x 80 x 30 cm para as sapatas P1, P7 e P15 e 100 x 100 x 30 cm para as sapatas P4, P10 e P12.

Para a transição de carga foram aproveitadas as vigas de baldrame que haviam no projeto base, porém, as dimensões de 14 x 40 cm anteriormente utilizadas precisaram ser modificadas. No caso das vigas dos pilares P1, P4 e P12, que possuíam seu maior lado perpendicular à divisa, houve um simples aumento de altura para 60 cm, contudo, no caso das vigas dos pilares P7, P10 e P15, houve um aumento na largura para 30 cm para possibilitar a ancoragem de toda armadura do elemento que sofreu a transição.

Pelo mesmo motivo das vigas, os pilares P8 e P11 também sofreram um engrossamento de 14 cm para 30 cm para garantir um engastamento direto das vigas de transição que chegam nesses elementos. Decorrente disso, conforme Figura 36 em vermelho, a sapata P11 foi modificada para a dimensão de 120 x 120 x 30 cm e, no caso da sapata P8 que precisava sofrer um aumento, acabou sendo utilizada uma sapata associada com o P9 de dimensões 200 x 120 x 30 cm. As demais fundações com a coloração cinza e todos os outros elementos da estrutura não sofreram alterações em relação ao projeto base.

Figura 36 - Fôrmas do térreo - Sapata centrada com viga de transição



Fonte: Autor (2021)

4.4.2 Quantitativos

Para a terceira opção de sapata de divisa, são apresentados na Tabela 18 os quantitativos totais da edificação referentes ao volume de concreto, peso do aço com coeficiente de perda e área de fôrmas separados por elementos: vigas, pilares, lajes e fundações. A taxa atingida de aço por metro cúbico de concreto foi de 72,19 kg/m³.

Tabela 18 - Quantitativos - Sapata centrada com viga de transição

Elemento	Concreto (m ³)	Aço (Kg)	Fôrmas (m ²)
Fundações	4,3	281	17,28
Lajes	18,12	1034	181,18
Vigas	18,56	1374	206,76
Pilares	4,54	597	92,89
Total	45,52	3286	498,11

Fonte: Autor (2021)

4.4.3 Orçamentação

Utilizando os valores de referência com base no mês de agosto de 2021, foi realizada a orçamentação do projeto com sapata centrada com viga de transição, com as tabelas SINAPI do estado do Rio Grande do Sul. Destaca-se que, conforme Tabela 19, foram considerados apenas os insumos de valores desonerados, totalizando para o projeto um custo de R\$69.385,93 com insumos para a execução da estrutura.

Tabela 19 - Orçamentação - Sapata centrada com viga de transição

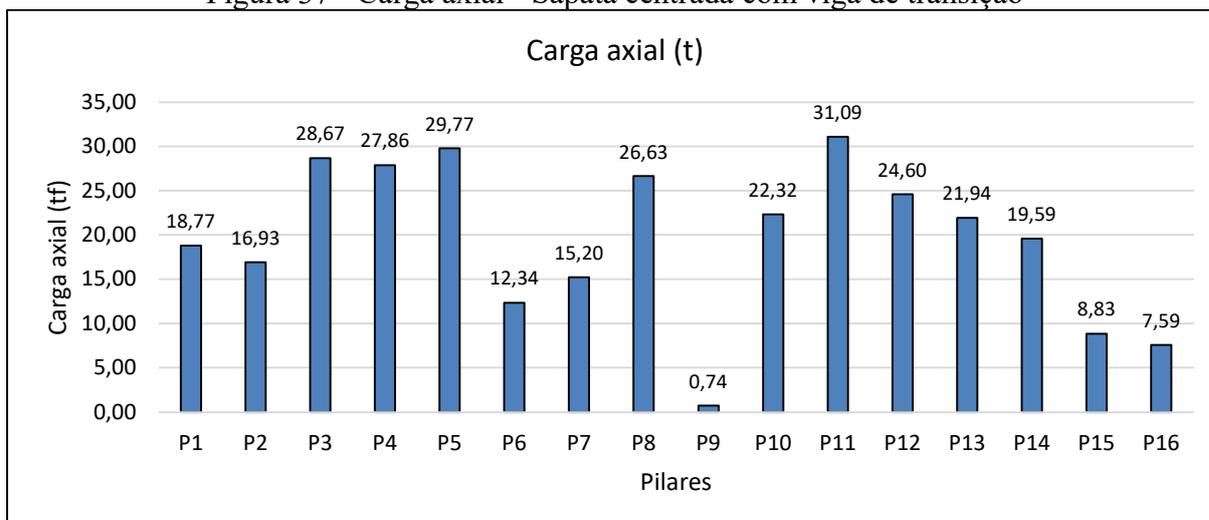
SINAPI	Material	Unid.	Qty.	Unit. (R\$)	Total (R\$)
43059	Aço CA-60 - Ø5 mm - Vergalhão	kg	726	11.26	8,174.76
43053	Aço CA-50 - Ø6.3 mm - Vergalhão	kg	539	11.42	6,155.38
43053	Aço CA-50 - Ø8.0 mm - Vergalhão	kg	395	11.42	4,510.90
34	Aço CA-50 - Ø10.0 mm - Vergalhão	kg	1171	11.90	13,934.90
43055	Aço CA-50 - Ø12.5 mm - Vergalhão	kg	374	10.31	3,855.94
43055	Aço CA-50 - Ø16.0 mm - Vergalhão	kg	81	10.31	835.11
1527	Concreto usinado bombeável - C25 com brita 0 e 1. <i>slump</i> 100 +/- 20mm	m ³	45.52	407.67	18,557.14
1358	Fôrmas para concreto - Chapa de madeira compensada resinada - E=17mm (2 Util.)	m ²	498.1	53.65	13,361.80

Fonte: Autor (2021)

4.4.4 Esforços

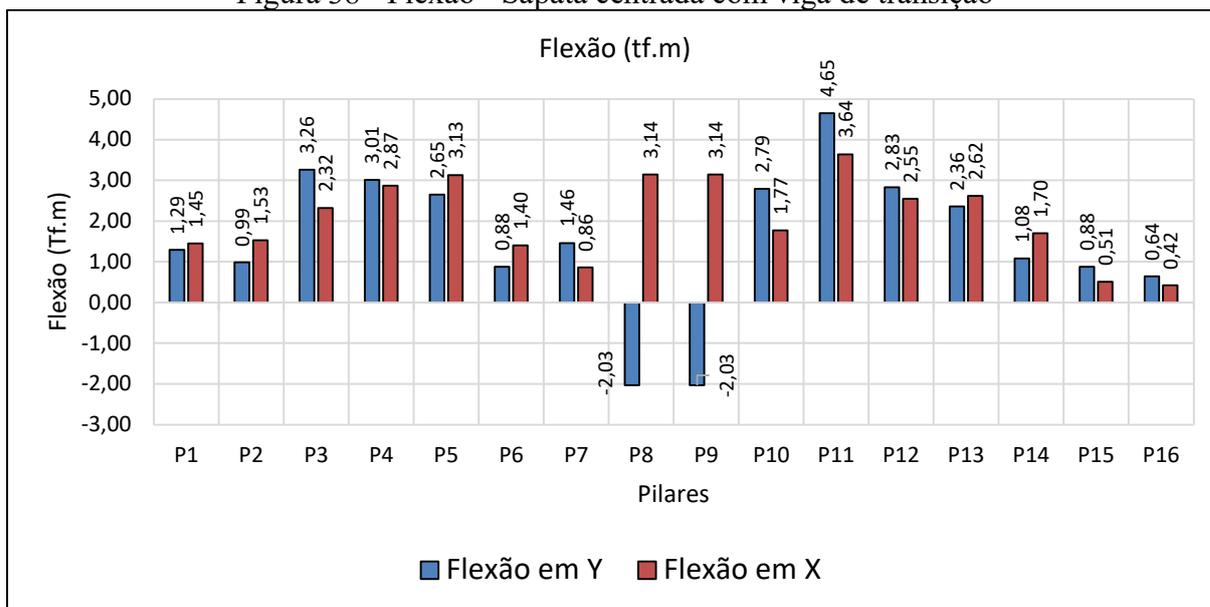
Para os esforços de dimensionamento das fundações, a Figura 37 apresenta os valores de carga axial em cada um dos 16 pilares, uma vez que o maior carregamento se encontra no P11, que se trata de um pilar central, e o menor se refere ao pilar P9, um pilar de canto. Já na Figura 38, observa-se o esforço de flexão organizado por pilares, onde o único valor negativo que surge é em relação à sapata associada P8-P9, uma vez que o valor indicado é o esforço resultante na sapata, justificando os valores iguais nos dois pilares.

Figura 37 - Carga axial - Sapata centrada com viga de transição



Fonte: Autor (2021)

Figura 38 - Flexão - Sapata centrada com viga de transição

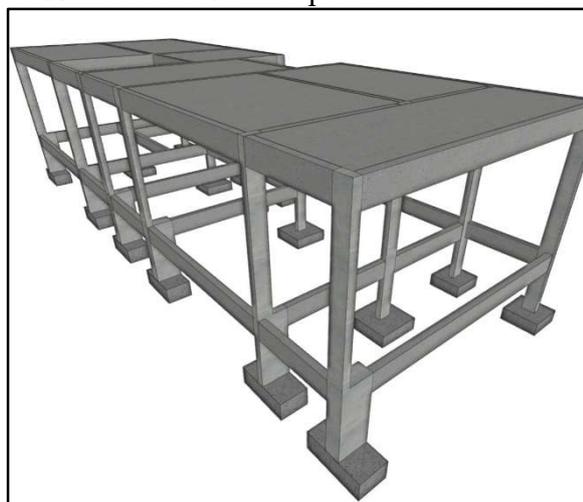


Fonte: Autor (2021)

4.5 4ª OPÇÃO - SAPATA EM FORMATO "T"

A partir do projeto base, considerando uma das laterais do sobrado como a divisa do terreno, o projeto foi adaptado para a quarta opção de sapata de divisa: sapata em formato "T". Foi obtida, então, a modelagem 3D da estrutura, conforme apresentado para o Pavimento Térreo na Figura 39 e, no Apêndice E, verifica-se a planta de fôrmas das fundações, assim como o detalhamento das sapatas do modelo

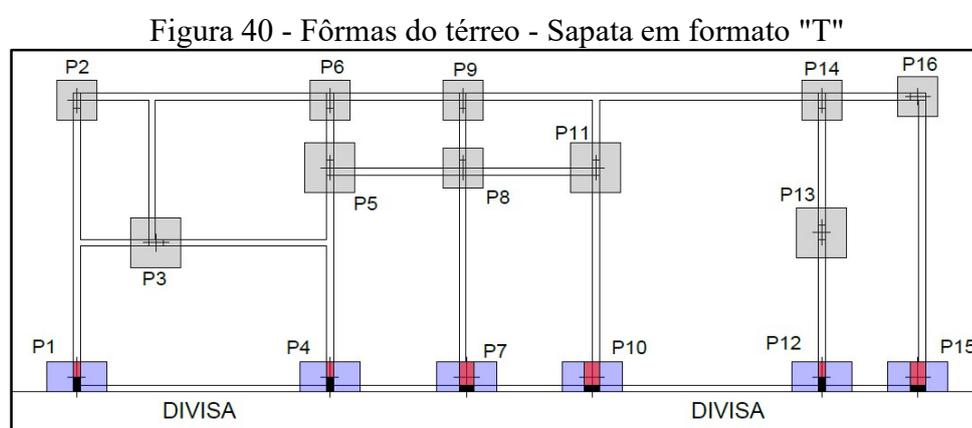
Figura 39 - Modelo 3D - Sapata em formato "T"



Fonte: Autor (2021)

4.5.1 Observações de dimensionamento

Conforme Figura 40, para a quarta opção de divisa referente a sapata em formato “T” os 6 pilares de divisa da obra sofreram um alargamento para 60 cm no eixo perpendicular à divisa. Sendo assim, os pilares P1, P4 e P12 passaram a ter 14 x 60cm no fuste da sapata e os pilares P7, P10 e P15 passaram para 30 x 60cm no mesmo nível. Com isso, as sapatas referentes aos pilares modificados, em azul, ficaram com dimensões idênticas de 60 x 120 x 40 cm de altura, já as demais fundações com a coloração cinza e todos os outros elementos da estrutura não sofreram alterações em relação ao projeto base.



Fonte: Autor (2021)

4.5.2 Quantitativos

Para a quarta opção de sapata de divisa, são apresentados na Tabela 20 os quantitativos totais da edificação referentes ao volume de concreto, peso do aço com coeficiente de perda e área de fôrmas separados por elementos: vigas, pilares, lajes e fundações. A taxa atingida de aço por metro cúbico de concreto foi de 70,19 kg/m³.

Tabela 20 - Quantitativos - Sapata em formato "T"

Elemento	Concreto (m³)	Aço (Kg)	Fôrmas (m²)
Fundações	4,08	289	19,2
Lajes	18,12	1034	181,18
Vigas	17,05	1204	200,43
Pilares	5,07	584	98,64
Total	44,32	3111	499,45

Fonte: Autor (2021)

4.5.3 Orçamentação

Utilizando os valores de referência com base no mês de agosto de 2021, foi realizada a orçamentação do projeto com sapata em formato "T", com as tabelas SINAPI do estado do Rio Grande do Sul. Destaca-se que, conforme Tabela 21, foram considerados apenas os insumos de valores desonerados, totalizando para o projeto um custo de R\$67.033,41 com insumos para a execução da estrutura.

Tabela 21 - Orçamentação - Sapata em formato "T"

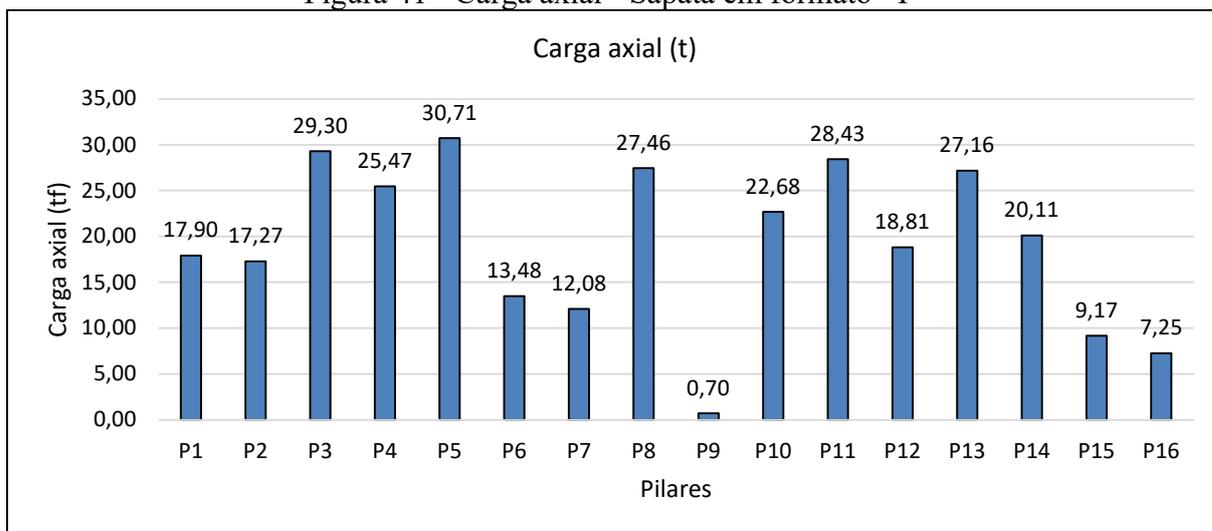
SINAPI	Material	Unid.	Qnt.	Unit. (R\$)	Total (R\$)
43059	Aço CA-60 - Ø5 mm - Vergalhão	kg	747	11.26	8,411.22
43053	Aço CA-50 - Ø6.3 mm - Vergalhão	kg	484	11.42	5,527.28
43053	Aço CA-50 - Ø8.0 mm - Vergalhão	kg	398	11.42	4,545.16
34	Aço CA-50 - Ø10.0 mm - Vergalhão	kg	1135	11.90	13,506.50
43055	Aço CA-50 - Ø12.5 mm - Vergalhão	kg	347	10.31	3,577.57
1527	Concreto usinado bombeável - C25 com brita 0 e 1. <i>slump</i> 100 +/- 20mm	m ³	44.32	407.67	18,067.93
1358	Fôrmas para concreto - Chapa de madeira compensada resinada - E=17mm (2 Util.)	m ²	499.5	53.65	13,397.75

Fonte: Autor (2021)

4.5.4 Esforços

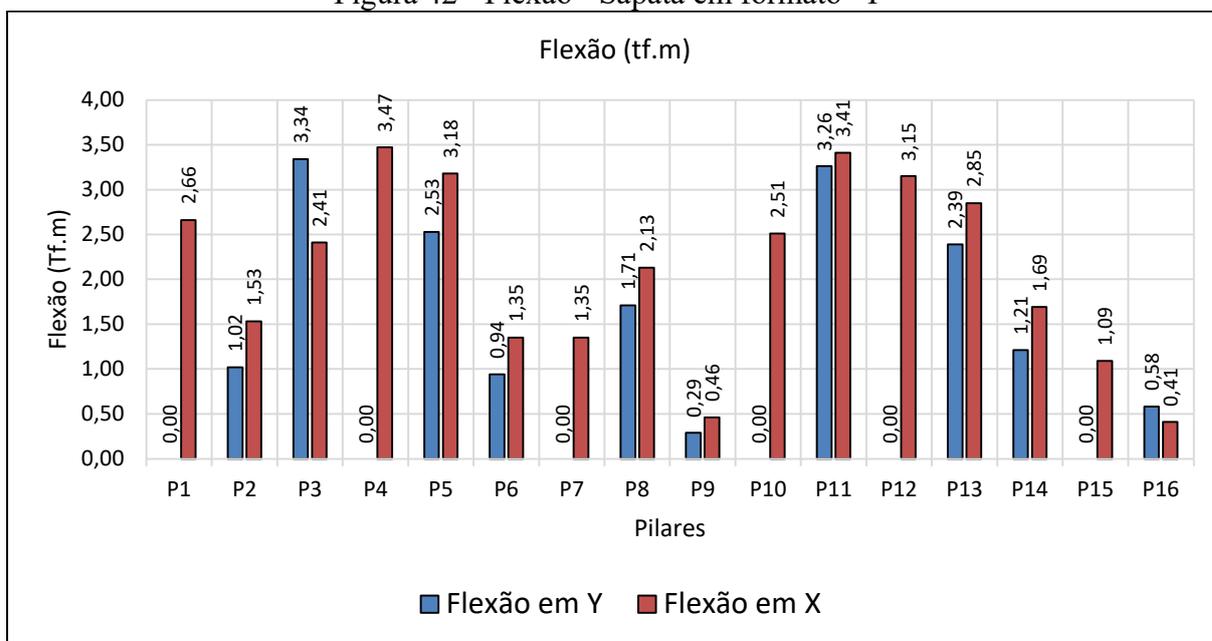
Para os esforços de dimensionamento das fundações, a Figura 41 apresenta os valores de carga axial em cada um dos 16 pilares, uma vez que o maior carregamento se encontra no P5, que se trata de um pilar central, e o menor se refere ao pilar P9, um pilar de canto. Já na Figura 42, observa-se o esforço de flexão organizado por pilares, onde deve ser destacado os momentos iguais à 0 no eixo Y das fundações de divisa.

Figura 41 - Carga axial - Sapata em formato "T"



Fonte: Autor (2021)

Figura 42 - Flexão - Sapata em formato "T"



Fonte: Autor (2021)

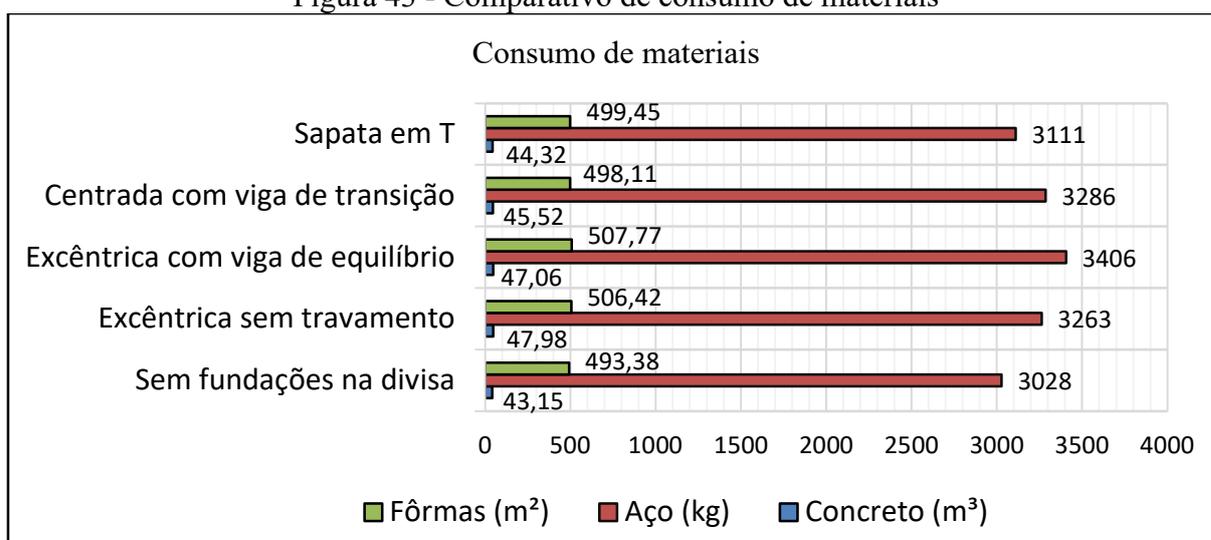
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos resultados demonstrados anteriormente, apresenta-se, em seguida, uma análise comparativa dos quantitativos, dos esforços e da orçamentação entre as quatro soluções para sapata de divisa. A análise toma como base o projeto sem sapatas de divisa, para ter como referência uma estrutura que não se encontra junto aos limites do terreno.

5.1 CONSUMO DE MATERIAIS

Com a lista de quantitativos exportada do *software*, conforme apresentado anteriormente para cada opção, foi possível realizar uma análise mais crítica referente a cada material. A Figura 43 apresenta em verde a quantidade de fôrmas em metros quadrados, em azul a quantidade de concreto em metros cúbicos e em vermelho a quantidade aço em quilogramas.

Figura 43 - Comparativo de consumo de materiais



Fonte: Autor (2021)

5.1.1 Fôrmas

Das opções de fundação de divisa, a que apresentou o menor aumento de consumo de fôrmas em relação ao projeto sem sapatas de divisa, foi a que utilizou sapata centrada com viga de transição (3ª opção) com um acréscimo de 0,96%. Entende-se para esse caso que houve uma maior semelhança das dimensões de sapata em relação aos outros casos, além disso, foram aproveitadas as vigas de baldrames do projeto base para realizar as vigas de transição, obtendo uma adição de material apenas na diferença de dimensões entre elas.

O maior aumento de consumo de fôrmas foi a que utilizou sapata excêntrica com viga de equilíbrio (2ª opção) com um acréscimo de 2,92%. Observa-se, para essa situação, que a necessidade do dimensionamento de viga de equilíbrio para todas fundações de divisa gerou essa adição no consumo de material, uma vez que, ao contrário da 3ª opção, esses elementos não poderiam ser aproveitados como baldrames, já que as vigas de equilíbrio estariam a uma profundidade de 1,5 m junto a base das sapatas.

O projeto com sapata excêntrica sem travamento (1ª opção) e com sapata em formato “T” (4ª opção) apresentaram, respectivamente, um aumento de 2,64% e 1,23%. De forma geral, as fôrmas acabam sendo o material menos impactado com a fundação de divisa, uma vez que o restante da estrutura, especialmente lajes e vigas, possuem um consumo muito maior.

5.1.2 Aço

Das opções de fundação de divisa, a que apresentou o menor aumento de consumo de aço em relação ao projeto sem sapatas de divisa, foi a que utilizou sapata em formato “T” (4ª opção) com um acréscimo de 2,74%. Entende-se, nesse caso, que o engrossamento do pilar para a mesma largura da fundação absorve os picos de cortante e momento fletor explicados anteriormente, diminuindo a quantidade de aço necessária, uma vez que possui uma pequena adição de material nas vigas de baldrames que são responsáveis pelo equilíbrio.

O maior aumento no consumo de aço foi a que utilizou sapata excêntrica com viga de equilíbrio (2ª opção) com um acréscimo de 12,48%. Observa-se, para essa situação, que a criação de um novo elemento para realizar o equilíbrio da estrutura, apesar de atenuar a quantidade de material nas fundações, não foi o suficiente para compensar a utilização de mais aço para as vigas de equilíbrio.

O projeto com sapata excêntrica sem travamento (1ª opção) e com sapata centrada com viga de transição (3ª opção) apresentaram, respectivamente, um aumento de 7,76% e 8,52%. Entende-se que é inevitável o acréscimo de aço para a estrutura conseguir ficar em equilíbrio, contudo a opção com sapata em formato “T” foi a que demonstrou uma melhor otimização dessas quantidades, uma vez que aproveitou os elementos já existentes no projeto original para auxiliar na absorção da excentricidade de carga, como viga de baldrame e fuste de sapata, apresentando, assim, um desempenho superior em 64,7% em relação a segunda opção mais vantajosa.

5.1.3 Concreto

Das opções de fundação de divisa, a que apresentou o menor aumento de consumo de concreto em relação ao projeto sem sapatas de divisa, foi a que utilizou sapata em formato “T” (4ª opção), com 2,71% de adição. Entende-se, nesse caso, que a justificativa acaba sendo a mesma que para o consumo de aço, uma vez que a otimização e utilização dos elementos que já compunham o projeto base para absorver a excentricidade de carga gerou uma economia de material comparando com as outras soluções de divisa.

O maior aumento no consumo de concreto foi observado no projeto que utilizou sapata excêntrica sem travamento (1ª opção) com um acréscimo de 11,19%. Para essa situação, ao contrário do consumo de aço, a utilização de uma viga de equilíbrio na sapata excêntrica compensou a quantidade utilizada para os novos elementos, uma vez que a primeira opção necessitou de mais material. Entende-se que essa solução não contou com nenhum elemento adicional para auxiliar no equilíbrio da estrutura, por isso foi necessário maior consumo de concreto nos blocos para a absorção das excentricidades.

O projeto com sapata excêntrica com viga de equilíbrio (2ª opção) e com sapata centrada com viga de transição (3ª opção) apresentaram, respectivamente, um aumento de 9,06% e 5,49%. Esses resultados demonstram que a sapata em formato “T” obteve um alto desempenho no consumo de concreto, já que a próxima opção mais vantajosa apresentou no mínimo o dobro do acréscimo de material.

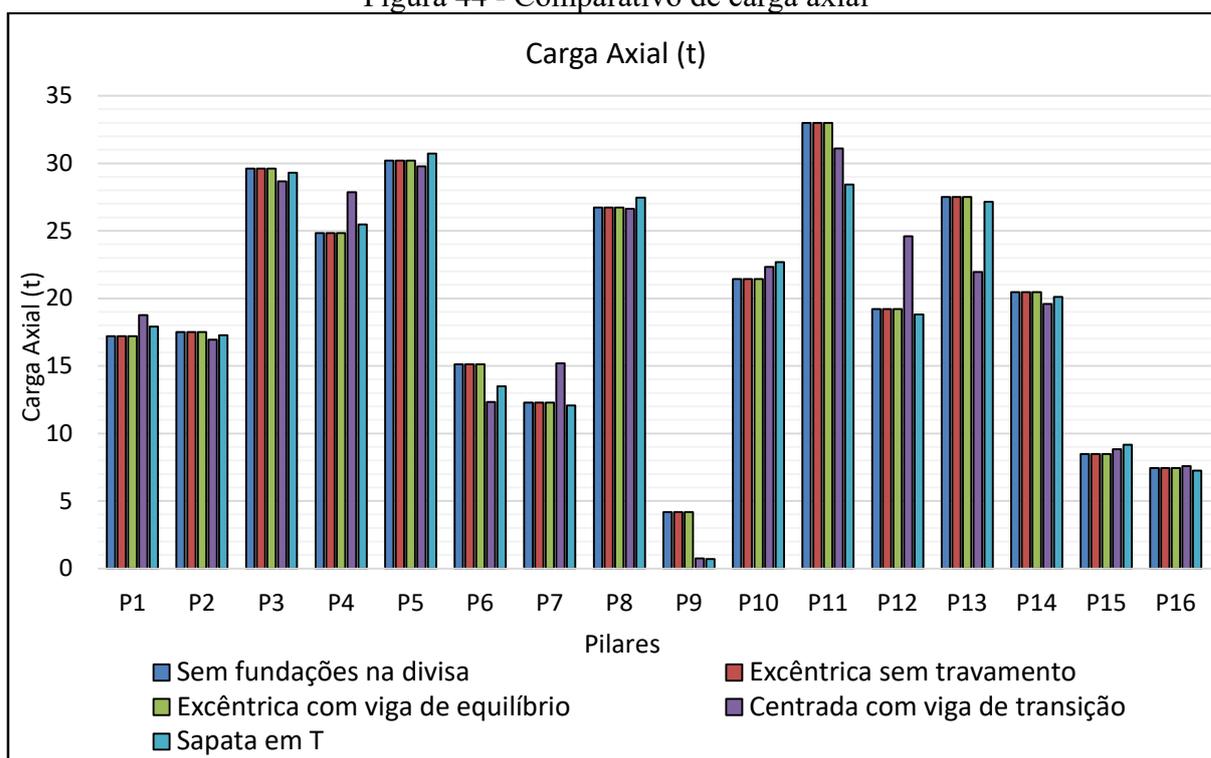
5.2 ESFORÇOS

Com base nos resultados demonstrados anteriormente, apresenta-se em seguida uma análise comparativa dos esforços entre as quatro soluções para sapata de divisa. A análise se refere a carga axial e a flexão nos elementos, uma vez que na convenção para o projeto, o eixo X está paralelo a divisa e o eixo Y está perpendicular.

5.2.1 Carga axial

Com a lista de carga na fundação exportada do *software*, conforme apresentado anteriormente para cada opção, foi possível realizar uma análise mais crítica referente à carga axial. A Figura 44 apresenta a comparação organizada para cada pila da obra, tanto para as quatro soluções de divisa, quanto para o projeto base.

Figura 44 - Comparativo de carga axial



Fonte: Autor (2021)

Nas duas primeiras opções de divisa, sapata excêntrica sem e com viga de equilíbrio, observa-se que o esforço em questão se manteve idêntico ao projeto base. Isso ocorre devido ao fato de que não houve alteração na forma em que a carga chega no elemento de fundação, mas sim, na forma em que ela recebe esse esforço. Sendo assim, altera-se apenas a flexão para esses dois casos, uma vez que no projeto base não existia excentricidade.

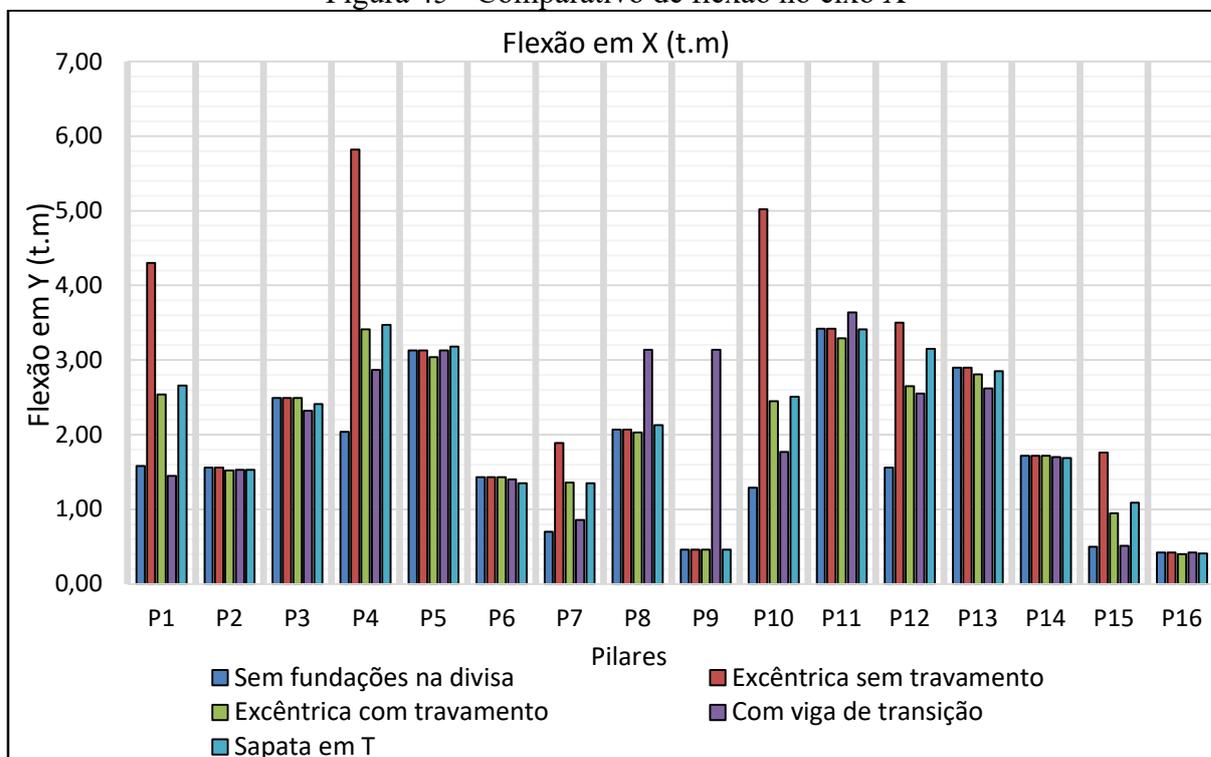
Na terceira e na quarta solução de divisa, nota-se uma redistribuição média da carga axial de, respectivamente, 13,91% e 9,04%. Para a situação de sapata centrada com viga de transição, o deslocamento no eixo dos pilares no pavimento térreo ocasiona em uma maior redistribuição de carga, já que nesse pavimento, os pilares de divisa deixam de ser elementos laterais e passam a ser centrais, modificando assim a carga dos pilares do projeto base. No caso da sapata em formato “T” também ocorre uma redistribuição, mas essa é ocasionada pelo aumento de rigidez dos elementos no pavimento térreo, resultando em um natural acréscimo de esforço nos pilares de divisa, porém mais ameno que da 3ª opção.

5.2.2 Flexão

Com a lista de carga na fundação exportada do *software*, conforme apresentado anteriormente para cada opção, foi possível realizar uma análise mais crítica referente ao

esforço de flexão. Inicialmente, a Figura 45 apresenta a comparação organizada, para cada pilar da obra, a flexão no eixo X, o qual se trata do eixo paralelo a divisa do terreno que está junto à estrutura.

Figura 45 - Comparativo de flexão no eixo X

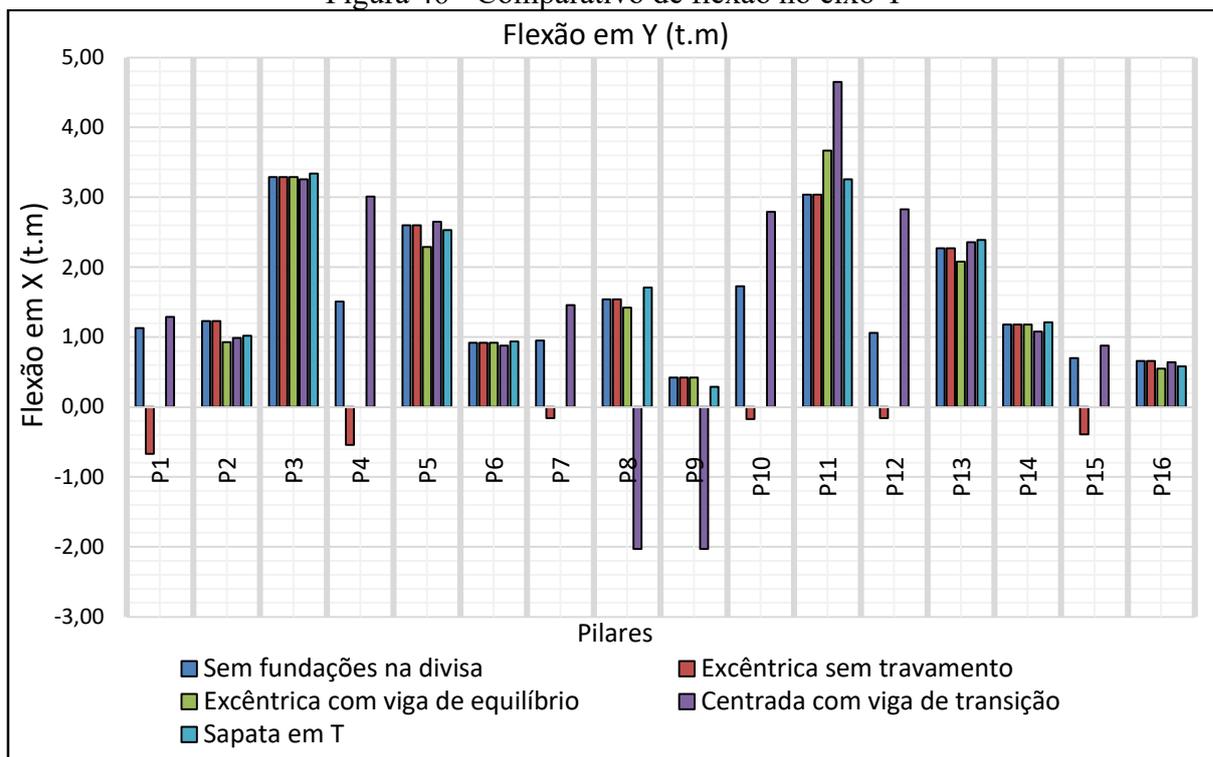


Fonte: Autor (2021)

Com a necessidade do aumento de área em contato com o solo para absorver a excentricidade, observa-se um acréscimo considerável de momento positivo nas fundações de divisa (P1, P4, P7, P10, P12 e P15). Isso ocorre pelo fato de que algumas dimensões na direção X chegam a ter 2,2 m e isso ocasiona um braço de alavanca maior em relação a carga que está no centro da sapata nesse eixo, comparando com o projeto base.

Observa-se que essas grandes alterações ocorrem decorrentes da proximidade da divisa, já que pilares como o P2 e P6 localizados no outro lado da obra, não sofrem modificações bruscas desse esforço. Além disso, no caso da sapata associada P8-P9 na terceira solução de divisa, o esforço na fundação acaba ficando positivo no eixo X e negativo no eixo Y, podendo ser verificado na Figura 46.

Figura 46 - Comparativo de flexão no eixo Y



Fonte: Autor (2021)

Para a flexão no eixo Y a figura demonstra o surgimento de momento negativo em todas fundações de divisa na 1ª solução. Isso ocorre devido a excentricidade da carga axial na sapata que não possui nenhum elemento para auxiliar no equilíbrio, sendo necessária armadura superior e maiores dimensões da fundação.

Visto isso, verifica-se também o fato de que a flexão das sapatas de divisa na 2ª e na 4ª opção possuem o valor igual a zero, ou seja, a excentricidade foi absorvida pela viga de equilíbrio e pela viga de baldrame, respectivamente. Além disso, para esse eixo também se nota uma baixa variação de esforço para os elementos que estão mais distantes da divisa, como o P2 e o P6.

5.3 ORÇAMENTAÇÃO

A seguir é apresentada na Tabela 22 o custo relativo aos insumos de fôrmas, aço e concreto para cada uma das opções de sapata de divisa e para o projeto base. Conforme descrito anteriormente, o gasto com fôrmas possui uma variação muito baixa dentro do contexto geral da obra, uma vez que a opção mais barata acabou não sendo a opção que menos utilizou esse material, assim como a pior opção não foi a que mais consumiu.

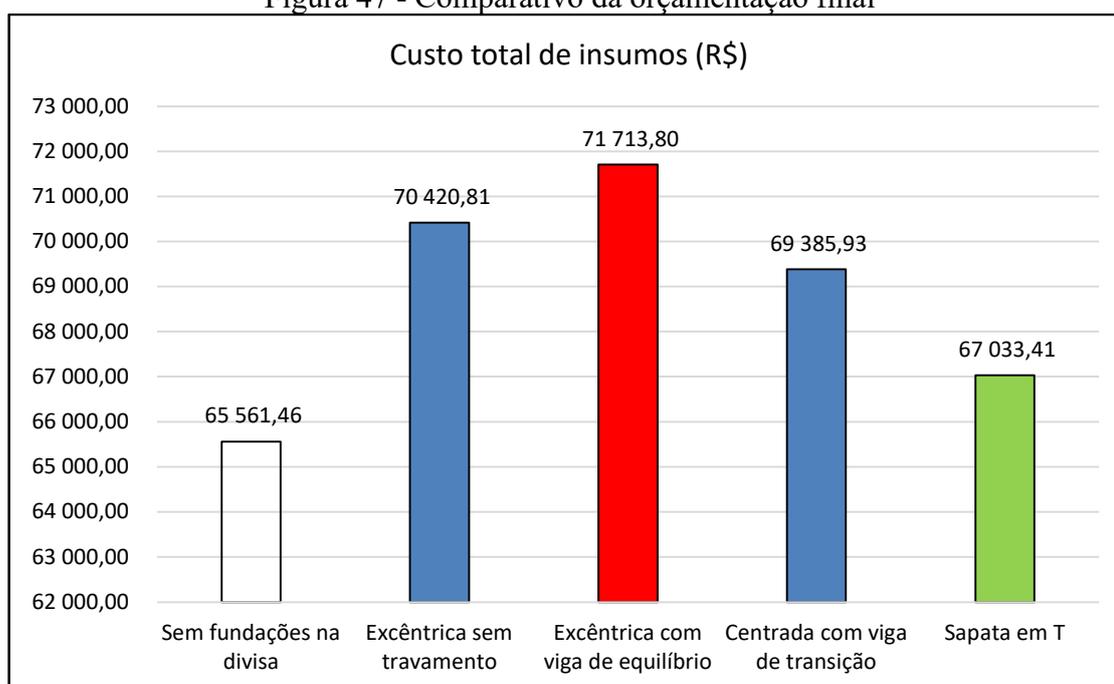
Tabela 22 - Custo por insumo para cada opção

Descrição	Fôrmas (R\$)	Aço (R\$)	Concreto (R\$)	Total (R\$)
Sem fundações na divisa	13 234,92	34 735,58	17 590,96	65 561,46
Excêntrica sem travamento	13 584,72	37 276,09	19 560,01	70 420,81
Excêntrica com viga de equilíbrio	13 620,93	38 907,92	19 184,95	71 713,80
Centrada com viga de transição	13 361,80	37 466,99	18 557,14	69 385,93
Sapata em T	13 397,75	35 567,73	18 067,93	67 033,41

Fonte: Autor (2021)

Sendo assim, considerando apenas os insumos da estrutura, identifica-se através da Figura 47 que a solução de sapata excêntrica com viga de equilíbrio (2ª opção), em vermelho, foi a menos vantajosa financeiramente. A estrutura apresentou uma variação em relação ao orçamento do projeto base de 9,38%, equivalente a R\$6.152,34.

Figura 47 - Comparativo da orçamentação final



Fonte: Autor (2021)

Ainda, conforme a mesma análise, verificou-se que a solução que menos acrescentou custo de insumos em relação ao projeto sem fundações na divisa foi a com sapata em formato “T” (4ª opção), em verde. O acréscimo no orçamento dessa estrutura foi de 2,25%, equivalente a R\$1.471,95, ou seja, uma diferença de R\$4.680,39 (6,98%) entre a melhor e a pior opção.

Além disso, o projeto com sapata excêntrica sem travamento apresentou um aumento de R\$4.589,35 (7,41%) e a estrutura com sapata centrada com viga de transição um acréscimo de R\$3824,47 (5,83%). Verifica-se, assim, que as duas opções que trabalham com um modelo

de sapata excêntrica, variações mais utilizadas no Brasil, apresentam os piores desempenhos financeiros em relação ao custo de insumos.

Com isso, baseado na análise de resultados de materiais, esforços e orçamentação, serão discorridas as considerações finais do trabalho de forma a expor objetivamente as principais questões de pesquisa. Os objetivos se referem à identificação se há um acréscimo de valor entre construir um projeto junto a um dos limites do terreno, e, através de uma análise técnica e financeira, da melhor solução de sapata de divisa entre as apresentadas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou os aspectos gerais dos tipos de fundações presentes na normativa brasileira vigente, com enfoque no tipo superficial. A partir disso, verificou-se os parâmetros de dimensionamento para sapatas, buscando um maior aprofundamento em soluções para obras que se encontram na divisa. Sendo assim, através do *software* CYPECAD, realizou-se um estudo de caso para um sobrado de médio padrão de 150 m², localizado na cidade de Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul. Primeiramente, foi dimensionado o projeto base da estrutura e, após isso, considerando que obra estivesse junto a um dos limites do terreno, buscou-se a melhor solução para as sapatas que estariam na divisa.

Foram apresentadas quatro opções para dimensionamento, sendo elas: sapata excêntrica sem travamento, sapata excêntrica com viga de equilíbrio, sapata centrada com viga de transição e sapata em formato “T”. As duas primeiras opções, uma vez que são as únicas soluções para divisas apresentadas por autores como Azeredo (1997), Araújo (2014) e Lopes e Velloso (2011), entende-se que são as mais utilizadas no País, ao passo que as duas últimas são soluções baseadas em autores como Calavera (2000) e Montoya (2001), além de análises de diagrama de corpo livre. Com isso, foram verificados o consumo de formas, aço e concreto, além dos esforços resultantes nas fundações e a orçamentação dos insumos para a estrutura.

Sendo assim, inicialmente foi possível observar que, quando é optado por projetar uma residência desse padrão junto a um dos limites do terreno, o custo adicional na estrutura varia entre 2,25% e 9,38%. A escolha do tipo de fundação de divisa é estritamente do projetista estrutural contratado para a residência, ao passo que o cliente poderá gastar até R\$6.152,34 a mais em insumos em uma decisão errada do profissional, no caso de construções similares ao objeto de estudo. Comprovou-se, também, que essa decisão possui uma tendência a ser tomada pelo lado mais caro, já que as duas primeiras soluções que são as mais utilizadas no Brasil, também foram as duas menos vantajosas financeiramente nesse caso, com um acréscimo de 1,49% até 3,35% no custo total de insumos da estrutura.

A partir disso, entre as duas formas mais encontradas em território nacional, a sapata excêntrica sem travamento apresentou um melhor aspecto econômico com uma diferença de 1,8% no custo total de insumos da estrutura. Escolher essa opção contraria recomendações de autores como Lopes e Velloso (2011), os quais comentam sobre a prudência na utilização de viga de equilíbrio justificando com a flexão imposta no pilar em obras de retirada de solo no terreno vizinho, e também, exemplificando o caso de um prédio no Rio de Janeiro que colapsou

por esse motivo. Contudo, considerando que nesse caso não exista subsolo para ser realmente efetiva uma descompressão em terrenos próximos, além de Montero (2016) explicar que para cargas baixas a viga de equilíbrio pode ser descartada, a opção mais vantajosa financeiramente e com justificativa técnica, dentre as duas primeiras soluções, seria a sapata excêntrica sem travamento.

Entretanto, ao comparar as quatro opções apresentadas para as fundações superficiais de divisa, a solução mais vantajosa economicamente foi a sapata em formato “T” (4ª opção). Dentre todos os projetos, esse caso apresentou o menor acréscimo no custo total de insumos, apenas 2,25%, menos da metade do aumento da segunda melhor opção que se refere a sapata centrada com viga de transição, a qual apresentou uma adição de 5,83%.

Portanto, conclui-se que, para o objeto de estudo do presente trabalho e com os parâmetros adotados, a melhor solução apresentada para sapata de divisa é a em formato “T”. A opção, além de demonstrar a melhor economia financeira, demonstra tecnicamente que absorve as excentricidades de carga ao apresentar valores iguais a zero na flexão do eixo perpendicular a divisa, uma vez que é recebida a contribuição de vigas de baldrame na mesma direção para o equilíbrio, sendo obrigatória a existência desse elemento nessa posição. Além disso, a menor utilização dos insumos, além de afetar diretamente no orçamento da obra, interage com as demandas ecológicas do planeta, reduzindo a emissão de CO₂ e o consumo de água;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas. **Projetos estrutural de sapatas**. Santa Maria: UFSM, 2007. (Apostila).

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014a. 2v.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014a. 4v.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p. Disponível em: <https://www.ucs.br/site/biblioteca/normalizacao/>. Acesso em: 05 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 60 p. Disponível em: <https://www.ucs.br/site/biblioteca/normalizacao/>. Acesso em: 05 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2019. 108 p. Disponível em: <https://www.ucs.br/site/biblioteca/normalizacao/>. Acesso em: 05 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 1988. 66 p. Disponível em: <https://www.ucs.br/site/biblioteca/normalizacao/>. Acesso em: 05 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. Disponível em: <https://www.ucs.br/site/biblioteca/normalizacao/>. Acesso em: 05 abr. 2021.

AZEREDO, Hélio Alvez de. **O edifício até sua cobertura**: prática de construção civil. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1997. 182 p.

BARONI, Henriette Justina Manfredini; VIERO, Édison Hunberto. **Pré-dimensionamento de elementos estruturais de concreto armado**. Bento Gonçalves: 49º Congresso Brasileiro do Concreto - Ibracon, 2007.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Sapatas de Fundação**: estruturas de concreto III. São Paulo: UNESP, 2019. (Apostila).

BERBERIAN, Dickran. **Engenharia de fundações**. Brasília: Isbn, 1986. 920 p.

CALAVERA, José Ruíz. **Cálculo de Estructuras de Cimentación**. 4. ed. Madrid: Intemac, 2000.

CAMPOS, João Carlos de. **Elementos de fundação em concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 542 p. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/180550/epub/0>. Acesso em: 08 abr. 2021

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: Segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. atual. São Carlos: Edufscar, 2017. 415 p.

CYPE INGENIEROS (Espanha). **CYPECAD**: memória de cálculo. Alicante: Cype Ingenieros, 2003. 138 p.

DORNELES, Gilberto. **Módulo de Concreto Armado**: Sobrado. [S. l.], 2019. Curso Online. Disponível em: <https://www.engenheiroestrutural.eng.br/cursos/curso-cypecad-dimensionamento-de-sobrado/>. Acesso em: 20 maio 2021.

DIAS, Paulo Roberto Vilela. **Engenharia de Custos**: metodologia de orçamentação para obras civis. 4. ed. Rio de Janeiro: Vx Comunicação, 2003.

DINIZ, José Zamarion Ferreira. Converse com IBRACON: Personalidade entrevistada. **Concreto e Construções**: Concreto: Material construtivo mais consumido no mundo, São Paulo, ed. 53, p. 8 - 13, 2017.

GEROLLA, Giovanny. Qual percentual médio do orçamento corresponde a cada etapa da obra. **UOL**, São Paulo, 26 de novembro, 2016. Disponível em: <https://www.uol.com.br/universa/listas/qual-percentual-medio-do-orcamento-corresponde-a-cada-etapa-da-obra.htm>. Acesso em: 15 novembro 2021

HACHICH, Waldemar; FALCONI, Frederico F.; SAES, José Luiz; FROTA, Régis G. Q.; CARVALHO, Celso S.; NIYAMA, Sussumu. **Fundações**: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. 751 p.

LOPES, Francisco de Rezendo; VELLOSO, Dirceu de Alencar. **Fundações**: critérios de projetos, investigação do subsolo, fundações superficiais e fundações profundas. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

MACHADO, C. P. (1985). **Edifícios de Concreto Armado**: Fundações. São Paulo, FDTE/EPUSP.

MATTOS, Aldo Doréa. **Como Preparar Orçamentos de Obras**: dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos. São Paulo: Pini, 2006.

MONTERO, Pablo Galletero. **Optimización de cimentaciones directas de medianería y esquina mediante modelos de elementos finitos**. 2016. 260 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura, Departamento de Ingeniería Civil - Construcción E.T.s. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2016.

MONTOYA, Gpedro Jiménez; MESEGUER, Álvaro García; CABRÉ, Francisco Morán. **Hormigón Armado**. 14. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.

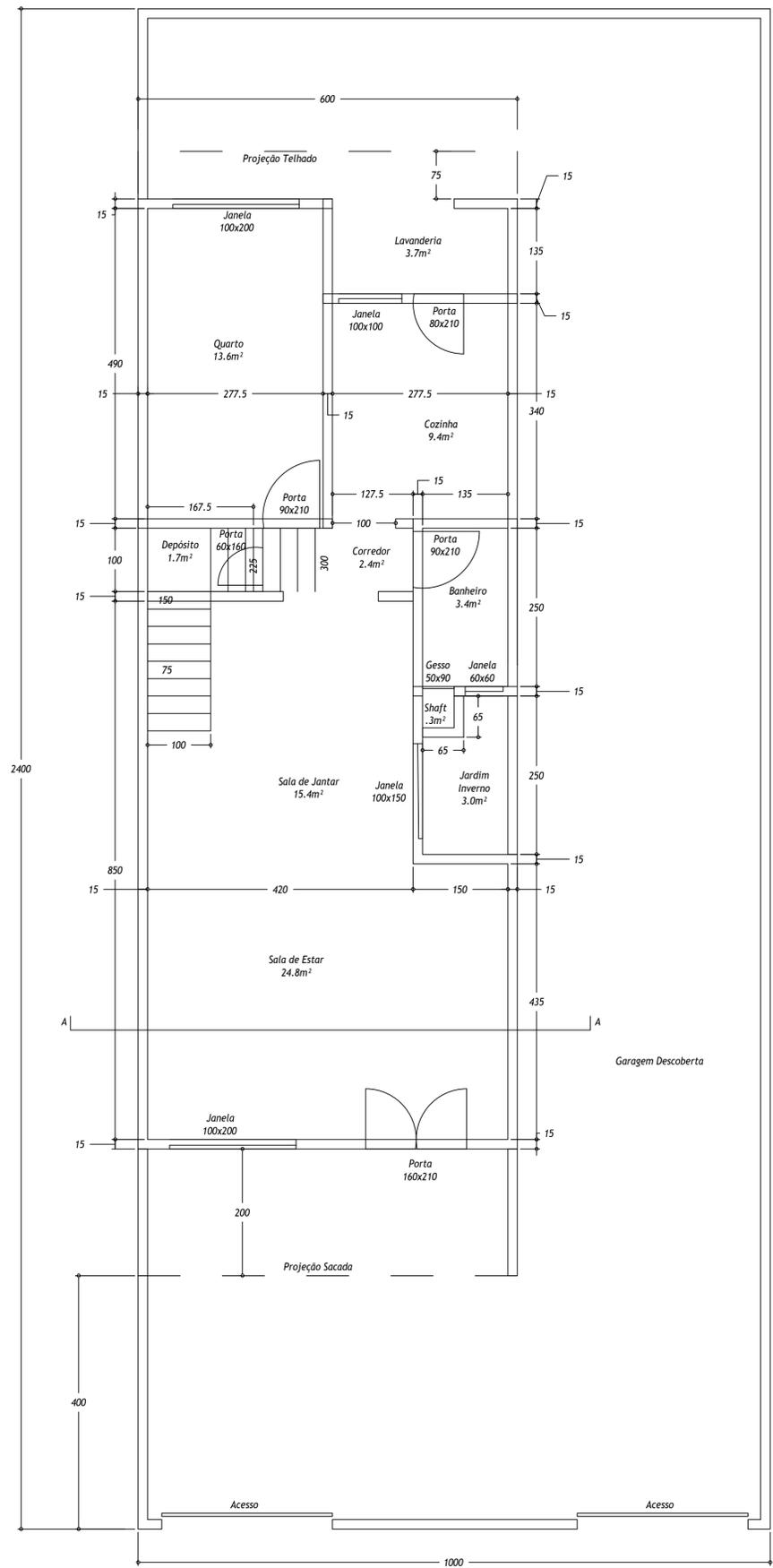
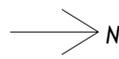
PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle Stefane Gualberto. **Curso básico de concreto armado**: Conforme NBR 6118:2014. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

RODGERS, Lucy. Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO2 que está por toda parte, mas talvez você não saiba. *In*: **BBC News**. São Paulo, 17 dez. 2018. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>. Acesso em: 20 abr. 2021.

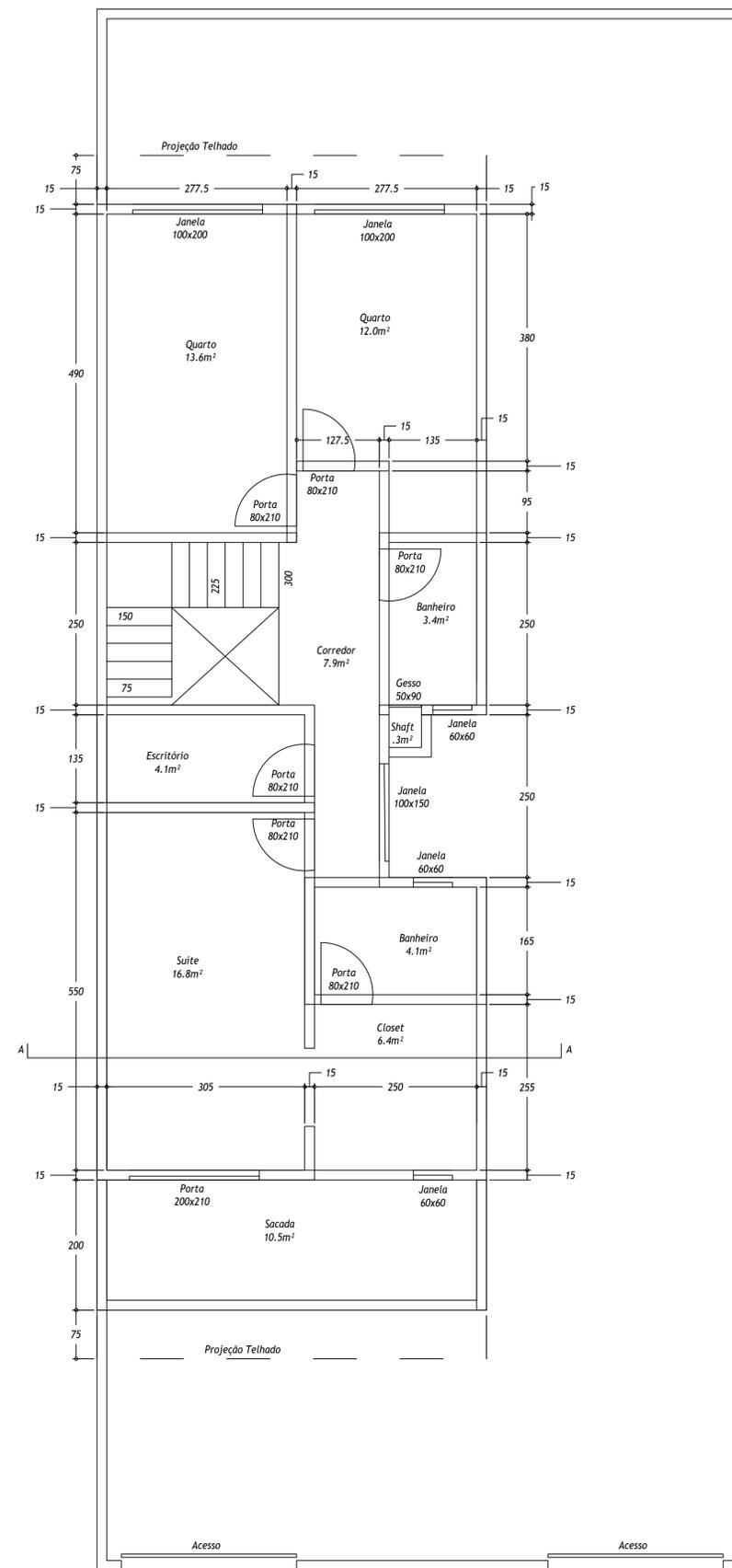
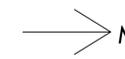
SALES, Luis Fernando Pedroso. **Projetos de fundação**: seminário sobre fundações e contenções. Vale do Itajaí: Area, 2014. 64 slides, color. Disponível em: http://www.areas.com.br/wa_files/2_Projetos_Fundacao_Sales.pdf. Acesso em: 05 abr. 2021.

ZATTI, Luciano. **Fundações Superficiais**. Bento Gonçalves: UCS, 2020. (Notas de aula)

ANEXO A – PAVIMENTO TÉRREO E PAVIMENTO SUPERIOR



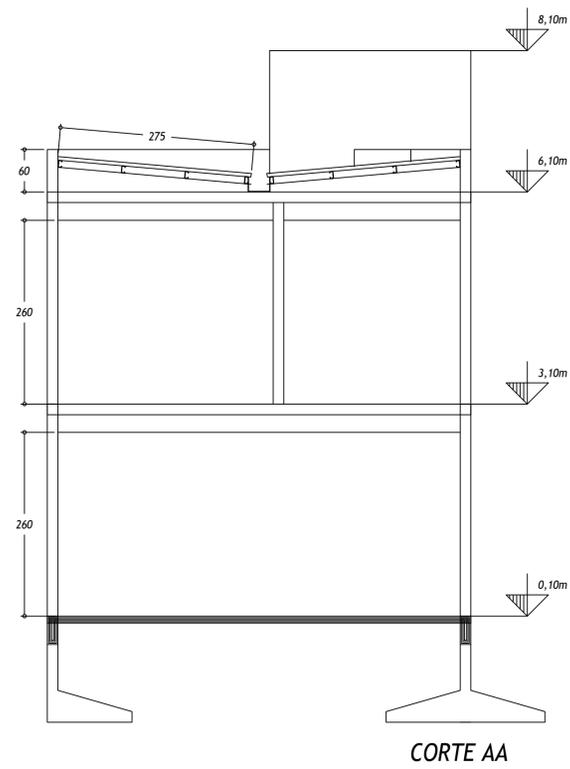
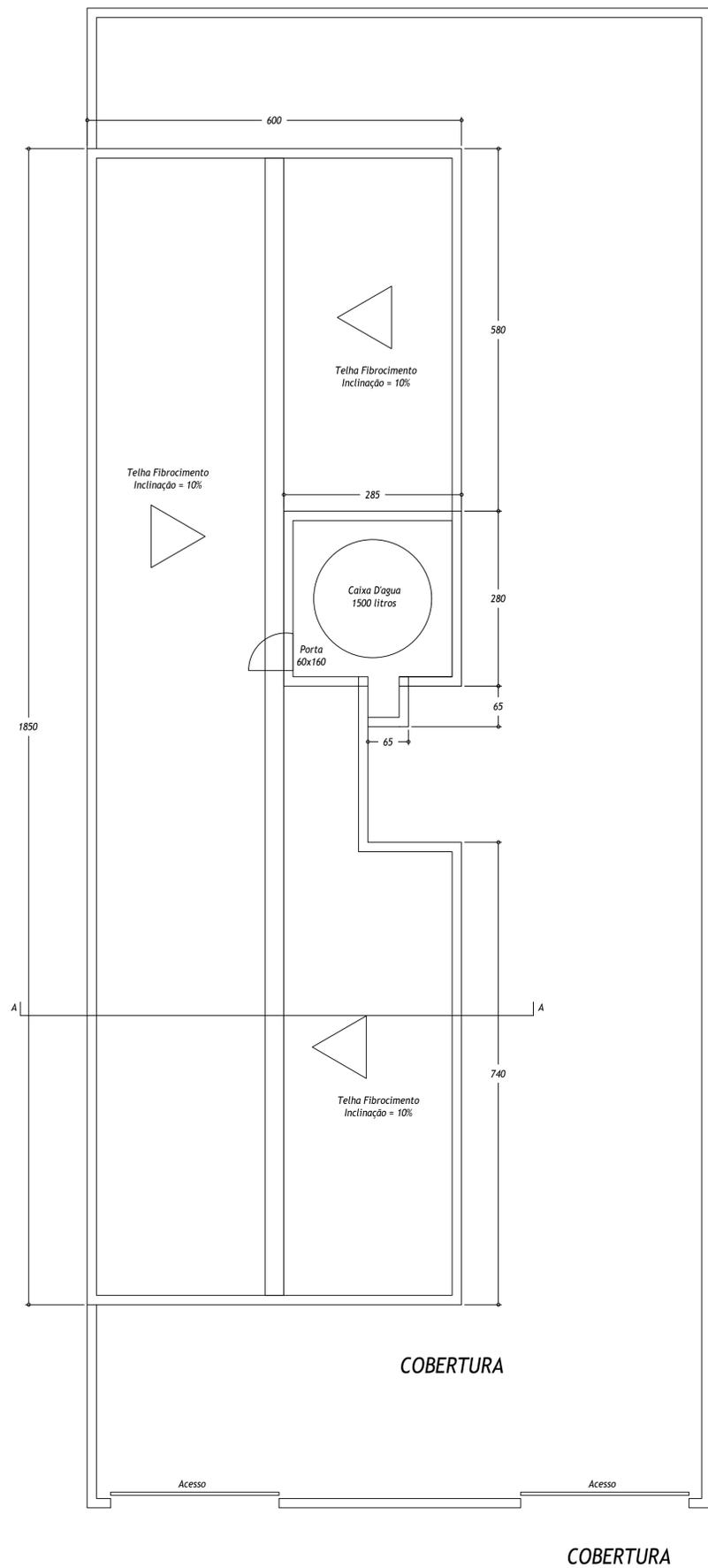
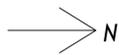
PAVIMENTO TÉRREO



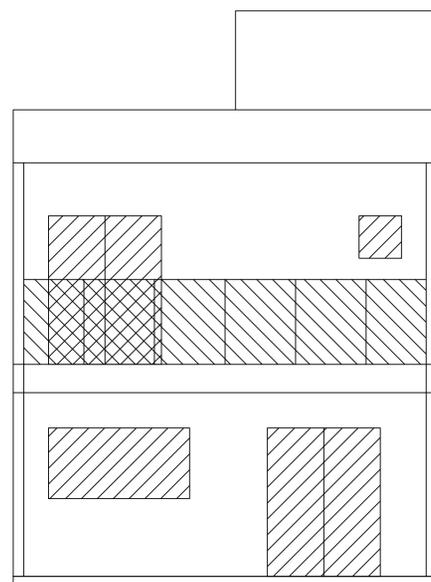
PAVIMENTO SUPERIOR

Título:	PLANTAS BAIXAS - Pavimento Térreo e Pavimento Superior	TCC
Curso:	Engenharia Civil	Prancha:
Autor:	Eng. Civil - Gilberto Dorneles	ANEXO
Turma / Período:	X / 2021/4	A
Orientador:	Luciano Zatti	Data:
Acadêmico:	Robson Humberto Rossatto Haefliger	2021
Escala:	1:50	

ANEXO B – PLANTA DE COBERTURA, FACHADA LESTE E CORTE AA

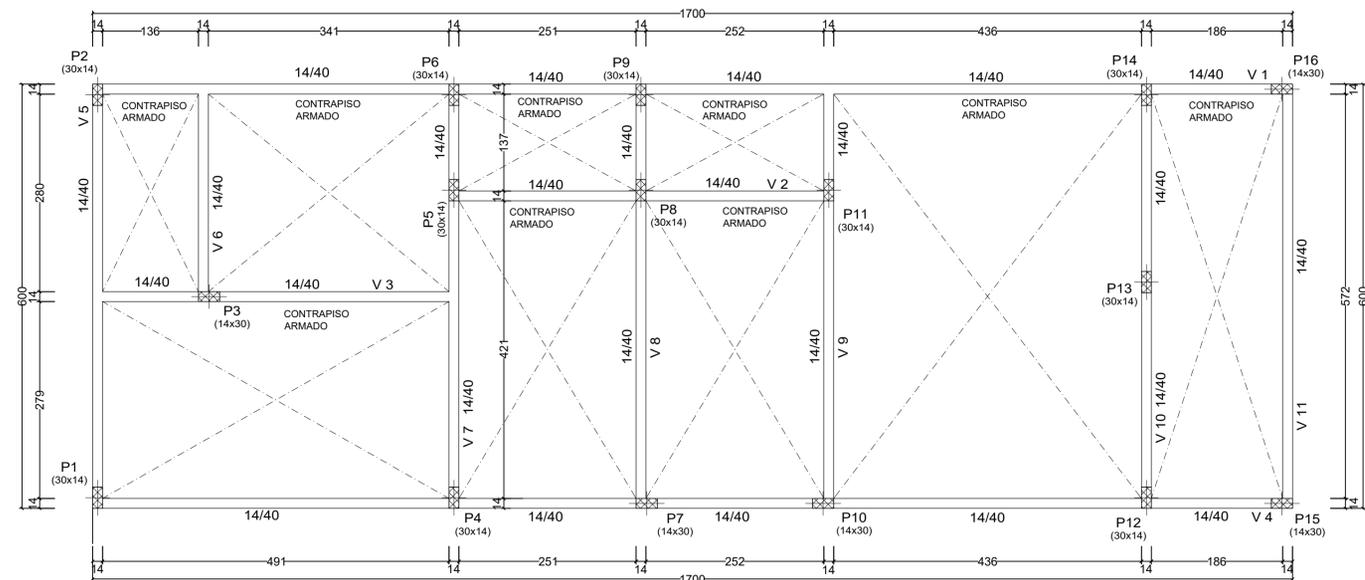


FACHADA LESTE

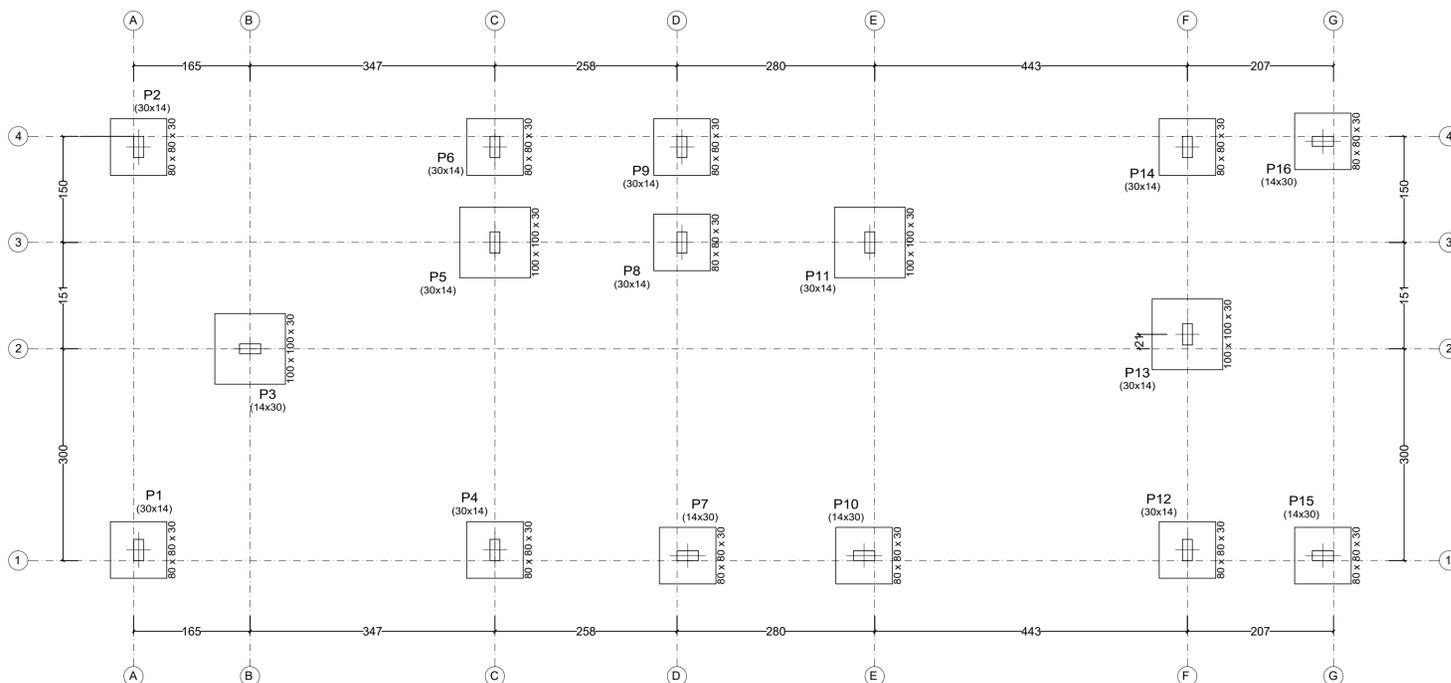


Título: Planta de Cobertura, Fachada Leste e Corte AA		TCC
Curso: Engenharia Civil		Prancha: ANEXO B
Autor: Eng. Civil - Gilberto Dorneles		
Turma / Período: X / 2021/4		Data: 2021
Orientador: Luciano Zatti		
Acadêmico: Robson Humberto Rossatto Haefliger	Escala: 1:50	

APÊNDICE A – DETALHAMENTO DAS FUNDAÇÕES DO PROJETO BASE

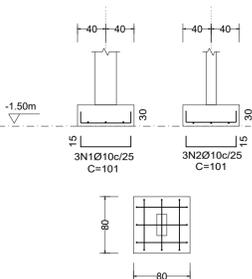


Formas do Pavimento Térreo
Esc: 1/50

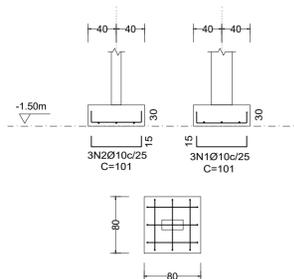


Planta de locação
Esc: 1/50

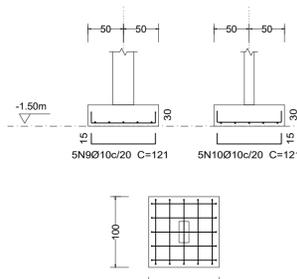
P1, P2, P3, P4, P6, P8, P9, P12 e P14
(Sapata centrada)
Escala 1:50



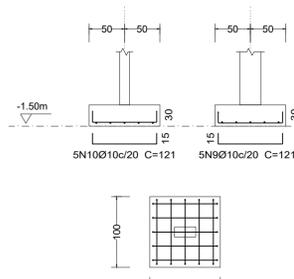
P7, P10, P15 e P16
(Sapata centrada)
Escala 1:50



P5, P11 e P13
(Sapata centrada)
Escala 1:50

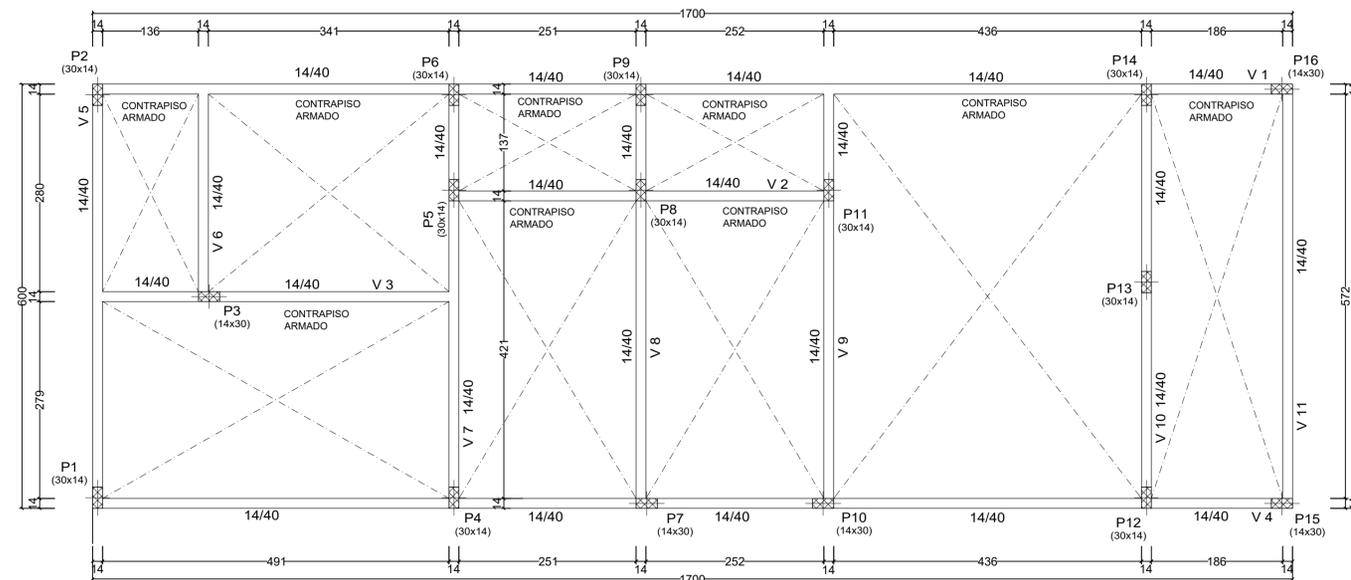


P3
(Sapata centrada)
Escala 1:50



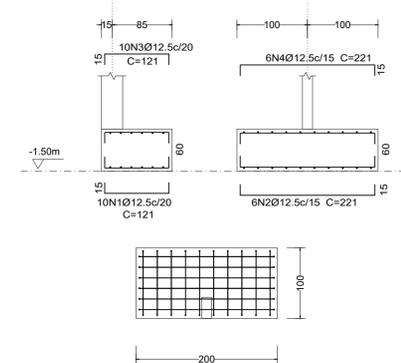
Título:	PROJETO BASE - Sem sapatas de divisa	TCC
Curso:	Engenharia Civil	Prancha:
Autor:	Robson Humberto Rossatto Haefliger	APÊNDICE
Turma / Período:	X / 2021/4	A
Orientador:	Luciano Zatti	Data:
Acadêmico:	Robson Humberto Rossatto Haefliger	2021
Escala:	1:50	

APÊNDICE B – DETALHAMENTO DAS FUNDAÇÕES DA 1ª OPÇÃO

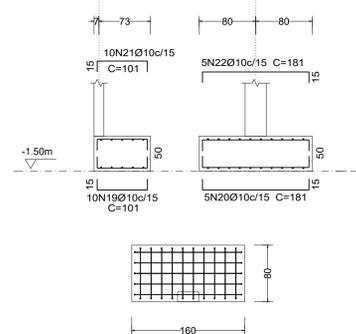


Formas do Pavimento Térreo
Esc: 1/50

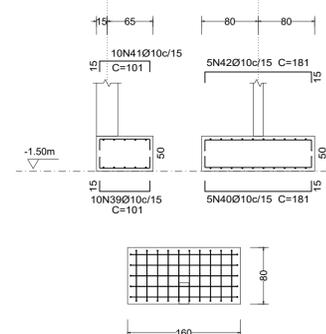
P1 e P4
(Sapata excêntrica)
Escala 1:50



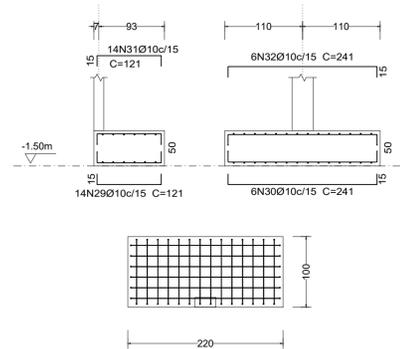
P7
(Sapata excêntrica)
Escala 1:50



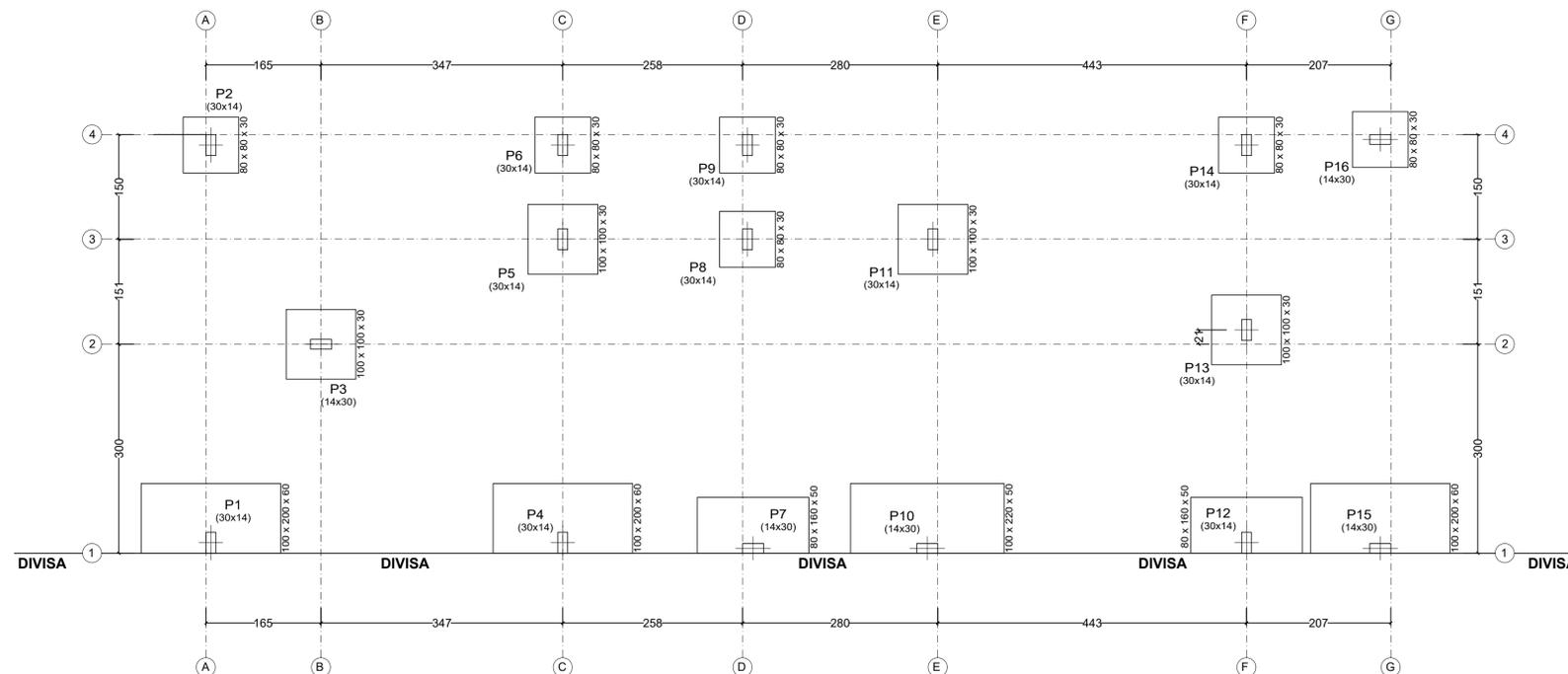
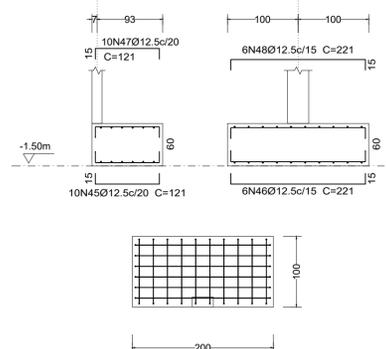
P12
(Sapata excêntrica)
Escala 1:50



P10
(Sapata excêntrica)
Escala 1:50

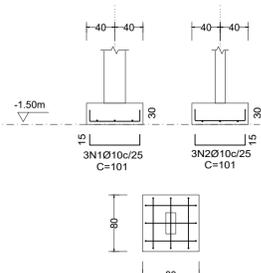


P15
(Sapata excêntrica)
Escala 1:50

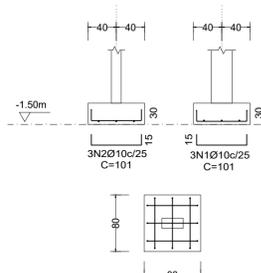


Planta de localização
Esc: 1/50

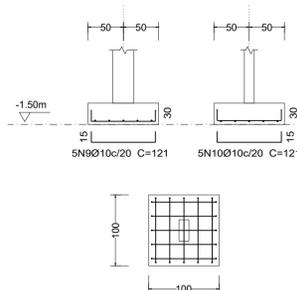
P2, P3, P6, P8, P9 e P14
(Sapata centrada)
Escala 1:50



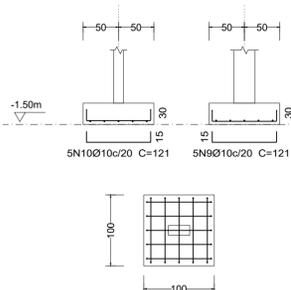
P16
(Sapata centrada)
Escala 1:50



P5, P11 e P13
(Sapata centrada)
Escala 1:50

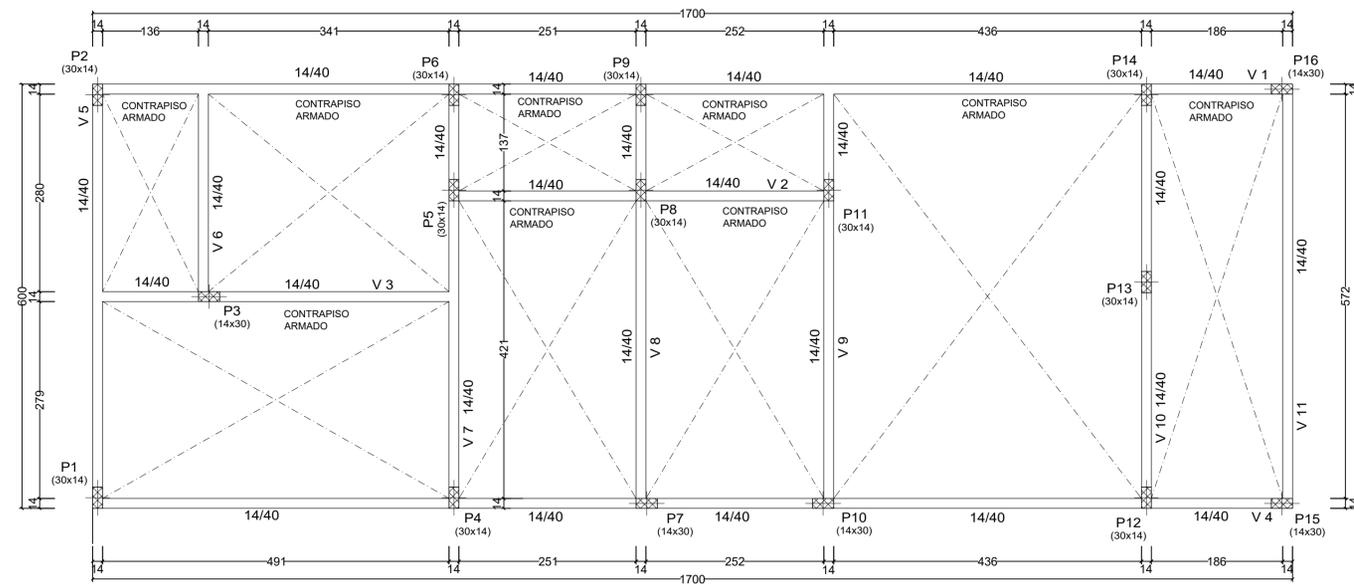


P3
(Sapata centrada)
Escala 1:50

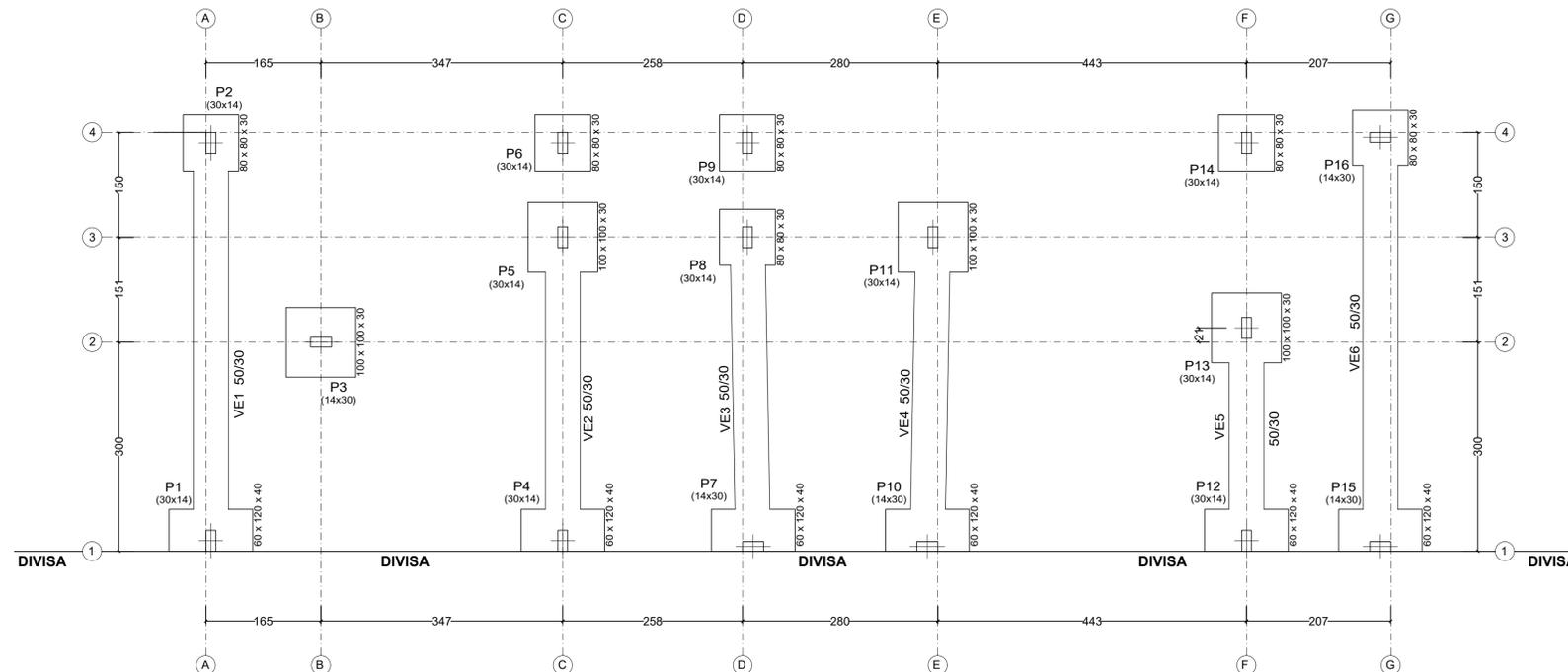
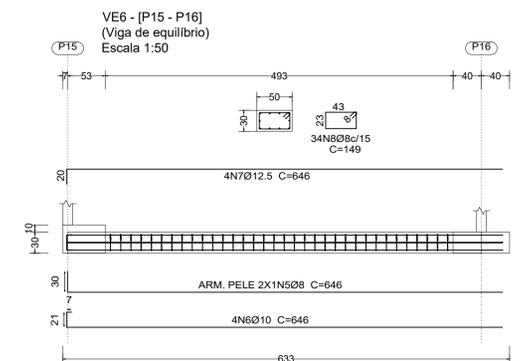
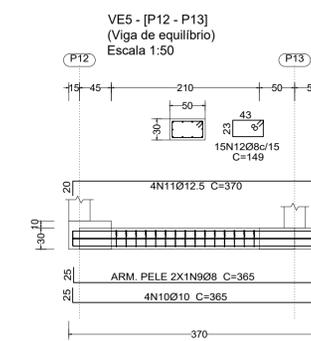
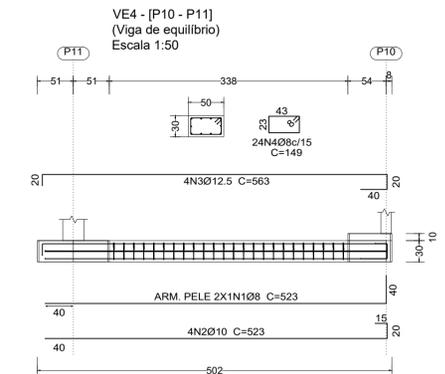
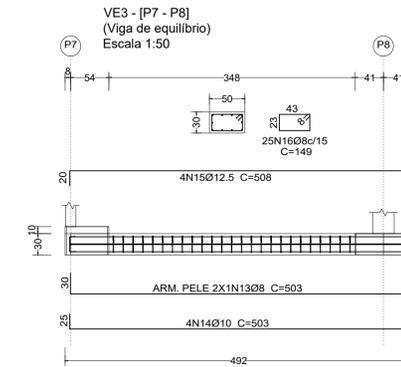
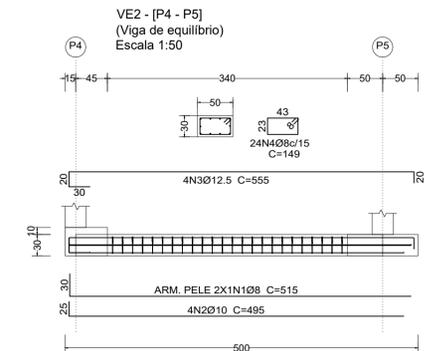
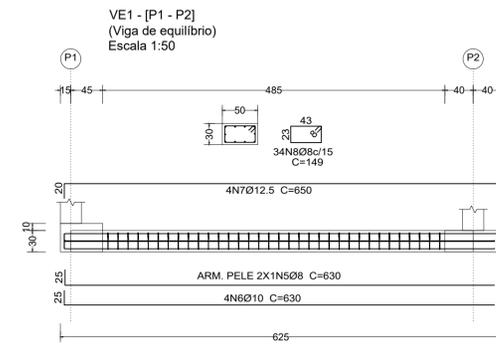


Título:	1ª OPÇÃO - Sapata excêntrica sem travamento	TCC
Curso:	Engenharia Civil	Prancha:
Autor:	Robson Humberto Rossatto Haefliger	APÊNDICE
Turma / Período:	X / 2021/4	B
Orientador:	Luciano Zatti	Data:
Acadêmico:	Robson Humberto Rossatto Haefliger	2021
Escala:	1:50	

APÊNDICE C – DETALHAMENTO DAS FUNDAÇÕES DA 2ª OPÇÃO

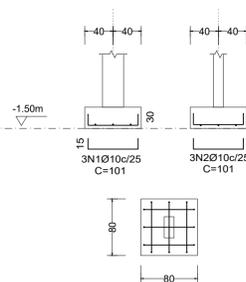


Formas do Pavimento Térreo
Esc: 1/50

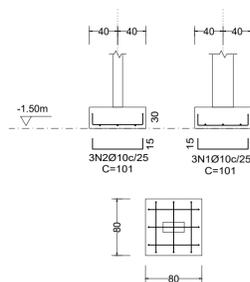


Planta de localização
Esc: 1/50

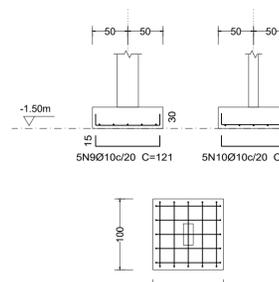
P2, P3, P6, P8, P9 e P14
(Sapata centrada)
Escala 1:50



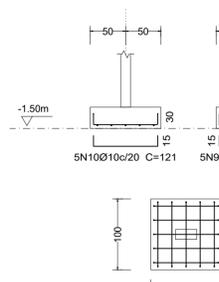
P16
(Sapata centrada)
Escala 1:50



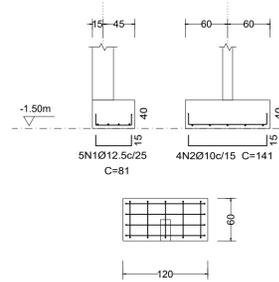
P5, P11 e P13
(Sapata centrada)
Escala 1:50



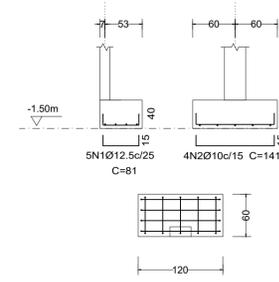
P3
(Sapata centrada)
Escala 1:50



P1, P4 e P12
(Sapata excêntrica)
Escala 1:50



P7, P10 e P15
(Sapata excêntrica)
Escala 1:50



Título:
2ª OPÇÃO - Sapata excêntrica com viga de equilíbrio

Curso:
Engenharia Civil

Autor:
Robson Humberto Rossatto Haefliger

Turma / Período:
X / 2021/4

Orientador:
Luciano Zatti

Acadêmico:
Robson Humberto Rossatto Haefliger

Escala:
1:50

TCC

Prancha:

Engenharia Civil

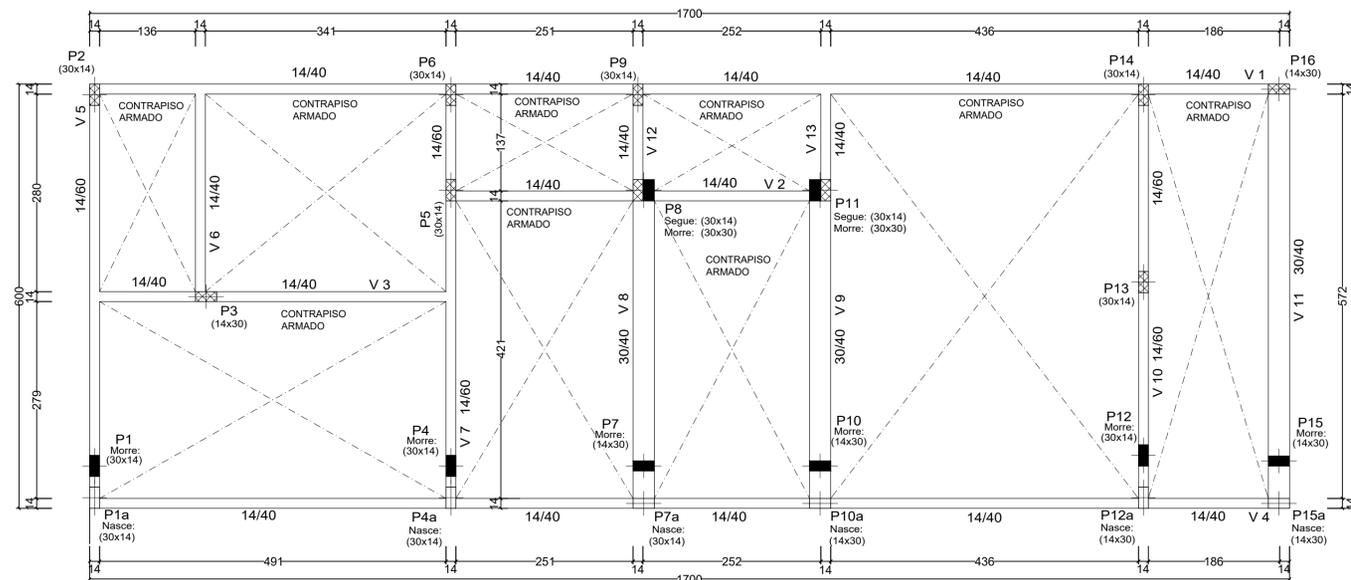
APÊNDICE

C

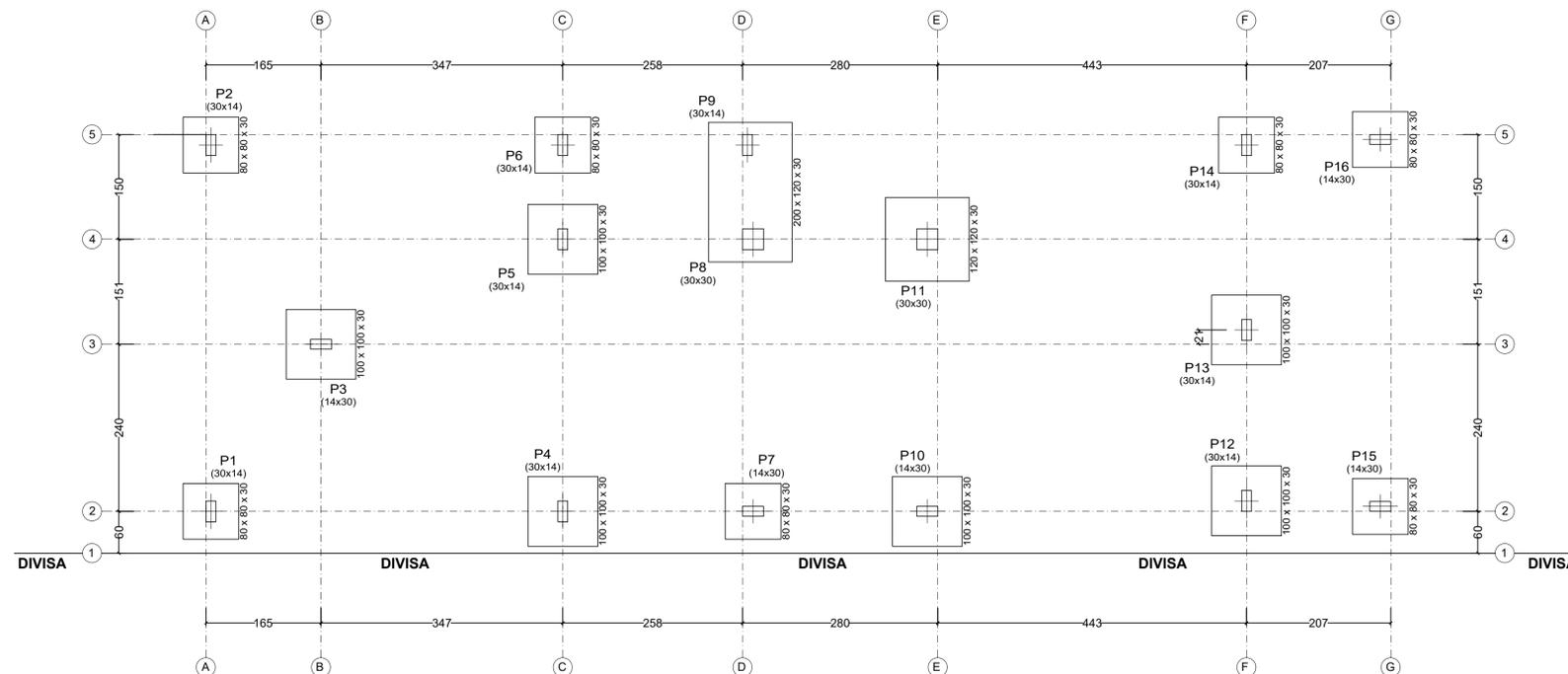
Data:

2021

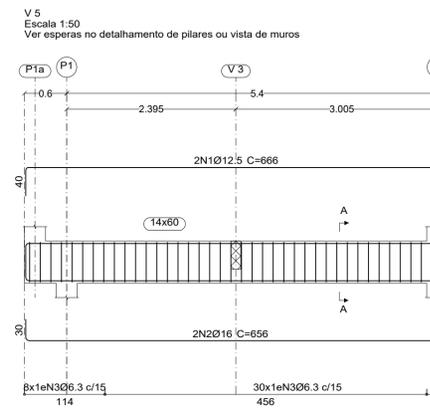
APÊNDICE D – DETALHAMENTO DAS FUNDAÇÕES DA 3ª OPÇÃO



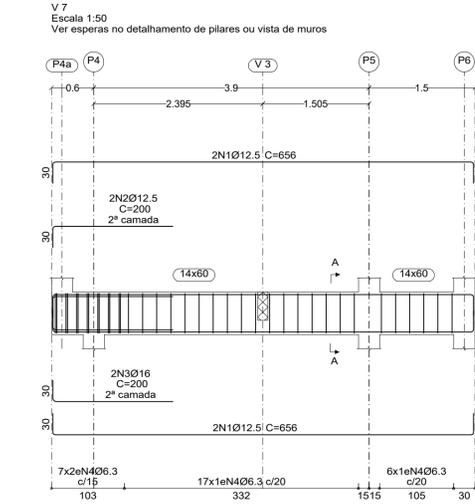
Formas do Pavimento Térreo
Esc: 1/50



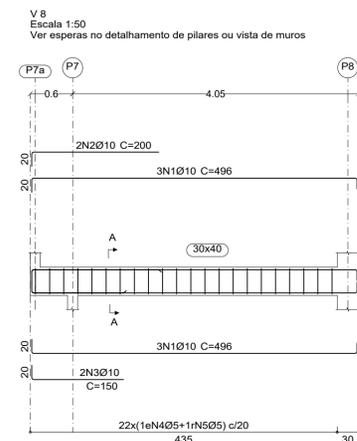
Planta de localização
Esc: 1/50



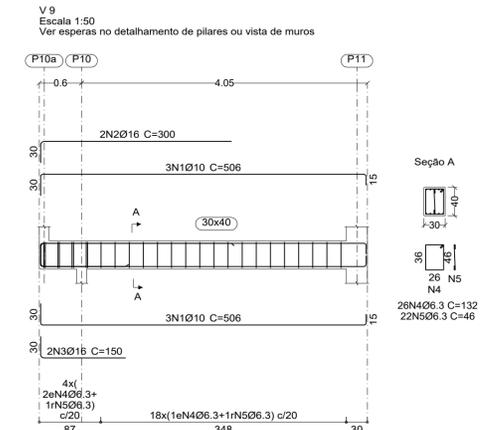
Seção A



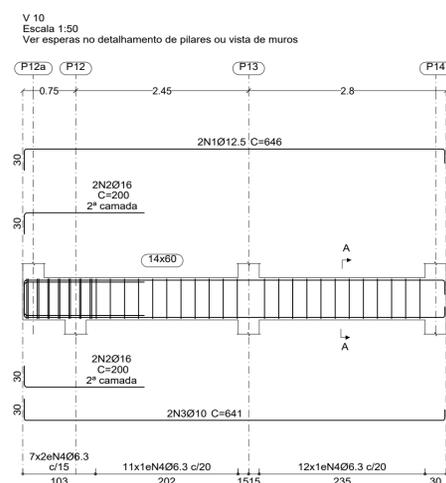
Seção A



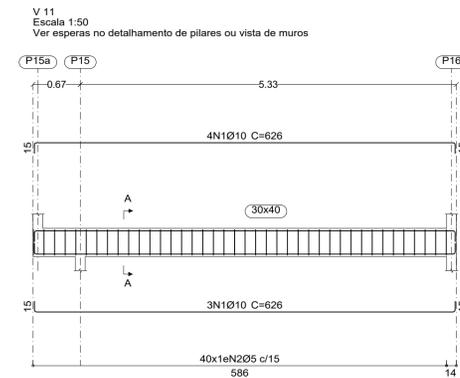
Seção A



Seção A

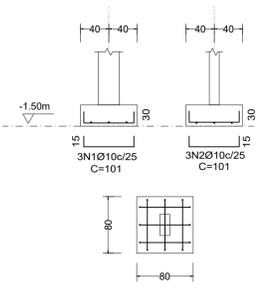


Seção A

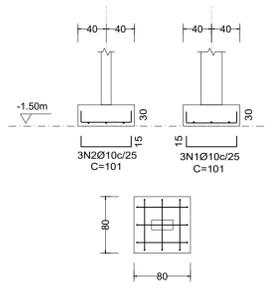


Seção A

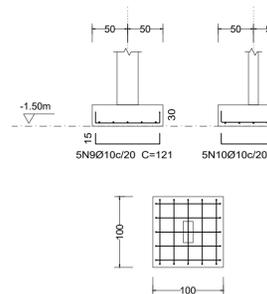
P1, P2, P3, P6 e P14
(Sapata centrada)
Escala 1:50



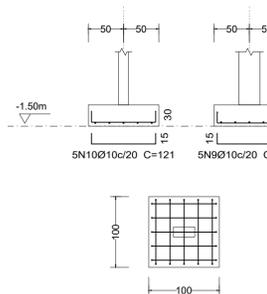
P7, P15 e P16
(Sapata centrada)
Escala 1:50



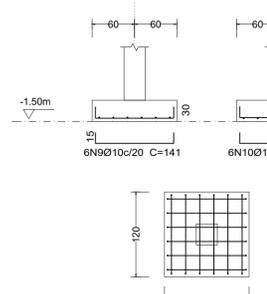
P4, P5, P12 e P13
(Sapata centrada)
Escala 1:50



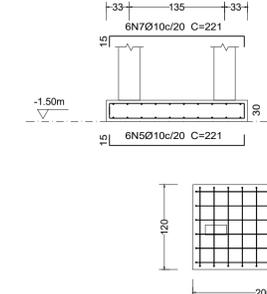
P3 e P10
(Sapata centrada)
Escala 1:50



P11
(Sapata centrada)
Escala 1:50

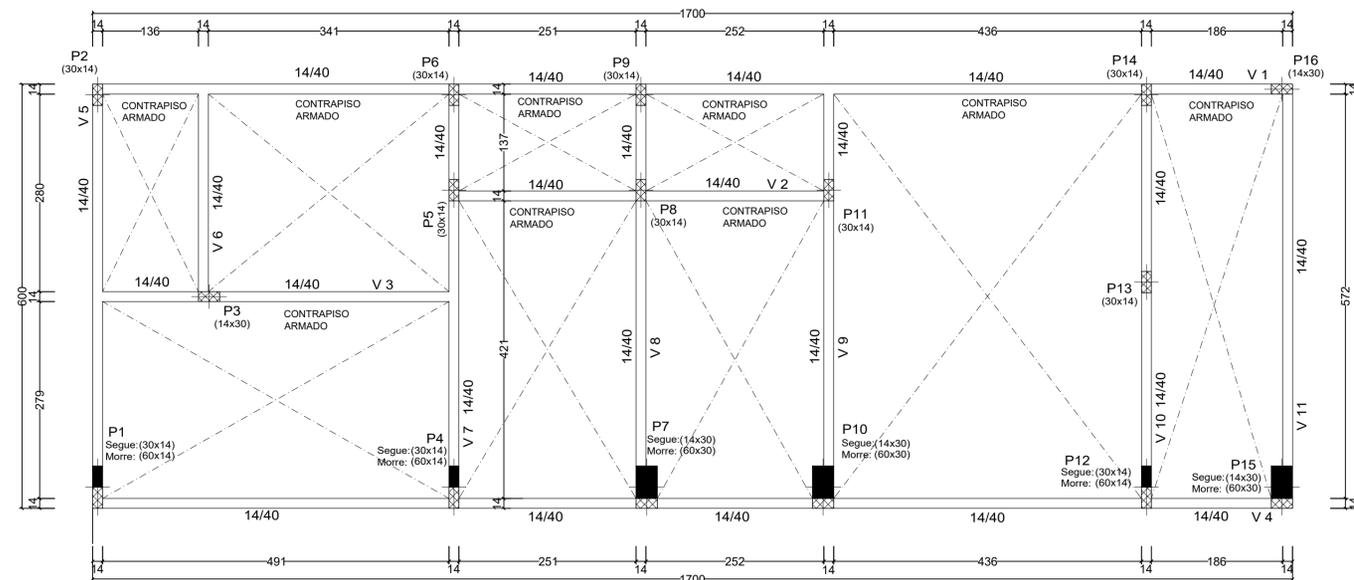


P8 - P9
(Sapata associada)
Escala 1:50

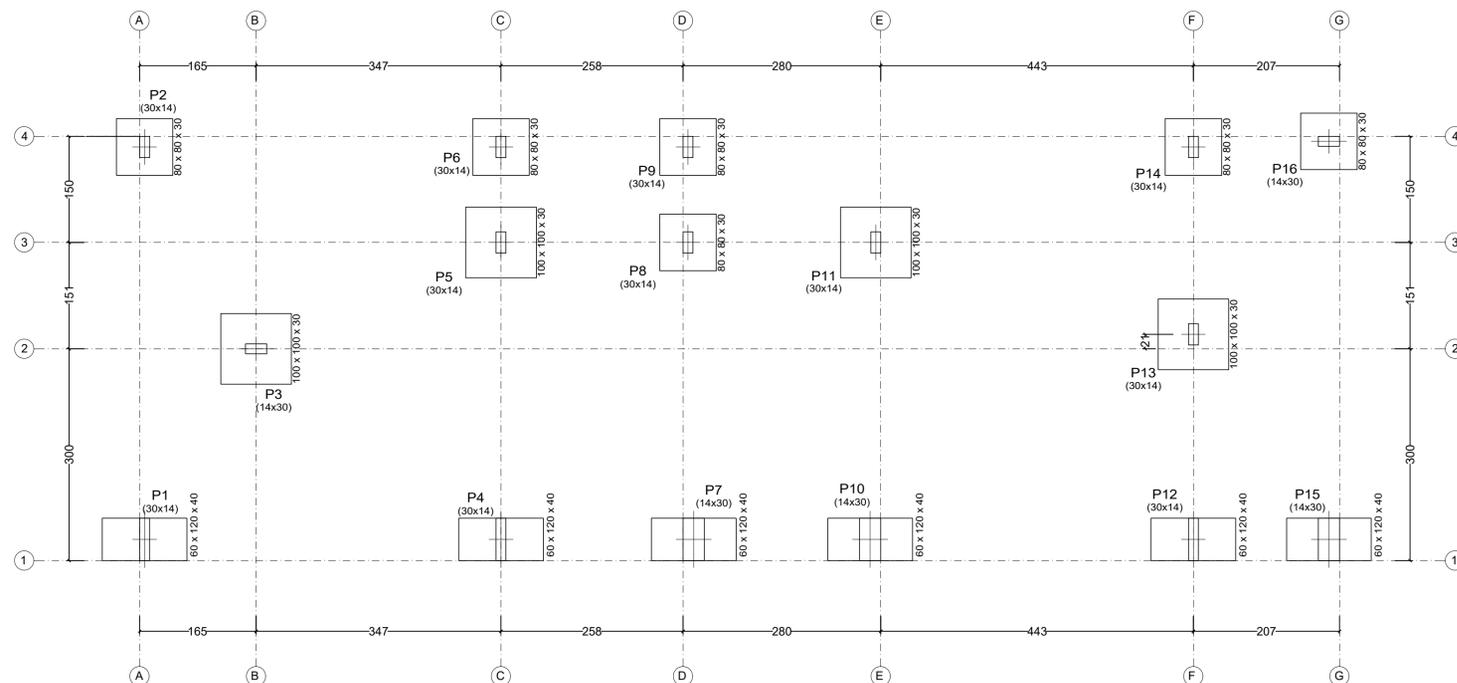


Título:	3ª OPÇÃO - Sapata centrada com viga de transição
Curso:	Engenharia Civil
Autor:	Robson Humberto Rossatto Haefliger
Turma / Período:	X / 2021/4
Orientador:	Luciano Zatti
Acadêmico:	Robson Humberto Rossatto Haefliger
TCC	
Prancha:	APÊNDICE D
Data:	2021
Escala:	1:50

APÊNDICE E – DETALHAMENTO DAS FUNDAÇÕES DA 4ª OPÇÃO

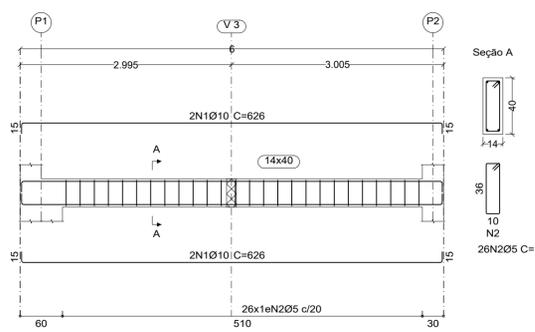


Formas do Pavimento Térreo
Esc: 1/50



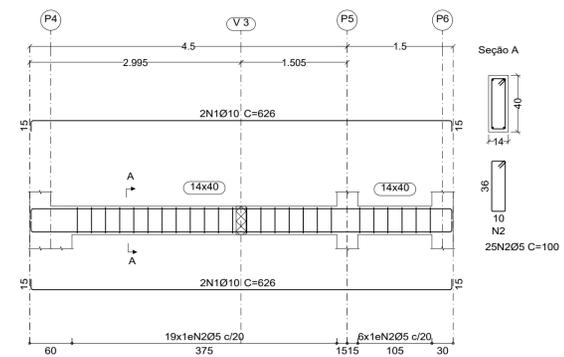
Planta de localização
Esc: 1/50

V 5
Escala vigas 1:50
Escala seções 1:25



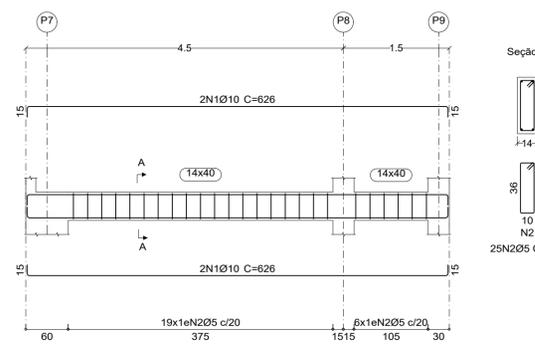
Seção A
10 N2
26N2Ø5 C=100

V 7
Escala vigas 1:50
Escala seções 1:25



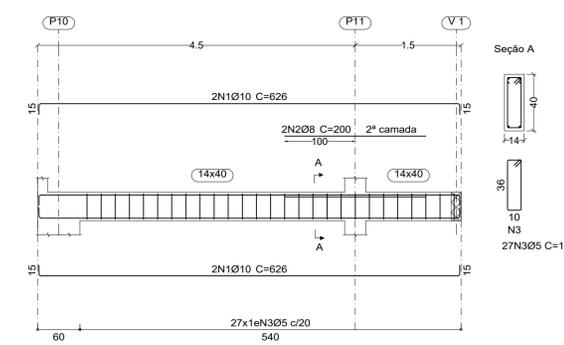
Seção A
10 N2
25N2Ø5 C=100

V 8
Escala vigas 1:50
Escala seções 1:25



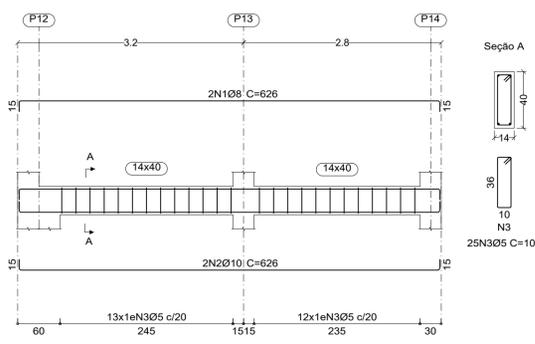
Seção A
10 N2
25N2Ø5 C=100

V 9
Escala vigas 1:50
Escala seções 1:25



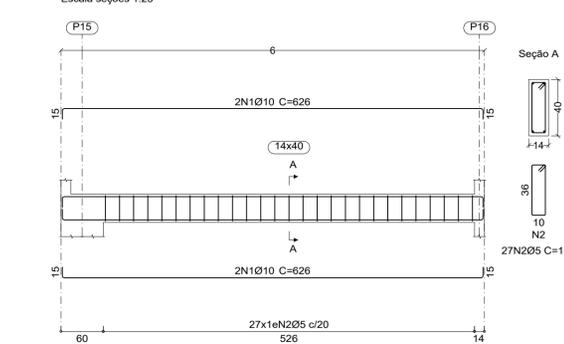
Seção A
10 N3
27N3Ø5 C=100

V 10
Escala vigas 1:50
Escala seções 1:25



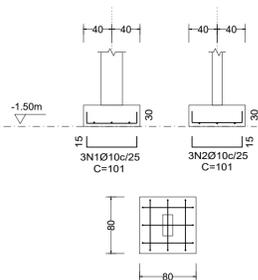
Seção A
10 N3
25N3Ø5 C=100

V 11
Escala vigas 1:50
Escala seções 1:25

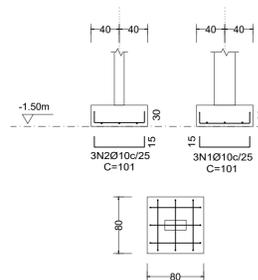


Seção A
10 N2
27N2Ø5 C=100

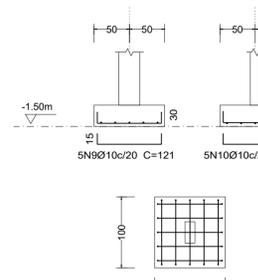
P2, P3, P6, P8, P9 e P14
(Sapata centrada)
Escala 1:50



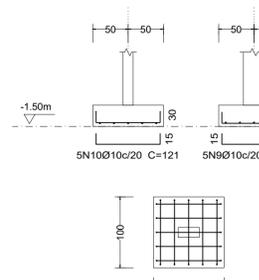
P16
(Sapata centrada)
Escala 1:50



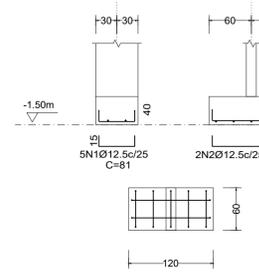
P5, P11 e P13
(Sapata centrada)
Escala 1:50



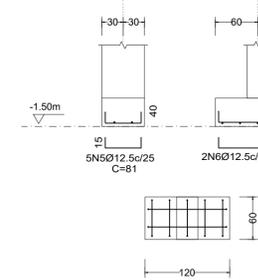
P3
(Sapata centrada)
Escala 1:50



P1, P4 e P12
(Sapata em "T")
Escala 1:50



P7, P10 e P15
(Sapata em "T")
Escala 1:50



Título:	4ª OPÇÃO - Sapata em formato "T"	TCC
Curso:	Engenharia Civil	Prancha:
Autor:	Robson Humberto Rossatto Haefliger	APÊNDICE
Turma / Período:	X / 2021/4	E
Orientador:	Luciano Zatti	Data:
Acadêmico:	Robson Humberto Rossatto Haefliger	2021
Escala:	1:50	