



LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO UNIVERSITÁRIO DO RIO GRANDE DO NORTE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LANARA MANUELY NERES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE METODOLOGIAS NO DIMENSIONAMENTO
DE SAPATAS ISOLADAS**

NATAL/RN

2022

LANARA MANUELY NERES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE METODOLOGIAS NO DIMENSIONAMENTO
DE SAPATAS ISOLADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) como requisito final para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Anderson Albino Ferreira

NATAL/RN

2022

Catálogo na Publicação – Biblioteca do UNI-RN
Setor de Processos Técnicos

Oliveira, Lanara Manuely Neres de.
Análise comparativa entre metodologias no dimensionamento de sapatas isoladas. / Lanara Manuely Neres de Oliveira. – Natal, 2022.
118 f.

Orientador: Prof. Me. Anderson Albino Ferreira.
TC (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário do Rio Grande do Norte.

1. Engenharia civil. 2. Estruturas. 3. Fundações rasas. 4. Dimensionamento. 5. Estrutura. 6. Comparativo de custos dos materiais.
I. Ferreira, Anderson Albino. II. Título.

RN/UNI-RN/BC

CDU 624

LANARA MANUELY NERES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE METODOLOGIAS NO DIMENSIONAMENTO
DE SAPATAS ISOLADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado ao Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Anderson Albino Ferreira
Orientador

Prof. Dr. Carlos Gomes de Moura
Membro avaliador interno

Prof. Esp. Tarcísio Medeiros Lima
Membro avaliador externo

Dedico esse trabalho aos meus avós, sem eles nada disso seria possível.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por ter me proporcionado essa conquista da graduação e me dado forças em momentos de exaustão.

Aos meus familiares por todo apoio e compreensão, e em especial aos meus avós, Francisco e Maricelia, por todos os sacrifícios que fizeram para eu ter chegado até aqui.

Aos meus amigos por acreditarem em mim e por todo encorajamento que recebi, que de forma direta e indireta contribuíram com essa conquista.

Aos meus colegas de curso por todos as experiências, alegrias e angústias que dividimos ao longo dos anos, conseguimos sobreviver e sabemos que não foi fácil.

Aos meus professores no decorrer da graduação por todos incentivos e ensinamentos compartilhados.

Especialmente ao meu professor e orientador Anderson Albino, por toda paciência, dedicação, conhecimento, e total disponibilidade no desenvolvimento desse trabalho.

Gratidão a todos!

A gente tem que sonhar, senão as coisas
não acontecem.

Oscar Niemeyer

RESUMO

Sendo a fundação o elemento mais importante de uma construção, cujo objetivo é garantir de forma permanente a estabilidade da edificação, é essencial que o seu dimensionamento seja realizado de maneira adequada para garantir a transmissão das cargas atuantes ao solo com um adequado coeficiente de segurança. Visando um melhor aproveitamento do curso, o presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de realizar uma análise comparativa entre métodos de dimensionamentos para verificar questões como o superdimensionamento da fundação. Sendo assim, foi realizada a modelagem da superestrutura no software estrutural TQS, para posteriormente ser extraído o mapeamento das cargas aplicadas. Conhecidas as cargas atuantes foi desenvolvida uma planilha inteligente com base na metodologia do Comitê Europeu de Concreto (CEB-70). Com os resultados obtidos do dimensionamento pelos dois métodos, foi possível verificar o impacto estrutural de cada procedimento de cálculo e construir um orçamento preliminar de fundações com o auxílio do SEOBRA para verificar seu impacto financeiro e a metodologia mais econômica para esse projeto. Todavia, com o desenvolvimento desse trabalho foi possível observar a importância de conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso na área de estruturas, para poder manusear de forma adequada os softwares computacionais utilizados e corrigir parâmetros para evitar custos excessivos que o software apresenta com as configurações default. Em um projeto estrutural não existe apenas uma metodologia correta, cabe ao profissional habilitado observar qual método considera a solução mais econômica e segura possível.

Palavras-chave: Estruturas. Fundações Rasas. Dimensionamento.

ABSTRACT

Since the foundation is the element of a construction, whose objective is to permanently guarantee the stability of education, it is essential that its dimensioning is carried out properly to guarantee the transmission of the loads acting to the ground with an adequate adjustment of conformity. Aiming at a better use of the course, the present work was developed in order to carry out a comparative analysis between sizing methods to verify issues such as the oversizing of the foundation. Therefore, a modeling of the superstructure was carried out in the structural software TQS, to later be selected the mapping of the applied ones. The active loads were developed in a European spreadsheet based on the methodology of the Concrete Committee (CEB-70). With the results obtained from the sizing of two methods, it was possible to verify the structural impact of each impact calculation procedure and to build with a preliminary budget from SEOBRA to verify its financial project and the most economical methodology for this financial project. However, with the development of this work, it was possible to observe the theoretical knowledge acquired throughout the area of structures, in order to be able to use the appropriate form of the computer software used and the adjustments to avoid limited costs than the software with standard configuration. In a structural project, there is not only one correct methodology, it is up to the qualified professional to observe the most economical and safe solution possible.

Keywords: Structures. Shallow Foundations. Sizing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificações das Fundações	13
Figura 2 – Fundações Superficiais	14
Figura 3 – Fundações Profundas: a) estaca, b) tubulão, c) caixão.....	15
Figura 4 – Etapas na execução de sondagem a percussão	22
Figura 5 – Sapata Isolada	25
Figura 6 – Posicionamento da viga baldrame na Sapata Isolada.....	26
Figura 7 – Sapata Corrida	27
Figura 8 – Sobreposição de Sapatas Isoladas	27
Figura 9 – Sapata Associada com Viga de Rigidez.....	28
Figura 10 – Sapata com Viga Alavancada	29
Figura 11 – Detalhe Construtivo da Sapata.....	30
Figura 12 – Dimensões da Sapata Método CEB-70.....	31
Figura 13 – Verificação do limite da punção.....	32
Figura 14 – Tensões de Compressão Diagonal	33
Figura 15 – Distribuição de Tensões	35
Figura 16 – Reações do solo sob uma sapata rígida	36
Figura 17 – Distribuição de tensões na sapata com carga centrada	36
Figura 18 – Distribuição de tensões na sapata com carga excêntrica.....	38
Figura 19 – Excentricidade em Uma Direção: Força aplicada dentro do núcleo central de inércia.....	39
Figura 20 – Excentricidade em Uma Direção: Força aplicada no limite do núcleo central de inércia	40
Figura 21 – Excentricidade em Uma Direção: Força aplicada fora do núcleo central de inércia.....	41
Figura 22 – Sapata com Excentricidade nas Duas Direções.....	42
Figura 23 – Excentricidade nas Duas Direções: Força aplicada no núcleo central de inércia.....	43
Figura 24 – Excentricidade nas Duas Direções: Força aplicada fora do núcleo central de inércia.....	44
Figura 25 – Tombamento da Sapata	46
Figura 26 – Escorregamento da Sapata.....	47
Figura 27 – Sapata com balanços iguais.....	49

Figura 28 – Sapata com balanços diferentes	50
Figura 29 – Balaço em C da Sapata Isolada	52
Figura 30 – Distância para o cálculo do momento fletor.....	52
Figura 31 – Notações e seções de referência S_{1A} e S_{1B}	53
Figura 32 – Área de Influência e Pressão	54
Figura 33 – Ancoragem da Armadura quando $C > h$	57
Figura 34 – Ancoragem da Armadura quando $C < h$	57
Figura 35 – Disposição das Armaduras na Sapata	59
Figura 36 – Distribuição de A_s quando $B \geq a_p + 2h$	60
Figura 37 – Distribuição de A_s quando $B < a_p + 2h$	60
Figura 38 – Interface do software TQS.....	64
Figura 39 – Área total transversal da sapata (a); Área central da sapata (b)	65
Figura 40 – Interface da Rotina de Cálculo	66
Figura 41 – Modelo Tridimensional da Estrutura	71
Figura 42 – Excentricidade em Uma Direção: Tensões na base da sapata (kN/cm^2)	79
Figura 43 – Excentricidade em Duas Direções: Tensões nos vértices da sapata (kN/cm^2).....	79
Figura 44 – Flexão Normal: Seção de referência S_{1A} e valores das tensões do solo (kN/cm^2).....	81
Figura 45 – Flexão Oblíqua: Tensões na base da sapata (kN/cm^2) e seções de referência S_1	81
Figura 46 – Detalhamento das Armaduras de Flexão da Sapata (cm).....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Etapas do TCC 1.....	19
Tabela 2 – Etapas do TCC 2.....	19
Tabela 3 – Características do Projeto.....	63
Tabela 4 – Rotina de Cálculo: Informações Iniciais	67
Tabela 5 – Rotina de Cálculo: Dados de Entrada.....	68
Tabela 6 – Resultados do TQS: Mapa de Carga	72
Tabela 7 – Resultados do TQS: Dimensionamento e Geometria	73
Tabela 8 – Resultados do TQS: Verificações, Tensões e a Taxa de Aço.....	74
Tabela 9 – Resultados do TQS: Disposição das armaduras	75
Tabela 10 – Resultados pelo CEB-70: Dimensões e Geometria	76
Tabela 11 – Resultados pelo CEB-70: Excentricidade	77
Tabela 12 – Resultados pelo CEB-70: Tensões Atuantes na Base das Sapatas	78
Tabela 13 – Resultados pelo CEB-70: Armadura de Flexão Oblíqua.....	80
Tabela 14 – Resultados pelo CEB-70: Armadura de Flexão Normal.....	80
Tabela 15 – Resultados pelo CEB-70: Compressão Diagonal.....	82
Tabela 16 – Resultados pelo CEB-70: Descrição das Armaduras de Flexão	83
Tabela 17 – Comparativo: Área da Base (m ²)	85
Tabela 18 – Comparativo: Volume de concreto (m ³)	86
Tabela 19 – Comparativo: Peso do Aço (kg)	87
Tabela 20 – Orçamento Básico das Fundações	88
Tabela 21 – Orçamento Básico Comparativo	88

SUMÁRIO

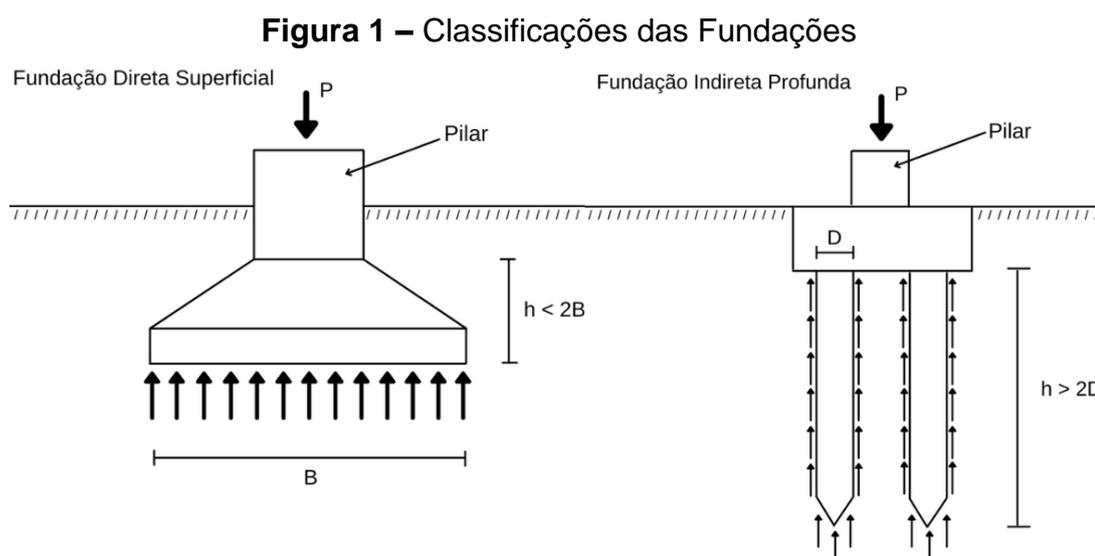
1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	16
3	JUSTIFICATIVA	17
4	METODOLOGIA	18
5	CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	19
6	REFERENCIAL TEÓRICO	20
6.1	INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO.....	20
6.1.1	Número Mínimo de Sondagens	20
6.1.2	Standart Penetration Test (SPT).....	21
6.1.3	Tensão Admissível do Solo	23
6.1.4	Parâmetros para Escolha de Fundações.....	24
6.2	TIPOS DE SAPATAS	25
6.2.1	Sapata Isolada.....	25
6.2.2	Sapata Corrida	26
6.2.3	Sapata Associada	27
6.2.4	Sapata com Viga Alavancada ou de Equilíbrio	28
6.3	SAPATA ISOLADA	29
6.3.1	Detalhes Construtivos.....	29
6.3.2	Classificação em Relação a Rigidez	30
6.3.3	Comportamento Estrutural	32
6.3.4	Distribuição de Tensões no Solo	34
6.3.5	Sapata Rígida com Carga Centrada	36
6.3.6	Sapata Rígida com Carga Excêntrica.....	37
6.3.6.1	Excentricidade em Uma Direção	38
6.3.6.2	Excentricidade em Duas Direções.....	41
6.3.6.3	Verificação da Estabilidade	45
6.4	PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	47
6.4.1	Estimativa das Dimensões.....	48
6.4.2	Dimensionamento da Armadura de Flexão	51

6.4.3	Recomendações para Ancoragem da Armadura de Flexão.....	56
6.4.4	Verificação da Aderência da Armadura de Flexão.....	58
6.4.5	Detalhamento das Armaduras de Flexão.....	58
6.4.6	Verificação do Esforço Cortante	61
6.4.7	Verificação da Tensão de Compressão Diagonal	61
7	ESTUDO DE CASO.....	63
7.1	CARACTERÍSTICAS DO PROJETO	63
7.2	MÉTODO COMPUTACIONAL	64
7.3	MÉTODO CEB-70.....	66
7.4	ANÁLISE E RESULTADOS.....	71
7.4.1	Resultados fornecidos pelo TQS.....	71
7.4.2	Resultados fornecidos pelo CEB-70	75
7.4.3	Comparativo entre metodologias	84
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
	REFERÊNCIAS.....	90
	APÊNDICES	90
	ANEXOS	112

1 INTRODUÇÃO

As fundações são fundamentais e a base mais importante de qualquer edificação, elas são responsáveis por transmitir as cargas de uma construção ao solo. Para isso, o solo deve ter a resistência suficiente para não sofrer ruptura, bem como não apresentar deformações exageradas.

De acordo com Velloso e Lopes (2010), podem ser classificadas conforme a forma de transferência de cargas ao solo em fundações diretas, aquelas em que as cargas da estrutura são transmitidas ao solo através da superfície de contato da base da fundação; e em fundações indiretas, onde as cargas da estrutura ao solo são transferidas pela resistência de ponta (sua base), e por sua superfície lateral (**Figura 1**).



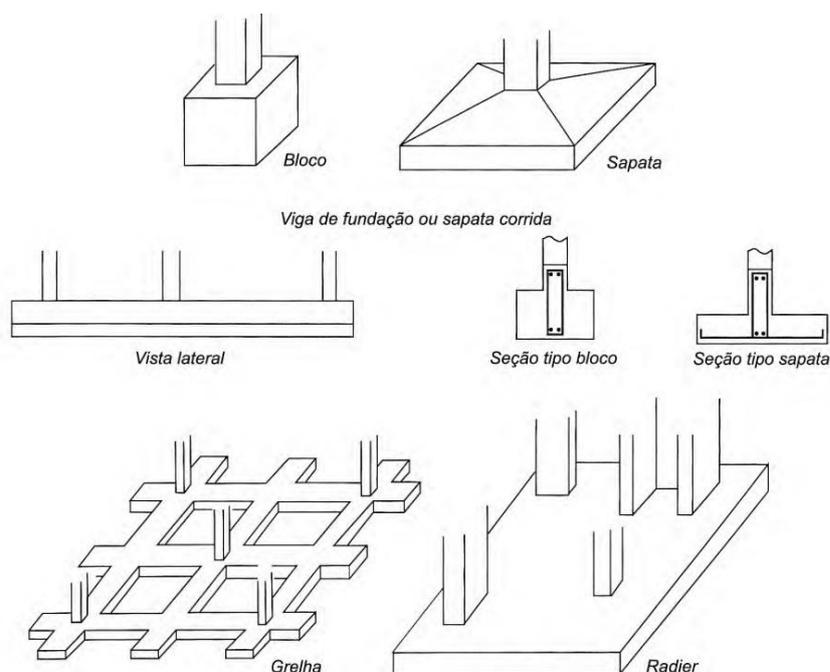
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2021)

Ou são classificadas em relação à profundidade da sua cota de assentamento em fundações superficiais, aquelas em que a profundidade máxima não deverá ser maior que três metros; ou fundações profundas, que por sua vez, as cargas são transmitidas em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão, e no mínimo três metros (**Figura 1**).

Os autores também subdividem esses elementos em relação aos tipos de fundações superficiais (**Figura 2**), que são:

- Blocos: elementos de fundação superficial de concreto simples, dimensionados de maneira que as tensões de tração neles resultantes possam ser resistidas pelo concreto, sem necessidade de armadura;
- Sapatas: elementos de fundação superficial de concreto armado, dimensionados de modo que as tensões de tração, resultantes sejam resistidas por armaduras especialmente disposta para este fim;
- Grelha: elementos de fundação superficial constituídos por um conjunto de vigas que se cruzam nos pilares (não citado na norma NBR 6122/2019);
- Radier: elemento de fundação superficial que se assemelha a uma placa de concreto que abrange todos os pilares da edificação.

Figura 2 – Fundações Superficiais



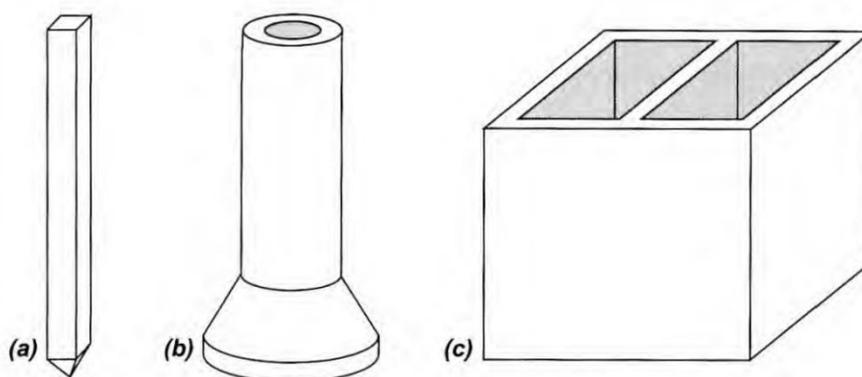
Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Enquanto, as fundações profundas (**Figura 3**), por sua vez, são:

- Estaca: elemento de fundação profunda executada por ferramentas ou equipamentos, execução esta que pode ser por cravação ou escavação, ou ainda, mista;
- Tubulão: elemento de fundação profunda sendo composto por fuste e base, pode ser construído a céu aberto ou sob ar comprimido. Requer a descida de operário ou técnico;

- Caixaão - elemento de fundação profunda de forma prismática, concretado na superfície e instalado por escavação interna (não citado na norma NBR 6122/2019).

Figura 3 – Fundações Profundas: a) estaca, b) tubulão, c) caixaão.



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Esses elementos são a primeira etapa de serviço em qualquer obra, tornando-se necessário antes da fase de planejamento do projeto verificar qual a resistência do solo e suas propriedades físicas através de ensaios realizados previamente, para assim garantir que no seu dimensionamento a infraestrutura não atinja o seu Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS), evitando problemas futuros na superestrutura, e conseqüentemente em toda a edificação.

E um dos aspectos que é possível realizar para evitar essa situação é a elaboração de um projeto executivo confiável. Ao longo dos anos a evolução tecnológica vem revolucionando cada vez mais a engenharia, gerando novos procedimentos de cálculos. Auxiliando assim, os projetos estruturais que atualmente são realizados com agilidade e otimização de tempo com a ajuda de programas computacionais e planilhas eletrônicas sofisticadas para seu dimensionamento.

O trabalho em questão terá como intuito o dimensionamento estrutural de uma fundação superficial com sapatas isoladas, e verificar a metodologia mais econômica para este projeto. Utilizando as seguintes normas para os procedimentos:

- NBR 6118/2014 – Projeto de Estruturas de Concreto Armado;
- NBR 6122/2019 – Projeto e Execução de Fundações;
- Comitê Europeu de Concreto (CEB-70).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desse Trabalho de Conclusão de Curso é dimensionar sapatas isoladas rígidas com cargas excêntricas para um estudo de caso de um sobrado localizado na região metropolitana de Natal/RN. Fazendo uma análise comparativa para verificar o impacto estrutural e financeiro entre metodologias a nível educacional, utilizando o software computacional TQS e uma rotina de cálculo com o procedimento normativo definido pelo Comitê Europeu de Concreto (CEB-70) para o dimensionamento, e posteriormente com o auxílio do software SEOBRA a elaboração de um orçamento preliminar de fundação.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- I. Modelar a superestrutura e infraestrutura da edificação no TQS;
- II. Realizar o levantamento e lançamento de cargas;
- III. Realizar o dimensionamento utilizando o software;
- IV. Com o mapa de cargas fornecido pelo software, dimensionar as sapatas utilizando uma rotina de cálculo criada no Excel com base no método CEB-70;
- V. Verificar os resultados obtidos entres as metodologias e fazer um comparativo a nível educacional.
- VI. Elaboração de um orçamento preliminar das fundações com a utilização do SEOBRA para observar a metodologia mais econômico nesse trabalho.

3 JUSTIFICATIVA

Existe uma grande deficiência nos profissionais recém formados em questão de dimensionamento de estruturas. A falta de conhecimento sobre determinado assunto, acarreta erros que envolvem o conhecimento do solo para definição da fundação necessária, e conseqüentemente todo o desenvolvimento e estimativa de parâmetros de projeto.

Segundo Lima (2015, p. 20):

Há uma grande despreocupação e conforto por partes dos engenheiros (sendo eles calculistas ou não), principalmente dos recém-formados, em deixar para segundo plano toda a teoria adquirida na universidade e que é indispensável para o entendimento do comportamento de uma estrutura bem como suas formas de calcular e interpretar resultados [...].

Seja por falta de oportunidade prática na matriz curricular, fornecida ao longo do curso, ou por falta de interesse do estudante, esses futuros profissionais entram no mercado de trabalho despreparados ou sem confiança sobre a melhor maneira para o dimensionamento da infraestrutura.

Visando uma melhor experiência com este assunto, o trabalho a ser desenvolvido constitui-se numa análise comparativa entre métodos de dimensionamentos para verificar questões como o superdimensionamento da fundação e seu impacto financeiro.

Logo, no decorrer do trabalho serão abordadas as informações do projeto, assim como todos os cálculos necessários da fundação adotada.

4 METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o assunto abordado, realizando uma abrangente pesquisa em artigos, monografias, livros e Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC), como também, um estudo prévio da NBR 6118/2014, NBR 6122/2019 e CEB-70, necessárias para o dimensionamento das fundações.

Esse trabalho acadêmico pode ser caracterizado como qualitativo e quantitativo, pois será realizado o dimensionamento de sapatas isoladas, tanto por meio do software como por uma planilha inteligente criada pela autora. E será feita a comparação entre os métodos, verificando os critérios normativos e econômicos.

Inicialmente, já teremos a tensão admissível do solo garantindo uma boa capacidade de carga a infraestrutura, de acordo com NBR 6122/2019. Posteriormente será realizado a modelagem da estrutura, dimensionamento e o detalhamento das armaduras com o auxílio do software TQS.

Com base no mapa de cargas fornecido pelo software TQS será possível criar uma rotina de cálculo em uma planilha no Excel com base no método CEB-70, e dimensionar a fundação em sapata isolada rígida com carga excêntrica.

Com os resultados obtidos será possível fazer um comparativo verificando cada metodologia aplicada, no quesito estrutural e financeiro, com a estimativas de custos das fundações com auxílio do software SEOBRA, uma plataforma online que possui diversas tabelas integradas que auxilia na elaboração de orçamentos.

5 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Tabela 1 – Etapas do TCC 1

ETAPAS DO TCC I	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
1. Escolha do tema	■				
2. Construção do cronograma de atividades do trabalho		■			
3. Introdução, justificativa, objetivos e metodologia		■	■		
4. Revisão (reformulação, se necessário)			■		
5. Entrega do TCC I (parcial) para a Banca Examinadora para a avaliação da U1			■		
6. Apresentação do TCC I (parcial) para a Banca Examinadora para a avaliação da U1			■		
7. Construção dos referências teóricos (bibliografia, normas técnicas, etc)			■	■	■
8. Revisão (reformulação, se necessário)				■	
9. Entrega do TCC I (parcial) para a Banca Examinadora para a avaliação da U2					■
10. Apresentação do TCC I (parcial) para Banca Examinadora para a avaliação da U2					■

Fonte: AUTORIA PROPRIA (2021)

Tabela 2 – Etapas do TCC 2

ETAPAS DO TCC II	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO
11. Estudo de caso	■	■	■	■	■	■
11.1. Modelagem, levantamento de cargas e dimensionamento no software	■	■	■			
11.2 Elaboração da planilha no excel e dimensionamento		■	■	■		
12. Análise dos resultados obtidos			■	■		
13. Considerações finais				■		
14. Revisão da formatação do trabalho				■		
15. Entrega do TCC II (parcial) para a Banca Examinadora para a avaliação da U1					■	
16. Apresentação do TCC II (parcial) para a Banca Examinadora para a avaliação da U1					■	
17. Revisão (reformulação, se necessário)					■	■
18. Entrega do TCC II (final) para Banca Examinadora para a avaliação da U2						■
19. Apresentação do TCC II (final) para a Banca Examinadora para a avaliação da U2						■

Fonte: AUTORIA PROPRIA (2021)

6 REFERENCIAL TEÓRICO

6.1 INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO

O solo possui a capacidade de suportar todas as cargas de uma edificação e, por isso, é significativo conhecer seu perfil geotécnico. A investigação no solo deve ser a primeira etapa do processo construtivo, pois seus resultados podem definir quanto a viabilidade da obra.

A identificação e caracterização do seu comportamento são relevantes para evitar manifestações patológicas relacionadas à infraestrutura. De acordo com Rebello (2008) é possível identificar e determinar a existência de água, matacões e vazios que possam influenciar no processo construtivo. A localização desses elementos contribui para o correto dimensionamento proporcionando assim conforto e estabilidade para toda a edificação.

Independente do porte da construção, a exploração do subsolo será necessária, e deverá ser feita por profissionais habilitados cumprindo as exigências das normas técnicas. Quando não é realizada, suas consequências podem ser graves, podendo gerar o colapso da edificação.

Em resumo, as vantagens das investigações geotécnicas são:

- Identificar as características do solo
- Preservar o lençol freático;
- Evitar manifestações patológicas relacionadas à infraestrutura;
- Reduzir riscos de acidentes;
- Otimizar custos da obra.

6.1.1 Número Mínimo de Sondagens

Cada projeto possui suas peculiaridades, e para que as sondagens sejam executadas de forma que atenda suas características é preciso atender as normas técnicas. A NBR 8036/1983 é a responsável pelas condições da programação da sondagem de simples reconhecimento do solo destinada a elaboração de projetos geotécnicos de construção de edifícios. A norma contém a localização, número mínimo de sondagem e sua profundidade.

Sobre o número mínimo de sondagem e sua localização a norma informa que vai depender do tipo de estrutura e das condições geotécnicas do solo. Porém, devem apresentar o quadro com a melhor variação das camadas do subsolo para estudo.

A NBR 8036 (1983, item 4.1.1.2.) estabelece:

As sondagens devem ser, no mínimo, de uma para cada 200m² de área da projeção em planta do edifício, até 1.200m² de área. Entre 1.200m² e 2.400m² deve-se fazer uma sondagem para cada 400m² que excederem 1.200m². Acima de 2.400m² o número de sondagens deve ser fixado de acordo com o plano particular da construção. Em quaisquer circunstâncias o número mínimo de sondagens deve ser:

- dois para área da projeção em planta do edifício até 200m²;
- três para área entre 200m² e 400m².

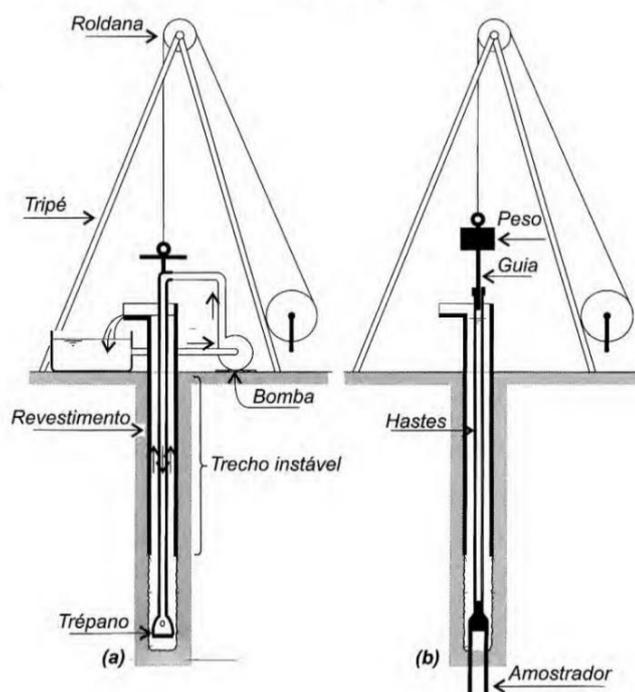
6.1.2 Standart Penetration Test (SPT)

A sondagem Standart Penetration Test (SPT) é conhecida como sondagem à percussão ou sondagem de simples reconhecimento. Segundo Rebello (2008), é o método de exploração e reconhecimento do subsolo mais executado no Brasil, o qual fornece informações que servirão de base para a construção de uma edificação.

De acordo com Velloso e Lopes (2010) as sondagens à percussão são capazes de ultrapassar o nível d'água e penetrar solos relativamente compactos, entretanto, não possuem aptidão para perfurar matacões e blocos de rocha (e são detidas as vezes por pedregulhos), quando ocorre grande dificuldade de perfuração, a sondagem é suspensa em conformidade com a norma.

O ensaio é normalizado pela NBR 6484/2020, e consiste na realização da perfuração a cada metro medindo a resistência do solo ao longo da profundidade, até encontrar solo firme ou rocha, impossibilitando a cravação do amostrador. Na **Figura 4** é possível visualizar o processo de execução da sondagem a percussão.

Figura 4 – Etapas na execução de sondagem a percussão



Fonte: Veloso e Lopes (2010)

Os seus procedimentos devem ser realizados da seguinte maneira:

- I. Inicia-se o furo no solo com profundidade de um metro, com o auxílio de uma escavadeira ou do trado concha;
- II. Após a abertura do furo, o amostrador tem sua ponta apoiada no fundo do furo;
- III. O peso é lançado sobre o amostrador e conta-se a quantidade de golpes necessários para cravá-lo a uma profundidade total de 45 cm, contando-se o número de golpes para cada 15 cm;
- IV. Contabilizando o número de golpes dos últimos 30 cm de cada metro perfurado (esse valor recebe o nome SPT);
- V. A cada metro perfurado são recolhidas amostras do solo retido dentro do amostrador, permitindo análise tátil e visual das distintas camadas do subsolo;
- VI. Em seguida, a amostra é verificada em laboratório e será possível descobrir suas características e propriedades.

Algumas das principais informações obtidas deste tipo de sondagem, de acordo com os autores citados anteriormente, são:

- Classificação tátil visual dos solos em cada camada;

- Resistência, consistência, capacidade e a coesão do solo;
- Identificação das camadas de solo que compõem o subsolo;
- Existência ou inexistência de lençol freático.

6.1.3 Tensão Admissível do Solo

Segundo a NBR 6122/2019 (item 3.45) a tensão admissível do solo é a “máxima tensão que, aplicada ao terreno pela fundação rasa ou pela base de tubulão, atende, com fatores de segurança predeterminados, aos estados limites últimos (ruptura) e de serviço (recalques, vibrações etc.)”.

A norma também ressalta no item 7.3 que é possível considerar a tensão admissível através de três métodos distintos: métodos teóricos; semiempíricos e ensaio de prova de carga sobre placa. Sendo o método semiempírico obtido a partir dos resultados de ensaio de sondagem, como SPT (ensaio de penetração padronizado) ou CPT (ensaio de penetração do cone).

De acordo com Rebello (2008) existem muitas maneiras de relacionar os resultados obtidos na sondagem à percussão, a maneira mais rápida e genérica seria a partir da expressão 1, pois ela é útil para as primeiras impressões da resistência do solo, apesar de não levar em consideração o tipo de solo.

$$\sigma_{adm} = \sqrt{N} - 1 \quad 1$$

Onde:

- σ_{adm} – Tensão admissível em kgf/cm²
- N – Número do SPT

Existem outras formulações que levam em consideração o tipo de solo e se tornam mais precisas, como:

- Argila pura:

$$\sigma_{adm} = \frac{N}{4} \quad 2$$

- Argila siltosa:

$$\sigma_{\text{adm}} = \frac{N}{5} \quad \mathbf{3}$$

- Argila areno siltosa:

$$\sigma_{\text{adm}} = \frac{N}{7,5} \quad \mathbf{4}$$

Posteriormente será apresentado o valor da tensão admissível do solo que irá auxiliar nos cálculos do dimensionamento.

6.1.4 Parâmetros para Escolha de Fundações

Conforme Alonso (2019) a escolha do tipo de fundação deve ser feita após constatar que ela satisfaz as condições técnicas e econômicas da obra com apreço, dependendo de vários fatores que afetam a edificação direta e indiretamente.

Entretanto, Araújo (2014) indica que o tipo adequado da fundação envolve estudos relativos às características do solo, tais como sua deformabilidade e resistência. Além da compatibilidade com as características da superestrutura, como suas cargas atuantes.

Cabe ao profissional responsável pela obra conhecer as características do solo, saber quais serão os esforços sobre a edificação, o tamanho da construção, a presença de vizinhos, e assim como os fatores econômicos.

De um modo geral, uma boa fundação deve satisfazer os seguintes requisitos:

- Tipos de cargas a serem transmitidas ao solo;
- Capacidade de carga do solo;
- Altura do nível de lençol freático;
- Custo da fundação;
- Proximidade dos edifícios limítrofes bem como seu tipo de fundação e estado;
- Estudo dos recalques.

6.2 TIPOS DE SAPATAS

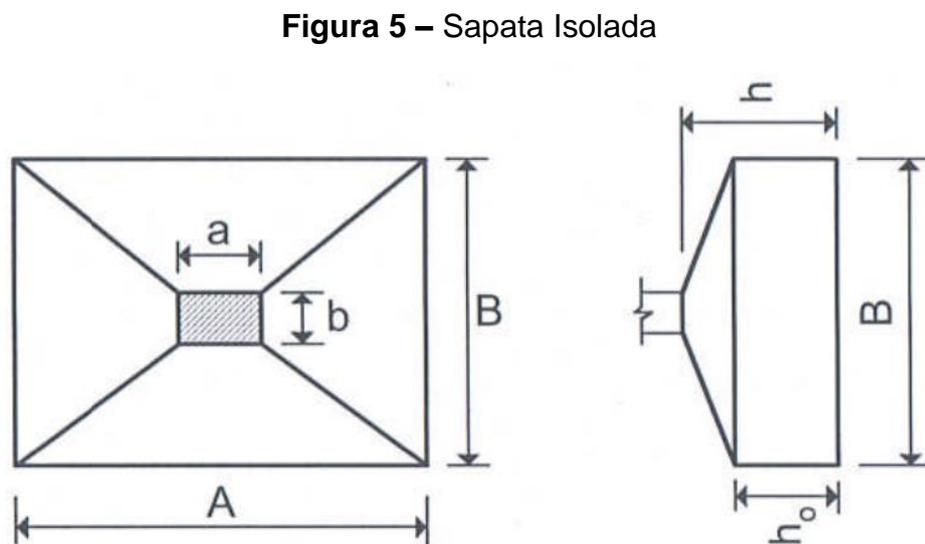
De acordo com a NBR 6122/2019 as sapatas são fundações rasas dimensionadas de modo em que as tensões de tração resultantes sejam resistidas pelas armaduras.

Todavia a NBR 6118/2014 (item 22.6.1), defini as sapatas como estruturas de volume usadas para transmitir ao terreno as cargas de fundação, no caso de fundação direta.

Em concordância com Carvalho e Pinheiro (2009), a execução das sapatas é mais rápida, já que por sua vez, não é necessário o uso de equipamentos específicos e de transporte. São indicadas principalmente quando o terreno é homogêneo para evitar recalques diferenciais importantes. Existem diversos tipos de sapatas, como isolada, corrida, associada, de divisa, com viga de equilíbrio etc., e a sua forma depende, em princípio, da forma do pilar que se apoia sobre ela.

6.2.1 Sapata Isolada

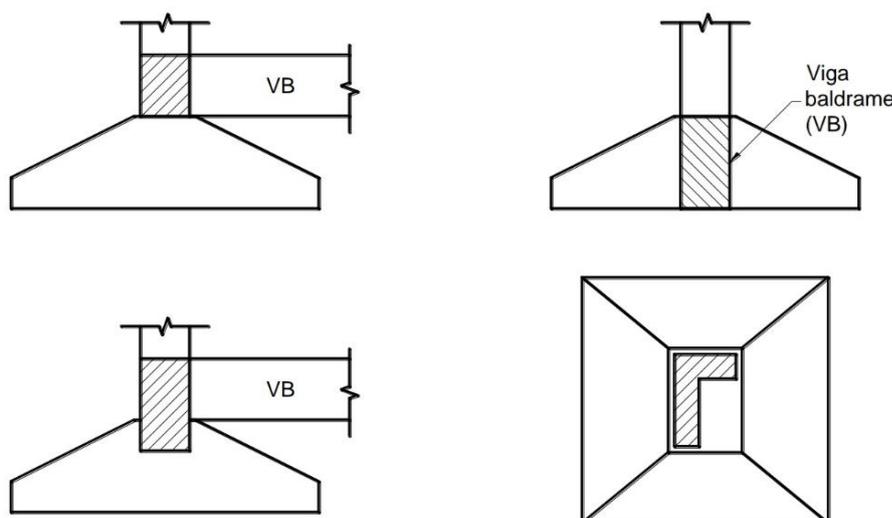
A sapata isolada (**Figura 5**) é um elemento estrutural, segundo Araújo (2014), que suportam um único pilar, pode apresentar diversos formatos, como quadradas, retangulares ou circulares, a escolha da forma pode estar relacionada às dimensões do pilar ou a questões construtivas.



Fonte: Araújo (2014)

Como ficam isoladas, essas sapatas podem ser amarradas a outras através de vigas baldrame. Esses elementos recebem as cargas das alvenarias e as transmitem para as fundações, porém não auxiliam na distribuição do carregamento ao solo, seu posicionamento pode variar de acordo com o caso conforme indica a **Figura 6**.

Figura 6 – Posicionamento da viga baldrame na Sapata Isolada



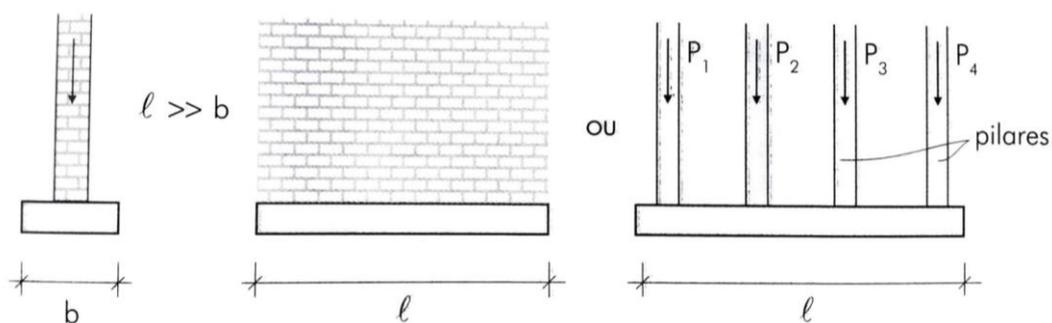
Fonte: Bastos (2019)

Conforme Bastos (2019), para o dimensionamento econômico os balanços da sapata nas duas direções devem ser iguais ou aproximadamente iguais. Existe uma recomendação prática, onde $A \leq 2,5B$.

6.2.2 Sapata Corrida

Conforme a NBR 6122/2019 (item 3.40) a sapata corrida está “sujeita à ação de uma carga distribuída linearmente ou de pilares ao longo de um mesmo alinhamento”.

Em geral, a sapata corrida (**Figura 7**) é um elemento estrutural de concreto armado utilizado para suportar as cargas dos elementos contínuos, como é o caso das paredes, muros e demais estruturas alongadas, e distribuí-los linearmente ao solo. Sua escavação normalmente é realizada de maneira manual, sem a necessidade de equipamentos especiais.

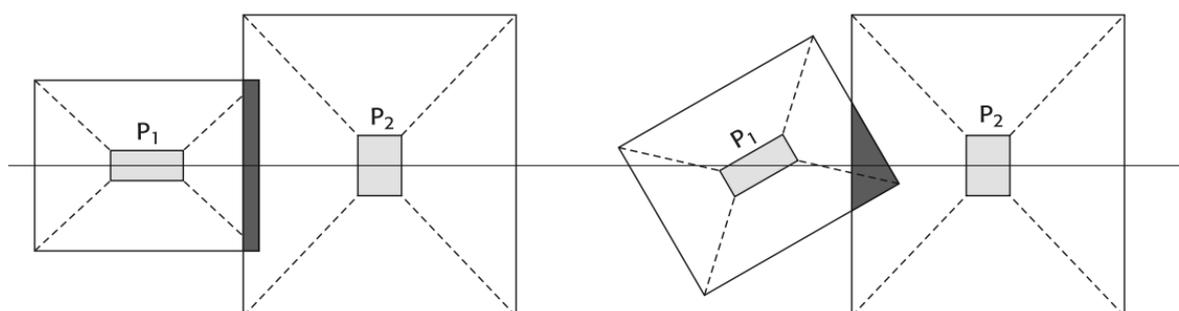
Figura 7 – Sapata Corrida

Fonte: Rebello (2008)

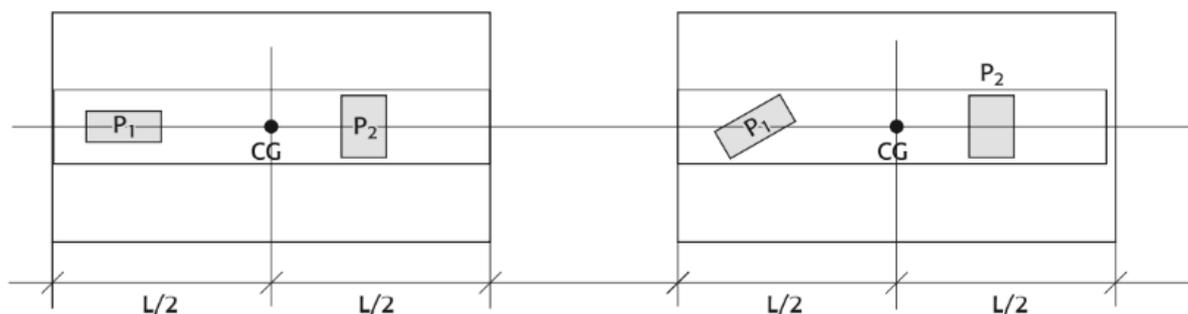
6.2.3 Sapata Associada

Conforme a NBR 6122:2019 (item 3.39), a sapata associada (**Figura 9**) é aquela “comum a mais de um pilar; a denominação se aplica também a sapata comum a mais do que dois pilares, quando não alinhados”.

Ela nada mais é do que uma sapata formada por associação, ou seja, um conjunto de duas sapatas. Geralmente ocorre quando a distância entre dois pilares é pequena, e conseqüentemente a distância entre duas sapatas isoladas também é (**Figura 8**), logo é comum que haja uma associação destas sapatas, uma união para que se tornem uma (**Figura 9**). A viga projetada para unir os pilares é denominada viga de rigidez (VR), sua função é distribuir as cargas verticais para a sapata e esta para o solo.

Figura 8 – Sobreposição de Sapatas Isoladas

Fonte: De Campos (2015)

Figura 9 – Sapata Associada com Viga de Rigidez

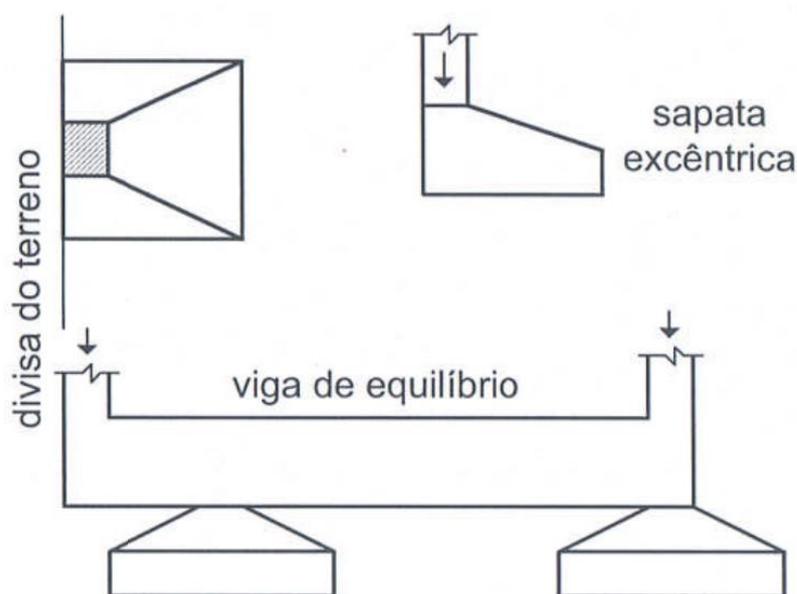
Fonte: De Campos (2015)

6.2.4 Sapata com Viga Alavancada ou de Equilíbrio

Conforme a NBR 6122:2019 (item 3.52), viga alavanca (**Figura 10**) é o “elemento estrutural que recebe as cargas de um ou dois pilares (ou pontos de carga) e é dimensionado de modo a transmiti-las centradas às fundações”.

Conforme Rebello (2008) quando a carga do pilar se encontra desalinhada com o eixo do elemento estrutural, surge uma grande excentricidade provocando uma distribuição não uniforme de tensões no solo, gerando a ocorrência do momento fletor. Como solução, é necessário aumentar a rigidez da sapata garantindo a distribuição de tensões em toda a área da sapata, aumentando sua espessura e consequentemente seu volume de concreto.

Como alternativa, para menores custos, é utilizado uma viga de transição (**Figura 10**), onde a excentricidade do pilar é transmitida através da viga alavancada para uma fundação próxima (deixando de ser excêntrica), aliviando o apoio do lado oposto ao do balanço.

Figura 10 – Sapata com Viga Alavancada

Fonte: Araújo (2014)

6.3 SAPATA ISOLADA

6.3.1 Detalhes Construtivos

Para um adequado dimensionamento estrutural é necessário entender os processos construtivos relacionados as sapatas de fundação.

A NBR 6122/2019 determina que as sapatas isoladas possuam dimensões mínimas de 60 cm e devem ser concretadas sobre um lastro de concreto não estrutural com no mínimo 5 cm de espessura (**Figura 11**).

Bastos (2019) instrui que a superfície de topo da sapata deve ter um plano horizontal (mesa) maior que a seção transversal do pilar, em pelo menos 2,5 ou 3 cm, o que facilita a montagem e apoio da fôrma do pilar (**Figura 11**). O autor também sugere a altura h_0 (eq. 5) para evitar a possível ruptura nos lados da sapata.

Conforme Carvalho e Pinheiro (2009), o ângulo α (eq. 6) influencia na definição da rigidez da sapata e está interligado com o consumo de concreto que será utilizado na sua superfície trapezoidal. Com isso, o ângulo do talude natural deve estar em torno de 30° , facilitando a concretagem uma vez que, não haverá deslizamento do concreto as fôrmas serão utilizadas apenas nas laterais para altura h_0 .

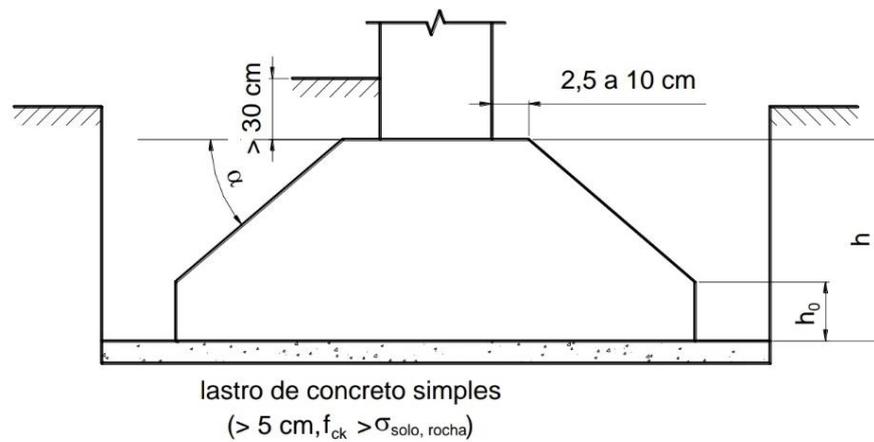
$$h_0 \geq \begin{cases} \frac{h}{3} \\ 15\text{cm} \end{cases} \quad 5$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{h - h_0}{C} \quad 6$$

Onde:

- C – Distância em planta da face do pilar à extremidade da sapata

Figura 11 – Detalhe Construtivo da Sapata



Fonte: Bastos (2019)

6.3.2 Classificação em Relação a Rigidez

De acordo com a NBR 6118/2014 (item 22.6.1), as sapatas são classificadas como rígidas ou flexíveis. A equação 7 deve ser atendida em ambas as direções para ser considerada com sapata rígida.

$$\text{se, } h > \frac{A - a_p}{3} \rightarrow \text{Sapata Rígida} \quad 7$$

$$\text{se, } h \leq \frac{A - a_p}{3} \rightarrow \text{Sapata Flexível} \quad 8$$

Onde:

- A – Dimensão da sapata na direção analisada;

- a_p – Dimensão do pilar na direção analisada;
- h – Altura da sapata.

Por sua vez, o método CEB-70 possui uma alternativa diferente considerada no projeto de sapatas, verificando a rigidez da sapata de acordo com o ângulo β (**Figura 12**), conforme o limite apresentado a seguir:

$$0,5 \leq \operatorname{tg}\beta \leq 1,5 \quad \rightarrow \quad 26,6^\circ \leq \operatorname{tg}\beta \leq 56,3^\circ$$

9

Onde:

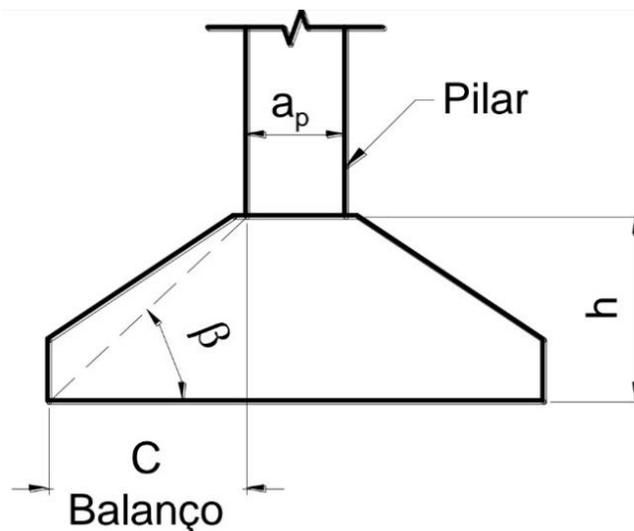
- $\operatorname{tg}\beta = \frac{h}{c}$

Tem-se ainda, que:

$\operatorname{tg}\beta < 0,5 \rightarrow$ Sapata flexível

$\operatorname{tg}\beta > 1,5 \rightarrow$ Bloco de fundação

Figura 12 – Dimensões da Sapata Método CEB-70



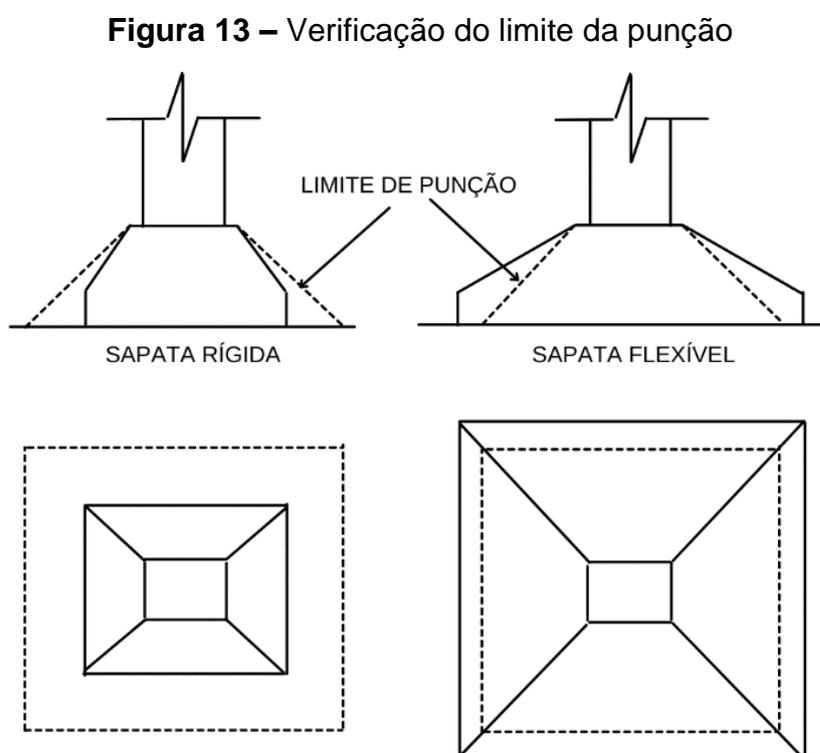
Fonte: Bastos (2019)

6.3.3 Comportamento Estrutural

Segundo a NBR 6118/2014 (item 22.6.2.3) o comportamento estrutural da sapata flexível se caracteriza por: trabalho à flexão nas duas direções, não sendo possível admitir tração na flexão uniformemente distribuído na largura correspondente da sapata. Enquanto o trabalho ao cisalhamento pode ser descrito pelo fenômeno de punção.

A ruptura por tração diagonal ocorre quando o cone hipotético da punção se encontra no contorno crítico C', onde sua ruptura ocorre de forma brusca e o pilar "perfura a sapata". Esse fenômeno acontece especificamente nas sapatas flexíveis, pois devido às suas dimensões, não há possibilidade física da sapata rígida sofrer punção (**Figura 13**).

A verificação das sapatas à punção se faz conforme o item 19.5 da NBR 6118/2014, devido esse trabalho não apresentar sapatas flexíveis, não será apresentado o passo a passo dessa verificação.



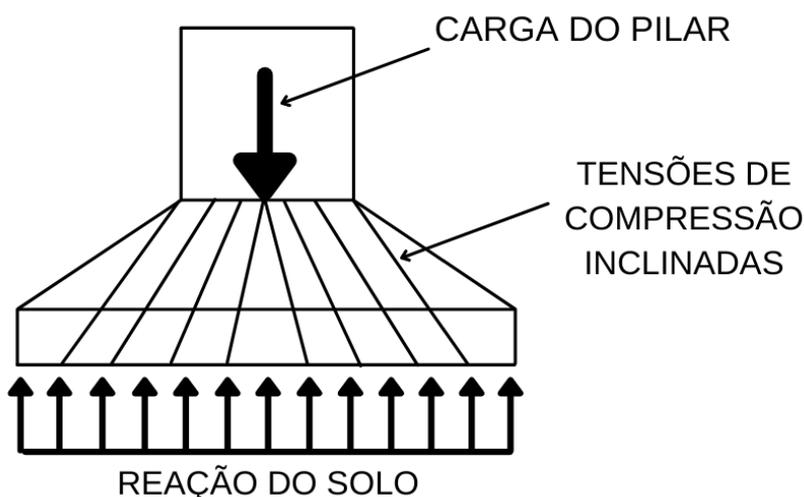
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Enquanto na sapata rígida, de acordo com a NBR 6118/2014 (item 22.6.2.2) seu comportamento se caracteriza por trabalho à flexão nas duas direções, admitindo-

se que ocorre uma distribuição de tração na flexão uniforme para cada largura correspondente da sapata. E o trabalho ao cisalhamento também em duas direções, não apresentando ruptura por tração diagonal e sim por compressão diagonal.

A ruptura por compressão diagonal ocorre quando a carga do pilar reage com a carga da sapata e com isso ocorre a distribuição de compressão inclinada na seção do concreto (**Figura 14**), se a carga do pilar for muito grande ocorre o esmagamento do concreto.

Figura 14 – Tensões de Compressão Diagonal



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Conforme Bastos (2019), nos projetos usuais existe uma preferência por sapatas rígidas por serem menos deformáveis, menos sujeitas a ruptura por punção e mais seguras.

Todavia, de acordo com NBR 6118/2014 (item 22.6.2.3) as sapatas flexíveis “embora de uso mais raro, essas sapatas são utilizadas para fundação de cargas pequenas e solos relativamente fracos”.

Entretanto, Araújo (2014) relata que as sapatas rígidas possuem a vantagem do menor consumo de aço, o emprego de concreto de menor resistência, e a economia em solos de melhor qualidade por ser mais pesada. Enquanto as flexíveis, possuem um menor consumo de concreto, e são mais adequadas em solos de menor capacidade de carga por serem mais leves, porém possuem um maior consumo de armadura.

6.3.4 Distribuição de Tensões no Solo

A tensão ou pressão de apoio que a área da base de uma sapata exerce no solo é o fator mais importante relativo à interação solo-estrutura. O conhecimento de sua distribuição é considerável, para verificar as tensões no solo, e o dimensionamento da própria sapata.

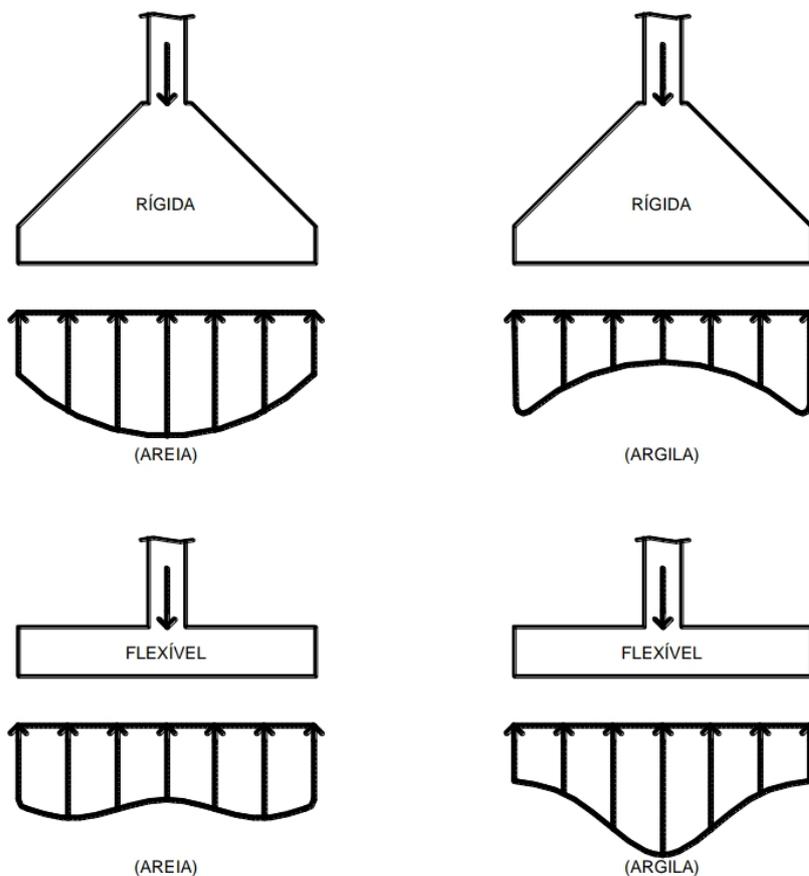
Segundo Velloso e Lopes (2010), as pressões de contato dependem principalmente:

- Da intensidade das cargas aplicadas;
- Da rigidez relativa fundação-solo;
- Das propriedades do solo;

Conforme Rebello (2008) a real distribuição de tensões propaga-se por alguns metros de profundidade, além do nível abaixo da sapata, seja a sapata rígida ou flexível e o solo granular ou coesivo (**Figura 15**). Por essa análise de comportamento ser complexa, é considerado uso da teoria elasticidade ou de elementos finitos via cálculo computacional.

Santos (1984) relata que “admite-se que o comportamento do solo seja elástico e que a estabilidade seja assegurada unicamente pelas forças elásticas que ele transmite a sapata através da superfície de apoio”. A elasticidade do solo representa a sua capacidade de readquirir um estado mais próximo possível do original após cessada a compressão do solo.

Figura 15 – Distribuição de Tensões

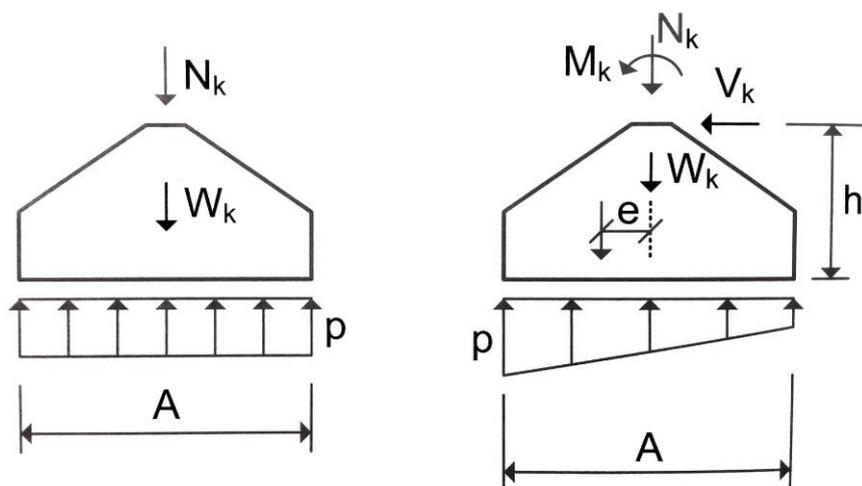


Fonte: Bastos (2019)

De acordo com a NBR 6118/2014 (item 22.6.1): “Para a sapata rígida pode-se admitir plana a distribuição de tensões normais no contato sapata-terreno, caso não se disponha de informações mais detalhadas a respeito”. Contudo, para as sapatas flexíveis ou fundações sob rochas (flexíveis ou rígidas) a hipótese deve ser revista.

Entretanto Araújo (2014, p. 264), informa que “se a sapata for rígida, as pressões no solo serão consideradas uniformes ou com variação linear, conforme a carga seja centrada ou excêntrica”. Na representação a esquerda da **Figura 16** é possível verificar a distribuição linear de cargas da sapata centrada, enquanto a direita é possível visualizar o da sapata com carga excêntrica.

Figura 16 – Reações do solo sob uma sapata rígida

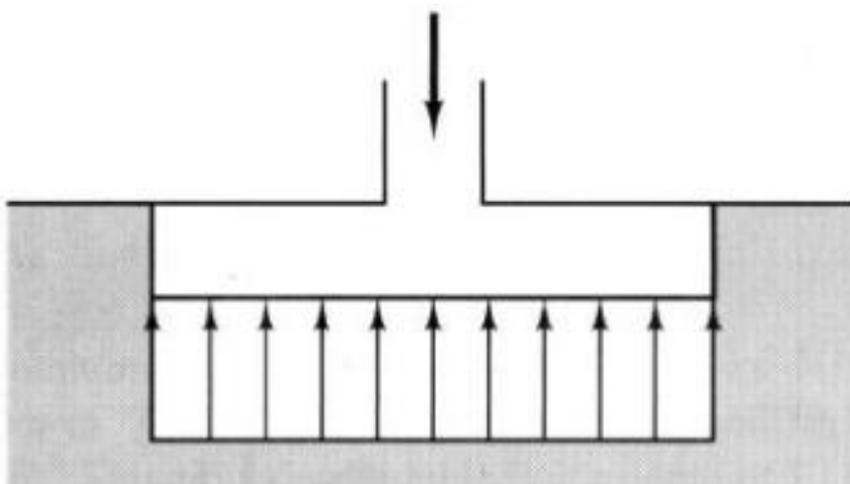


Fonte: Araújo (2010)

6.3.5 Sapata Rígida com Carga Centrada

A ação vertical que chega no pilar é transmitida a sapata pelo centro de gravidade (CG), e logo ocorre uma distribuição uniforme e constante de tensões de compressão na base da sapata (**Figura 17**).

Figura 17 – Distribuição de tensões na sapata com carga centrada



Fonte: Bastos (2019)

As tensões que são aplicadas no solo pela fundação, conhecidas por tensões de ruptura, conforme a NBR 6122/2019 (item 3.46) provocam “perda do equilíbrio

estático ou deslocamentos que comprometem sua segurança ou desempenho; corresponde à tensão resistente última (geotécnica) da fundação”.

Conforme Rebello (2008, p. 42) “as dimensões da sapata isolada são determinadas pelas cargas aplicadas e pela resistência do solo, de forma que as tensões no solo sejam no máximo iguais a sua tensão admissível”.

Isto é, a expressão **10** deve ser atendida, para que a área da fundação seja capaz de resistir e dissipar as tensões provocadas pela estrutura.

$$\sigma_s = \frac{P}{A \times B} \leq \sigma_{adm} \quad \mathbf{10}$$

Onde:

- P – Carga do Pilar;

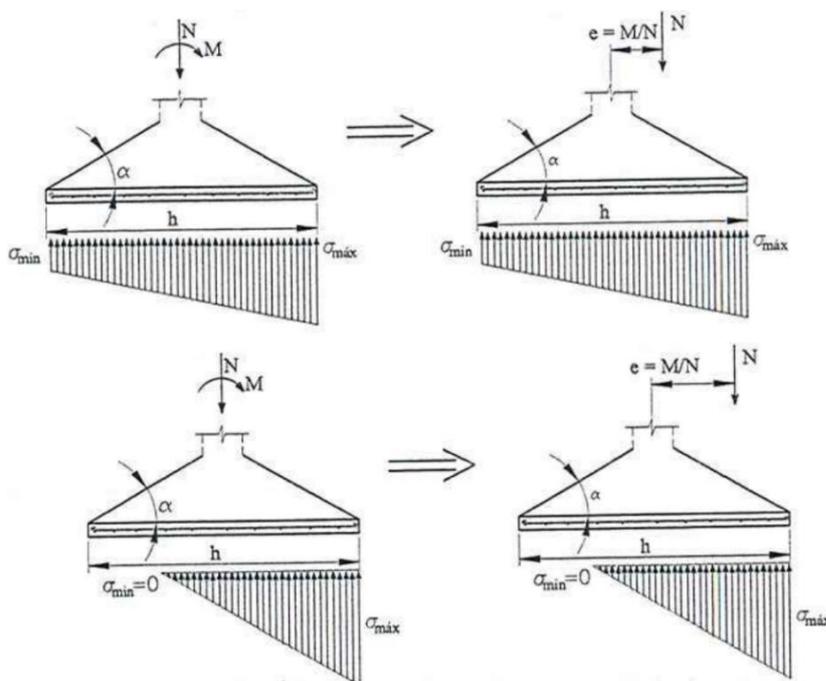
6.3.6 Sapata Rígida com Carga Excêntrica

As excentricidades nas sapatas podem ser causadas pela sua geometria (limitação do espaço no terreno, como é o caso das sapatas de divisa), ou por sua carga quando o ponto de aplicação da força vertical do pilar se encontra fora do centro de gravidade da base da sapata.

Conforme Borges (2015), em decorrência da excentricidade, a depender do valor da carga aplicada, ocorre um momento perigoso para a estabilidade da sapata, onde há uma tendência a rotação da base, possibilitando o levantamento da extremidade oposta. Com isso, tem-se a necessidade de equilibrar a rotação, aplicando um momento contrário que anule o momento causado pela carga vertical do pilar

Essas excentricidades, resultam da disposição de tensões no solo não uniformes sob a base da sapata, porém para efeitos práticos as tensões possuem distribuição como mostra a seguir (**Figura 18**).

Figura 18 – Distribuição de tensões na sapata com carga excêntrica



Fonte: Carvalho e Pinheiro (2009)

A NBR 6122/2019 instrui que elementos de fundação solicitados com carga excêntrica, são aqueles que geram momentos na sua fundação. Outra condição é que a compressão exercida na base da fundação junto ao solo seja de até 2/3 da área total da base da sapata, já que, elementos de fundação rasas não suportam tração.

O núcleo central de inércia é a região a partir da qual é possível verificar se a excentricidade da carga aplicada irá gerar somente tensões de compressão, ou se irá gerar também tensões de tração na base da sapata. Existem três diferentes casos para serem analisados, quando a carga está aplicada dentro no núcleo, no limite ou fora dele.

6.3.6.1 Excentricidade em Uma Direção

Sendo a excentricidade em um eixo, o elemento de fundação estará submetido a solicitação de flexão normal composta. Para cada situação da excentricidade, existe diferentes modos de determinar as tensões na base da sapata.

a) Força aplicada dentro do núcleo central de inércia $\left(e < \frac{A}{6}\right)$

Quando a força é aplicada dentro do núcleo central de inércia (**Figura 19**), significa que a base da sapata apresentará apenas tensões de compressão, conforme as equações **11** e **12**.

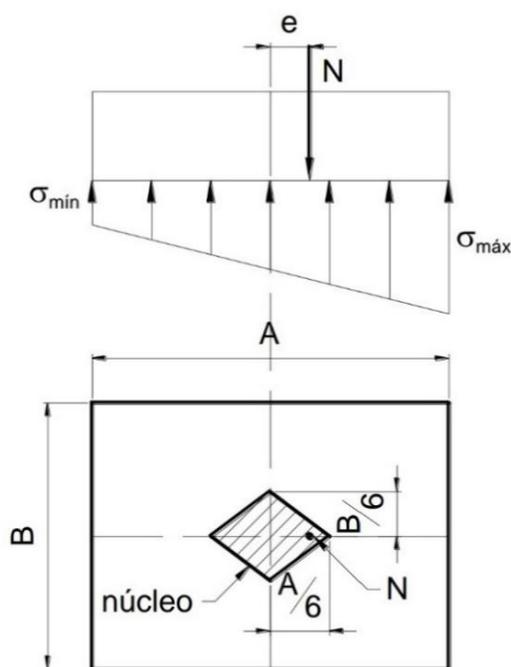
$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{N}{A \times B} \left(1 + \frac{6e}{A}\right) \quad \mathbf{11}$$

$$\sigma_{\text{mín}} = \frac{N}{A \times B} \left(1 - \frac{6e}{A}\right) \quad \mathbf{12}$$

Onde:

- N – Carga Vertical;
- M – Momento Fletor;
- e – Excentricidade;
- I – Momento de Inércia;
- A e B – Dimensões da sapata.

Figura 19 – Excentricidade em Uma Direção: Força aplicada dentro do núcleo central de inércia



Fonte: Bastos (2019)

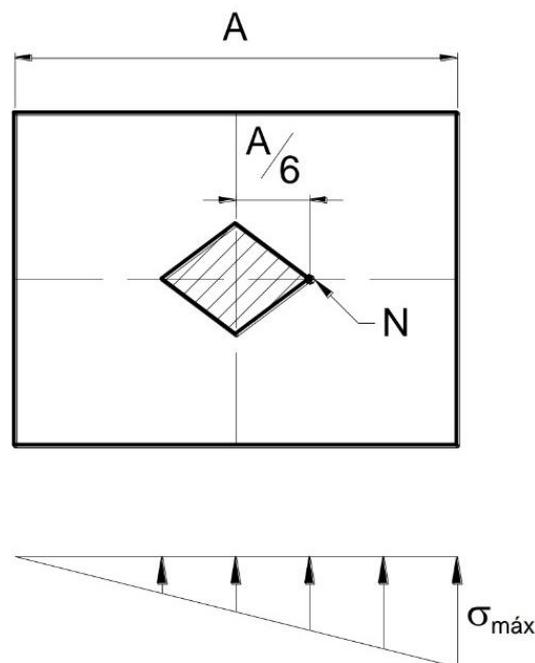
b) Força aplicada no limite do núcleo central de inércia ($e = \frac{A}{6}$)

Quando a força é aplicada no limite do núcleo central de inércia (**Figura 20**), a tensão mínima será igual a zero, e a máxima será obtida a partir da equação **13**.

Tem-se:

$$\sigma_{\text{máx}} = 2 \frac{N}{A \times B} \quad \mathbf{13}$$

Figura 20 – Excentricidade em Uma Direção: Força aplicada no limite do núcleo central de inércia



Fonte: Bastos (2019)

c) Força aplicada fora do núcleo central de inércia ($e > \frac{A}{6}$)

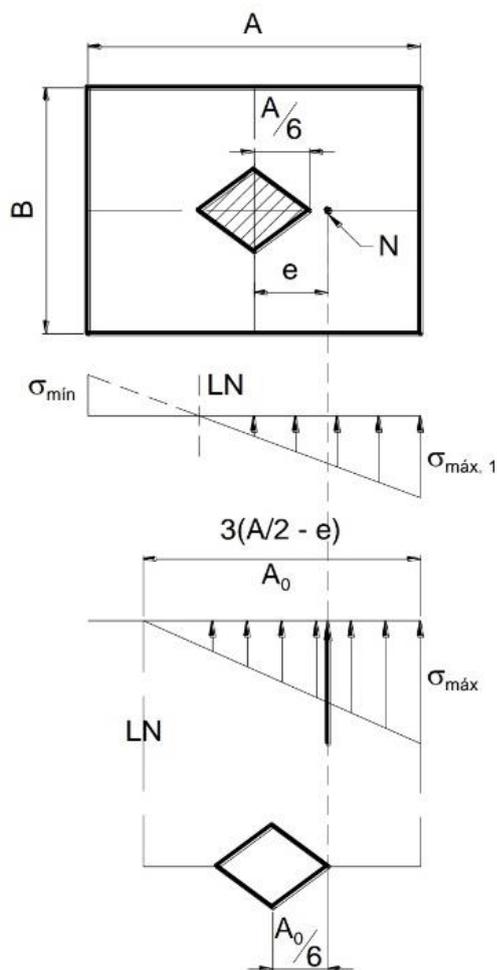
Quando a força aplicada estiver fora do núcleo central de inércia (**Figura 21**), surgirá um diagrama triangular contendo uma zona com tensões de tração e outra com tensões de compressão. Deverá ser excluída a zona tracionada, e a tensão máxima de compressão aumentará conforme a equação **14**.

Tem-se:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{2N}{3B \left(\frac{A}{2} - e \right)}$$

14

Figura 21 – Excentricidade em Uma Direção: Força aplicada fora do núcleo central de inércia

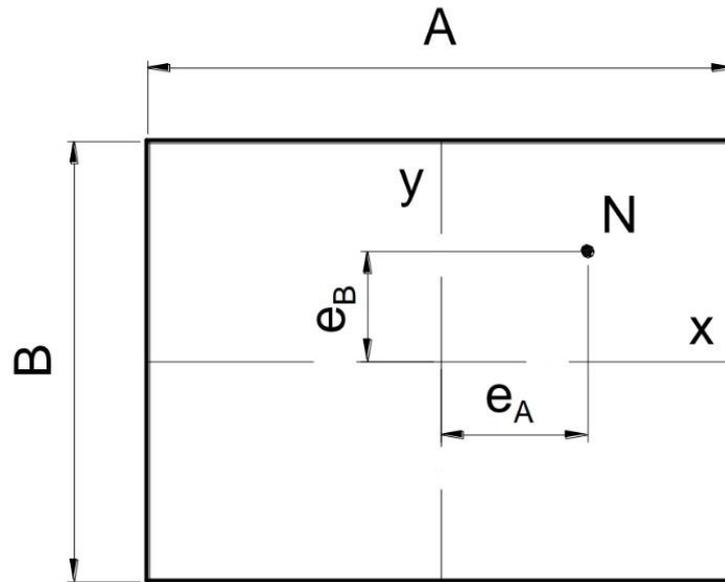


Fonte: Bastos (2019)

6.3.6.2 Excentricidade em Duas Direções

Quando houver excentricidade em dois eixos (**Figura 22**), o elemento de fundação estará submetido a flexão oblíqua composta, onde serão analisados dois casos diferentes de acordo com a excentricidade.

Figura 22 – Sapata com Excentricidade nas Duas Direções



Fonte: Bastos (2019)

A tensão para este tipo de esforço será definida pela equação abaixo:

$$\sigma = \frac{N}{A \cdot B} \pm \frac{M_B \cdot y}{I} \pm \frac{M_A \cdot x}{I} \quad 15$$

As excentricidades no eixo "x" e "y" serão:

$$e_A = \frac{M_A}{N} \quad 16$$

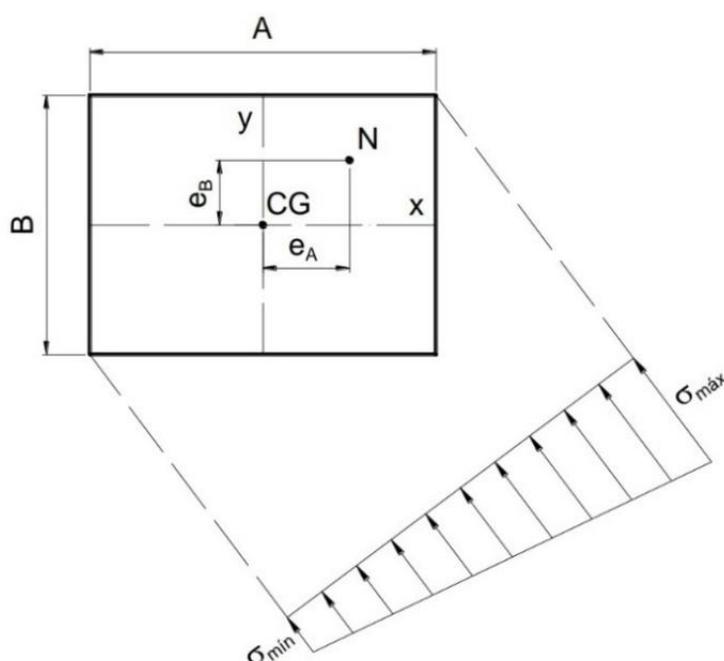
$$e_B = \frac{M_B}{N} \quad 17$$

Em seguida, é verificado se a excentricidade está dentro ou fora do núcleo central de inércia, já que isso, determina como é feito o dimensionamento, no caso da existência de tração na sapata.

- a) Força aplicada dentro ou no limite do núcleo central de inércia $\left(\frac{e_A}{A} + \frac{e_B}{B} \leq \frac{1}{6}\right)$

Com a força aplicada no núcleo central de inércia (**Figura 23**) não ocorrem tensões de tração e toda a seção da sapata se encontra comprimida.

Figura 23 – Excentricidade nas Duas Direções: Força aplicada no núcleo central de inércia



Fonte: Bastos (2019)

Onde:

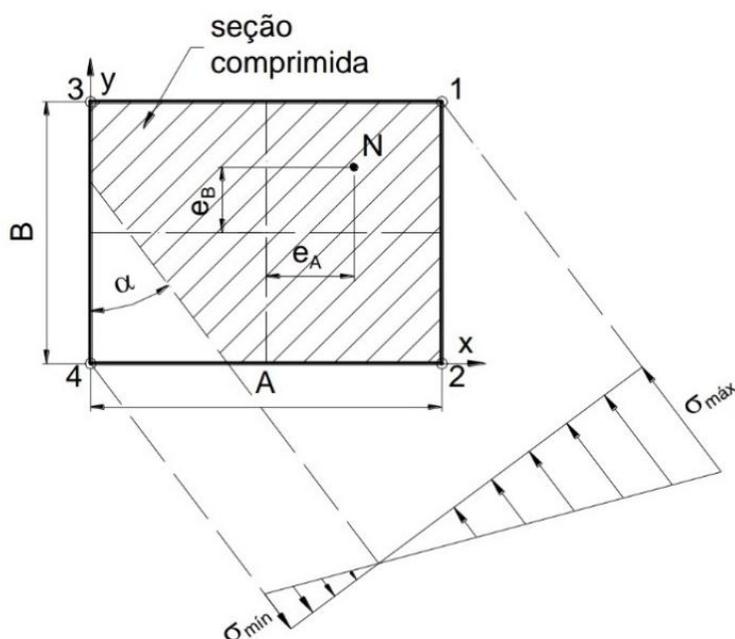
$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{N}{A \cdot B} \left(1 + \frac{6e_A}{A} + \frac{6e_B}{B} \right) \quad 18$$

$$\sigma_{\text{mín}} = \frac{N}{A \cdot B} \left(1 - \frac{6e_A}{A} - \frac{6e_B}{B} \right) \quad 19$$

b) Força aplicada fora do núcleo central $\left(\frac{e_A}{A} + \frac{e_B}{B} > \frac{1}{6}\right)$

Quando a força aplicada se encontra fora do núcleo central de inércia (**Figura 24**), o elemento de fundação se encontra com parte de sua seção tracionada. No **ANEXO A** é encontrado o ábaco utilizado para facilitar o processo de determinação da tensão máxima nessa situação (BASTOS,1973 *apud* MONTOYA, 2019, p. 46).

Figura 24 – Excentricidade nas Duas Direções: Força aplicada fora do núcleo central de inércia



Fonte: Bastos (2019)

$$\sigma_{\text{máx}} = \sigma_1 = \frac{N}{K_1 \cdot A \cdot B}$$

20

Onde:

- $\sigma_{\text{mín}} = \sigma_4 = K_4 \sigma_1$ (Não considerado) $\rightarrow \therefore \sigma_{\text{mín}} = \sigma_4 < 0$
- K_1 e K_4 são determinadas no ábaco de MONTOYA (ANEXO A)

6.3.6.3 Verificação da Estabilidade

Bastos (2019) recomenda que, para as sapatas submetidas a momentos fletores, é importante verificar as possibilidades de escorregamento e tombamento.

6.3.6.3.1 Verificação ao Tombamento

Devido o momento fletor e/ou uma força horizontal na base da sapata, há uma tendência natural a rotação do elemento provocando seu tombamento (**Figura 25**). Esse fenômeno deve ser evitado pelo próprio peso da sapata por uma verificação garantindo que a sapata seja um corpo rígido.

Essa verificação é realizada comparando o momento aplicado (eq. **21**) com momento resistido pela sapata (eq. **22**) em torno de um ponto, devendo essa relação ser maior que um coeficiente de segurança (eq. **23**).

$$M_{\text{Tomb}} = M + F_H \times h \quad \mathbf{21}$$

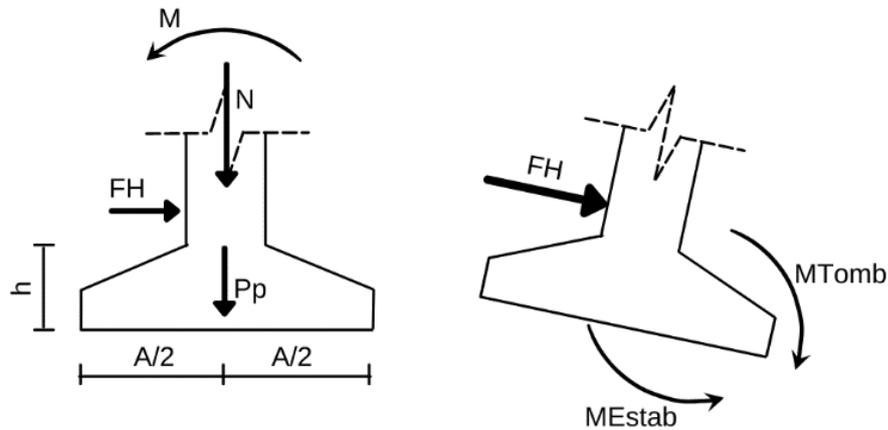
$$M_{\text{Estab}} = (N + P_P) \frac{A}{2} \quad \mathbf{22}$$

$$\gamma_{\text{Tomb}} = \frac{M_{\text{Estab}}}{M_{\text{Tomb}}} \geq 1,5 \quad \mathbf{23}$$

Onde:

- M_{Tomb} – Momento de Tombamento;
- M_{Estab} – Momento Estabilizador;
- F_H – Força horizontal;
- N – Força Normal;
- M – Momento Fletor transmitido do pilar;
- P_P – Peso Próprio da Sapata;
- A – Dimensão da Base;
- h – Altura da Sapata.

Figura 25 – Tombamento da Sapata



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

6.3.6.3.2 Verificação ao Escorregamento

A força horizontal proporciona um deslizamento na sapata, e para garantir sua segurança a força de atrito entre a base da sapata e o solo deve superar a solicitação aplicada (**Figura 26**).

Sua verificação pode variar conforme o tipo de solo (eq. **24** e **25**) em contato com a superfície de base da sapata sendo o coeficiente de segurança definido conforme a equação **26**.

- Solo Arenoso:

$$F_{\text{Estab}} = (N + P_p) \operatorname{tg} \varphi \quad \mathbf{24}$$

- Solo Coesivo:

$$F_{\text{estab}} = (N + P_p) \operatorname{tg} \left(\frac{2}{3} \phi \right) + A \left(\frac{2}{3} c \right) \quad \mathbf{25}$$

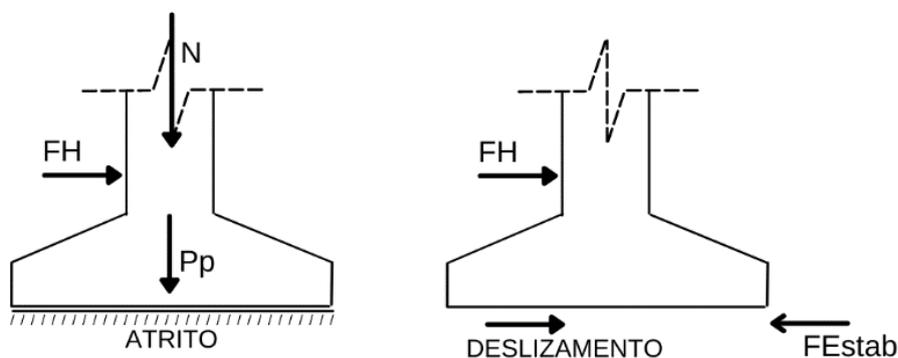
- Coeficiente de Segurança:

$$\gamma_{\text{esc}} = \frac{F_{\text{estab}}}{F_H} \geq 1,5 \quad \mathbf{26}$$

Onde:

- F_{Estab} – Força Estabilizadora;
- N – Força Normal;
- P_p – Peso Próprio da Sapata;
- φ – Solo/Sapata.
- Φ – Ângulo de atrito interno do solo;
- c – Coesão do Solo;
- A – Dimensão da Base;
- F_H – Força horizontal

Figura 26 – Escorregamento da Sapata



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

6.4 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Em conformidade com a NBR 6118/2014 (item 22.6.3) “para cálculo e dimensionamento de sapatas, devem ser utilizados modelos tridimensionais lineares ou modelos biela-tirante tridimensionais, podendo, quando for o caso, ser utilizados modelos de flexão”.

Nesse trabalho será abordado o dimensionamento de sapatas pelo modelo de flexão, que segundo Carvalho e Pinheiro (2009) é o método mais simples e de maior utilização.

6.4.1 Estimativa das Dimensões

O dimensionamento da sapata é constituído pela verificação das tensões no concreto e cálculo da armadura de flexão. Suas características geométricas tanto para as sapatas centradas e excêntricas, como para o CEB-70 é procedido de forma idêntica, exposto a seguir. Ao passo que, a área da base da sapata pode ser determinada como:

$$S_{\text{sap}} = \frac{K_{\text{maj}} \cdot N_{\text{gk}} + N_{\text{qk}}}{\sigma_{\text{adm}}} \quad 27$$

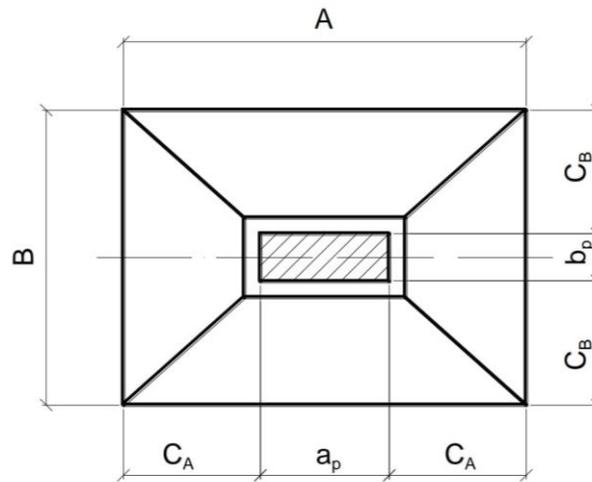
Onde:

- K_{maj} – Coeficiente de majoração da carga vertical das ações permanentes;
- N_{gk} – Parcela da carga vertical devida às ações permanentes
- N_{qk} – Parcela da carga vertical devida às ações variáveis
- σ_{adm} – Tensão admissível do solo em kN/cm².

A NBR 6122/2019 (item 5.6) recomenda considerar o peso próprio da sapata com no mínimo 5% da carga vertical permanente. Com isso, o coeficiente $K_{\text{maj}} = 1,05$.

$$S_{\text{sap}} = \frac{1,05 \cdot N_{\text{k}}}{\sigma_{\text{adm}}} \quad 28$$

a) Sapatas com Balanços iguais nas duas direções (**Figura 27**)

Figura 27 – Sapata com balanços iguais

Fonte: Bastos (2019)

Procura-se determinar as dimensões A e B de modo que os balanços sejam iguais ou semelhantes ($C_A \approx C_B$). Fazendo $C_A = C_B$ tem-se:

$$A - a_p = B - b_p \quad \rightarrow \quad A - B = a_p - b_p \quad \mathbf{29}$$

E conseqüentemente, a área da armadura na direção A será semelhante a área da armadura na direção B ($A_{s,A} \approx A_{s,B}$). Com isso, a área da base da sapata pode ser definida por:

$$S_{sap} = A \cdot B \quad \rightarrow \quad A = \frac{S_{sap}}{B}$$

Com balanços iguais ($C_A = C_B$) e considerando a equação **29**, fica:

$$A - B = a_p - b_p \quad \rightarrow \quad \frac{S_{sap}}{B} - B = a_p - b_p$$

Multiplicando por B e resolvendo a equação do segundo grau tem-se a equação **30**, e por fim a expressão **31**.

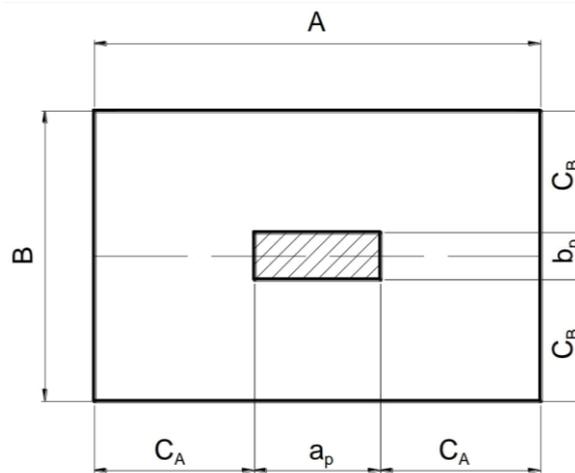
$$S_{sap} - B^2 = (a_p - b_p)B \quad \mathbf{30}$$

$$B = \frac{1}{2}(b_p - a_p) + \sqrt{\left(\frac{1}{4}(b_p - a_p)^2 + S_{sap}\right)} \quad 31$$

Os lados A e B devem ser preferencialmente múltiplos de 5 cm, para melhor execução em canteiro de obra.

b) Sapatas com Balanços não iguais nas duas direções (**Figura 28**)

Figura 28 – Sapata com balanços diferentes



Fonte: Bastos (2019)

Neste caso, onde $C_A \neq C_B$, recomenda-se a seguinte relação entre os lados da sapata:

$$\frac{A}{B} \leq 3,0 \quad 32$$

Considerando R como a relação entre os lados tem-se:

$$\frac{A}{B} = R \quad \rightarrow \quad A = B \cdot R$$

$$S_{sap} = A \cdot B \quad \rightarrow \quad S_{sap} = B \cdot R \cdot B$$

$$B = \sqrt{\frac{S_{sap}}{R}} \quad 33$$

Deve-se definir um valor para R entre 1 e 3, e calcular a área da sapata (S_{sap}). Os lados A e B devem ser preferencialmente múltiplos de 5 cm.

6.4.2 Dimensionamento da Armadura de Flexão

O CEB-70 é uma metodologia abordada pelo Conselho Europeu de Betão de 1970, utilizado no dimensionando de sapatas isoladas.

Para aplicar os procedimentos do método, é necessário verificar o balanço em C nas duas direções (**Figura 29**), garantido que a expressão **34** satisfaça as características geométricas necessária para dá continuidade aos cálculos.

$$\frac{h}{2} \leq C \leq 2h \quad 34$$

Onde:

$$C_A = \frac{A-a_p}{2} \quad ; \quad C_B = \frac{B-b_p}{2} \quad 35$$

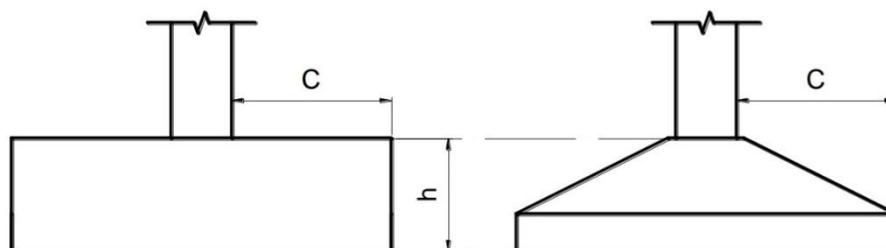
➤ Sendo

- C: Balanço da sapata em cm.

se, $C > 2h \rightarrow$ viga/placa

se, $C < \frac{h}{2} \rightarrow$ bloco de fundação

Caso, $C > 2h$ a sapata poderá ser considerada como uma viga/placa e calculada de acordo com a teoria correspondente, porém se $C < h/2$, o elemento analisado é um bloco de fundação e o método não é aplicado.

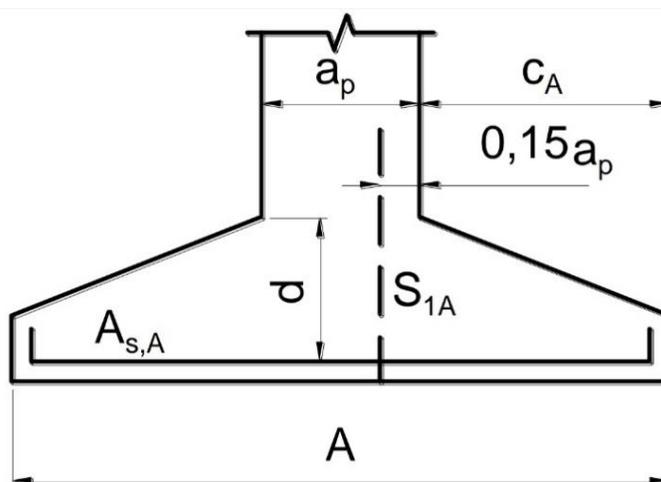
Figura 29 – Balaço em C da Sapata Isolada

Fonte: Bastos (2019)

A altura útil d da seção de referência é tomada na seção paralela à S_1 e situada na face do pilar (**Figura 30**), e deve satisfazer em ambas as direções, a equação **36**.

$$d \leq 1,5C$$

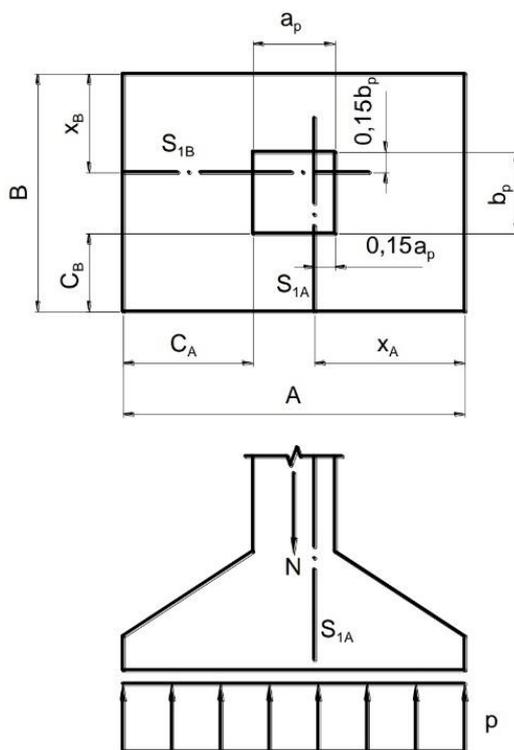
36

Figura 30 – Distância para o cálculo do momento fletor

Fonte: Bastos (2019)

De acordo com Bastos (2019) o método analisa os momentos fletores internos para cada direção, em relação a uma seção de referência (S_{1A} e S_{1B}) plana, perpendicular à superfície de apoio, ao longo da sapata e situada internamente ao pilar, distante da face do pilar de $0,15a_p$ na direção x e a $0,15b_p$ na direção y , ao longo de todo o comprimento da sapata (**Figura 31**), onde, os momentos fletores internos encontrados deverão ser combatidos por uma armadura principal.

Figura 31 – Notações e seções de referência S_{1A} e S_{1B}



Fonte: Bastos (2019)

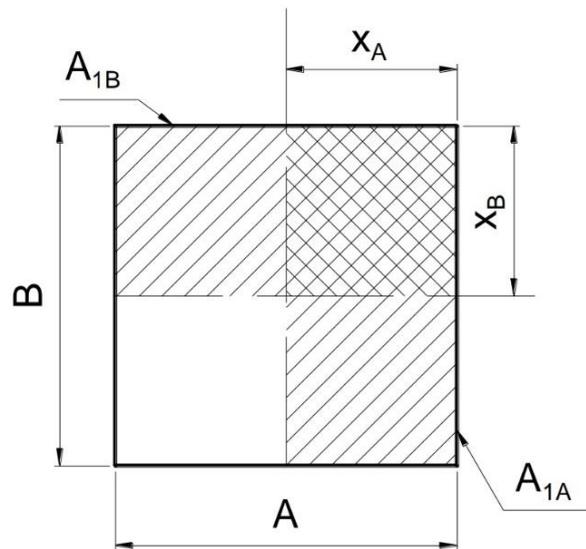
O cálculo da armadura de flexão é realizado semelhante ao que ocorre nas vigas à flexão simples, considerando o diagrama de tensões no solo, entre a seção S_1 e a extremidade da sapata, ou seja, a sapata é dimensionada à flexão como uma viga engastada.

Sendo assim, as distâncias do extremo da base da sapata até o ponto de atuação do momento (**Figura 32**), podem ser determinadas pelas expressões **37** e **38**.

$$X_A = C_A + 0,15a_p \quad \mathbf{37}$$

$$X_B = C_B + 0,15a_b \quad \mathbf{38}$$

Figura 32 – Área de Influência e Pressão



Fonte: Bastos (2019)

Para a pressão que exerce sobre o solo, que corresponde à reação do solo não devem ser considerados o peso da sapata e do solo acima dela, porque não causam flexão na sapata.

- Para excentricidade em Uma Direção:

$$p_{1A} = \sigma_1 - \frac{\sigma_1 - \sigma_4}{A} \quad 39$$

$$P_{1,A} = p_{1A} \cdot X_A \quad 40$$

$$P_{2,A} = (\sigma_1 - p_{1A}) \cdot \frac{X_A}{2} \quad 41$$

$$p_{\text{méd},B} = \frac{\sigma_1 - \sigma_4}{2} \quad 42$$

- Para excentricidade em Duas Direções:

$$P_A = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad 43$$

$$P_B = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad 44$$

E os momentos fletores, são:

- Para excentricidade em Uma Direção:

$$M_{1A} = \left(P_1 \cdot \frac{X_A}{2} + P_2 \cdot \frac{2}{3} X_A \right) B \quad 45$$

$$M_{1B} = p_{\text{méd},B} \cdot \left(\frac{X_B^2}{2} \right) \cdot A \quad 46$$

- Para excentricidade em Duas Direções:

$$M_{1A} = p \cdot \left(\frac{X_A^2}{2} \right) \cdot B \quad 47$$

$$M_{1B} = p \cdot \left(\frac{X_B^2}{2} \right) \cdot A \quad 48$$

Se o momento fletor que resultar for negativo, deverá existir uma armadura negativa na parte superior da sapata.

Por fim, a área de armadura é calculada com a equação **49** para ambas as situações, aplicada para as duas direções, correspondentes aos lados A e B da sapata.

$$A_s = \frac{M_d}{0,85 \cdot d \cdot f_{yd}} \quad 49$$

A NBR 6118/2014 não especifica uma armadura mínima de flexão para as sapatas. Desse modo, não será aplicada a armadura mínima nesse trabalho.

Alguns autores recomendam a armadura mínima de vigas, especificada pela norma NBR 6118/2014, gerando uma armadura superior do que a mínima calculada

para sapatas conforme o CEB-70, devido ao elemento ter uma maior altura. Outros autores utilizam a armadura mínima de lajes, para elementos fletidos, porém devido altura da laje ser uniforme a armadura pode ser pequena e insuficiente para sapatas.

6.4.3 Recomendações para Ancoragem da Armadura de Flexão

Ancoragem é a fixação da barra no concreto. De acordo com a NBR 6118/2014 todas as barras da armadura devem ser ancoradas de modo que as forças a que estejam submetidas sejam transferidas ao concreto, por meio de aderência ou dispositivos mecânicos, ou ainda combinação de ambos.

No item 9.4.1 a norma relata que na ancoragem por aderência, deve ser previsto um comprimento básico reto de uma barra de armadura passiva necessário para ancorar a força-limite $A_s f_{yd}$ nessa barra, admitindo-se, ao longo desse comprimento, resistência de aderência uniforme e igual a f_{bd} , conforme o item 9.3.2.1. Esse comprimento de ancoragem pode ser calculado pela expressão **50**.

$$\ell_b = \frac{\Phi}{4} \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \quad \mathbf{50}$$

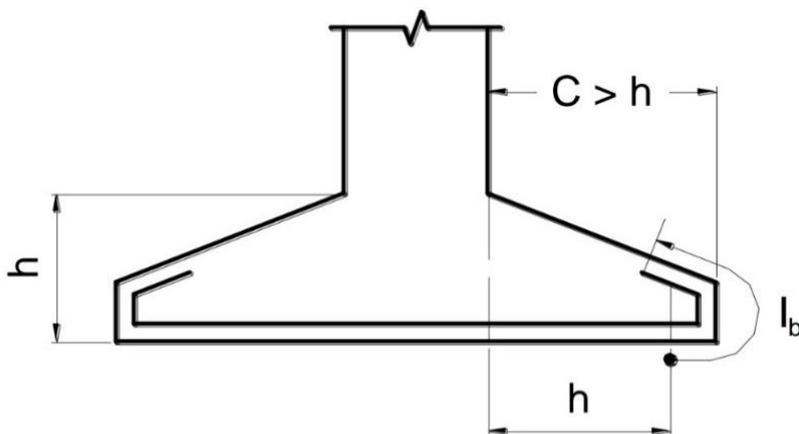
Em resumo, de forma prática é possível utilizar a tabela do **ANEXO B** fornecida por Bastos (2019) como referência para conhecer o valor para aço CA-50, tendo a necessidade de verificar a condição de boa e má aderência.

Por sua vez, o CEB-70 considera duas possibilidades para a ancoragem da armadura de flexão nas extremidades das sapatas:

- 1° Caso: $C > h$

A ancoragem da armadura deve partir da seção distante h da face do pilar, e se estender até as bordas da sapata (**Figura 33**). Onde ℓ_b é o comprimento de ancoragem básico, considerado sem o gancho.

Figura 33 – Ancoragem da Armadura quando $C > h$

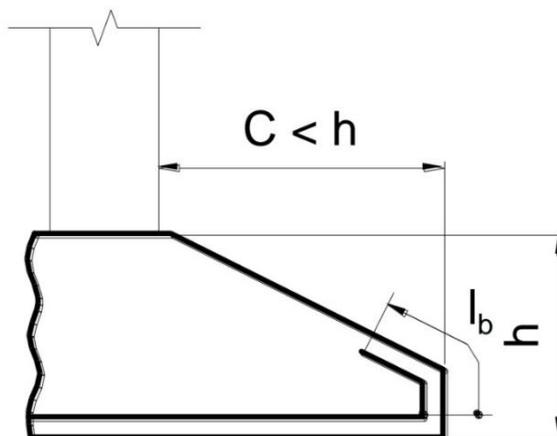


Fonte: Bastos (2019)

- Caso 2: $C < h$

A ancoragem da armadura deve ser totalmente na extremidade da sapata, sendo o comprimento de ancoragem medido a partir da extremidade retilínea da barra, na borda da sapata (**Figura 34**).

Figura 34 – Ancoragem da Armadura quando $C < h$



Fonte: Bastos (2019)

Em nenhum caso a armadura pode ser parada antes de ter atingido a borda da sapata.

6.4.4 Verificação da Aderência da Armadura de Flexão

A aderência é a propriedade responsável pela união entre o aço e o concreto, sua função é impedir que haja escorregamento entre os dois materiais, garantindo que ambos trabalhem em conjunto.

A verificação da aderência do concreto com a armadura deve ser realizada para ambas as seções de referência (S_{1A} e S_{1B}). Para que não haja escorregamento da armadura a seguinte condição deve ser atendida:

$$V_d \leq 0,87f_{bd} \cdot n\pi\phi_1 d \quad 51$$

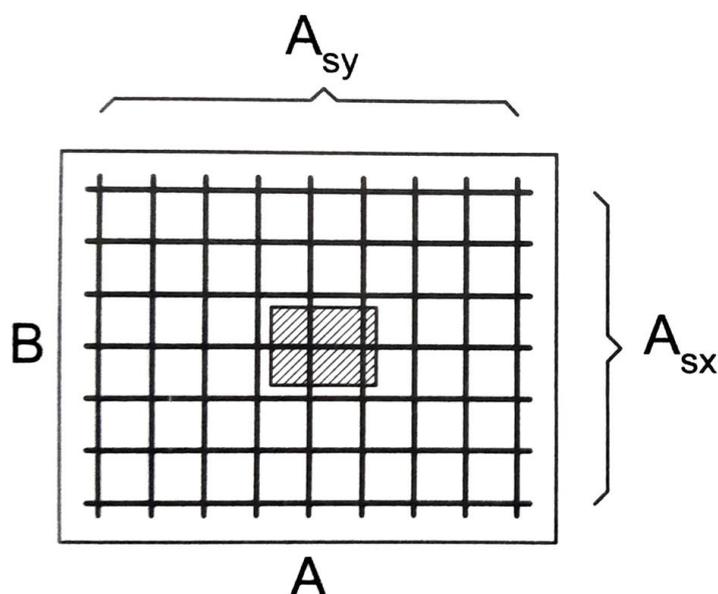
Onde:

- V_d – Força cortante de cálculo nas seções de referência;
- f_{bd} – Resistência de aderência de cálculo (item 9.3.2, NBR 6118/2014);
- n – Número de armaduras na seção analisada;
- ϕ_1 – Diâmetro da armadura que cruza a seção de referência;
- d – Altura útil da seção de referência.

6.4.5 Detalhamento das Armaduras de Flexão

A NBR 6118/2014 relata que para sapatas rígidas a armadura de flexão deve ser uniformemente distribuída ao longo da largura da sapata (**Figura 35**), estendendo-se até as faces nas extremidades da sapata e terminadas em ganchos (não há informações detalhadas em relação ao comprimento do gancho). Porém, para barras com $\phi \geq 25$ mm, é preciso verificar a abertura de pequenas fendas no plano horizontal.

Figura 35 – Disposição das Armaduras na Sapata



Fonte: Araújo (2010)

De acordo com Bastos (2019) é recomendado que o espaçamento entre as barras da armadura principal de flexão, esteja no intervalo $10 \text{ cm} \leq e \leq 20 \text{ cm}$ para evitar a possibilidade de fissuras.

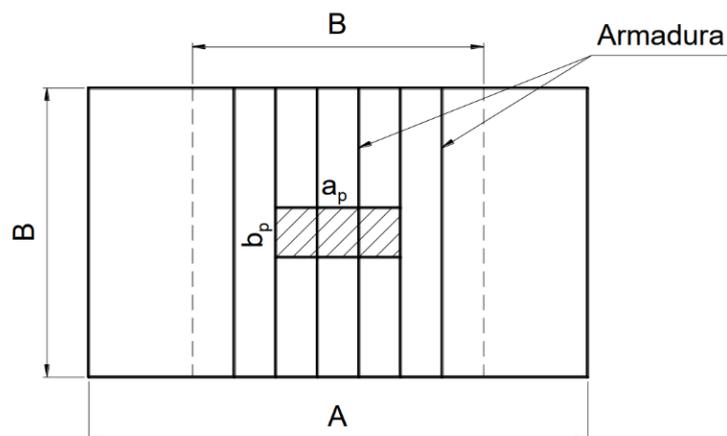
Segundo Santos (1984), o CEB-70 apresentam prescrições detalhadas quanto à distribuição da armadura. Nas sapatas de base quadrada, a armadura de flexão pode ser uniformemente distribuída, paralelamente aos lados da sapata. Nas sapatas de base retangular, a armadura paralela ao lado maior (A) deve ser uniformemente distribuída sobre a largura B da sapata. No caso da armadura paralela ao lado menor (B), existem duas possibilidades:

- a) $B \geq a_p + 2h$ (**Figura 36**)

Uma parcela da armadura total deve ser colocada na extensão B sob o pilar numa fração (eq. 52).

$$A_s \frac{2B}{A + B}$$

Figura 36 – Distribuição de A_s quando $B \geq a_p + 2h$



Fonte: Bastos (2019)

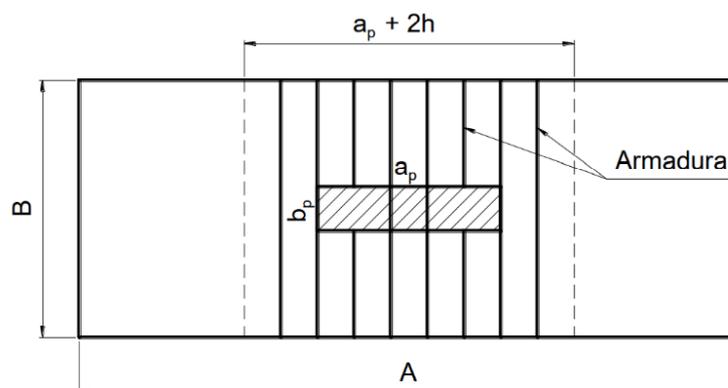
b) $B < a_p + 2h$ (**Figura 37**)

Uma parcela da armadura total (eq. 53) deve ser colocada numa faixa central sob o pilar de extensão $a_p + 2h$.

$$A_s \frac{2(a_p + 2h)}{A + a_p + 2h}$$

53

Figura 37 – Distribuição de A_s quando $B < a_p + 2h$



Fonte: Bastos (2019)

Nos dois casos, o restante da armadura deve ser distribuído nas duas faixas além da dimensão B.

6.4.6 Verificação do Esforço Cortante

No método CEB-70 a verificação do esforço cortante é feita para uma seção S_2 , distante $d/2$ da face do pilar, na qual a força cortante atuante deve ser menor que uma força cortante máxima. A força cortante é calculada considerando o diagrama de tensões do solo, entre a seção S_2 e a extremidade da sapata, ou seja, a sapata é verificada ao esforço cortante como uma viga em balanço.

Sendo sua fórmula:

$$V_{d,lim} = \frac{0,474}{\gamma_c} \cdot b_s \cdot d_s \cdot \sqrt{\rho} \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad 54$$

Onde:

- γ_c – Coeficiente de segurança do concreto;
- b_s e d_s – Largura e altura da seção S_2 ;
- ρ – Taxa de armadura longitudinal da seção S_2 .

“A força cortante limite preconizada pelo CEB-70 é muito baixa e, portanto, muito conservadora, de modo que não deve ser considerada no projeto de sapatas rígidas”. (BASTOS, 1985 apud MACHADO, 2019, p. 30). Com isso, a equação **54** não será analisada nesse trabalho.

6.4.7 Verificação da Tensão de Compressão Diagonal

Segundo o item 19.5.3.1 da NBR 6118/2014 a verificação da tensão de compressão diagonal do concreto deve ser feita indiretamente por meio da tensão de cisalhamento atuante na superfície crítica C' correspondente ao contorno do pilar. Todavia, no CEB-70 são feitas 4 verificações (seção de referência S_3), uma para cada lateral do retângulo envolvente ao pilar.

Em contrapartida, a equação **55** deve ser atendida, para que não ocorra o esmagamento do concreto na diagonal comprimida.

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd2} \quad 55$$

Onde:

- τ_{Rd2} - Tensão de Cisalhamento Resistente

$$\tau_{Rd2} = 0,27a_v f_{cd} \quad \mathbf{56}$$

➤ Sendo:

- $a_v = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$, com f_{ck} em MPa

- τ_{Sd} = Tensão de Cisalhamento Solicitante

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{u_0 d} \quad \mathbf{57}$$

➤ Sendo:

- F_{Sd} – Força Solicitante de Cálculo;
- $u_0 = 2(a_p + b_p)$ – Perímetro de Contorno Crítico C;
- d – Altura útil ao longo do contorno crítico C.

7 ESTUDO DE CASO

7.1 CARACTERÍSTICAS DO PROJETO

O presente trabalho consiste em dimensionar as sapatas de uma residência unifamiliar de 2 pavimentos, e será analisado de duas maneiras diferentes, como foi apresentado anteriormente.

A edificação está localizada em ambiente urbano, com obstáculos numerosos e pouco espaçados. Para efeito de dimensionamento foi considerado a tensão admissível de 1,2 kgf/cm².

Para a superestrutura, adotou-se f_{ck} de 25 MPa para o concreto e aço CA-50 e CA-60 para as armaduras de todos os elementos. O sistema estrutural utilizado para todos os pavimentos foi de lajes maciças, com altura de 12 cm, apoiadas sobre vigas e pilares em concreto armado. Não será apresentado nenhum detalhamento dos elementos estruturais da superestrutura, pois não é o objetivo do trabalho.

Nas fundações adotou-se f_{ck} de 25 MPa para o concreto e aço CA-50 para as armaduras. Por se tratar de uma edificação de pequeno porte, as solicitações nas sapatas em decorrência da ação do vento serão desprezadas no cálculo.

Em resumo, a **Tabela 3** apresenta os parâmetros utilizados na elaboração do projeto.

Tabela 3 – Características do Projeto

f_{ck} 25 MPa
Aço CA-50
Cobrimento 3 cm
Tensão Admissível do Solo 1,2 kgf/cm ²
Cota de assentamento 1,5 m
Classe de agressividade 2
Colarinho da sapata 5 cm

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

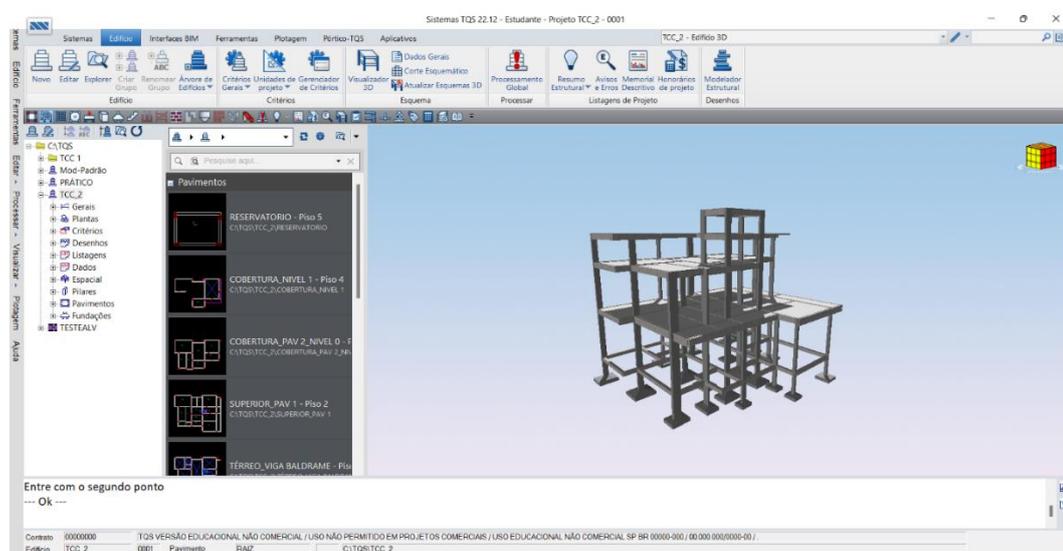
7.2 MÉTODO COMPUTACIONAL

Para o projeto foi utilizado o software TQS, versão 22, modo estudantil, para o dimensionamento estrutural dos elementos da superestrutura em concreto armado (**Figura 38**).

Através do software foi realizado o dimensionamento, detalhamento e desenho de plantas de armação de sapatas isoladas e rígidas, calculando de maneira automática as dimensões das sapatas, com base nas dimensões dos pilares, nas cargas atuantes e na cota de assentamento da fundação.

De forma resumida, é processada a fase de pré-dimensionamento para obter as dimensões mínimas necessárias de segurança da sapata e, posteriormente, é efetuada a fase de detalhamento, utilizando as dimensões pré-dimensionadas ou impostas pelo projetista.

Figura 38 – Interface do software TQS



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Para a definição das dimensões da sapata, existem duas possibilidades onde o software dimensiona a sapata automaticamente ou o projetista impõe as dimensões. Nesse trabalho será utilizado o primeiro caso para posteriormente ser feito o comparativo nos resultados obtidos.

Um dos parâmetros importantes que o programa leva em consideração, e que deve ser destacado para o entendimento sobre o trabalho é o cálculo da armadura mínima de flexão.

Para o dimensionamento da armadura mínima de uma sapata existem duas possibilidades. A taxa de armadura, onde o projetista define o valor da taxa (ρ_{\min}), ou o momento mínimo, que segue o proposto pela NBR 6118/2014 (item 17.3.5.2.1).

A norma informa que armadura mínima de tração, em elementos estruturais armados deve ser determinada pelo dimensionamento da seção a um momento fletor mínimo (eq. 58) respeitada a taxa mínima absoluta de 0,15%. O cálculo ainda depende da área da seção transversal da sapata, podendo ser a área total ou central da sapata, como mostra a **Figura 39**.

$$M_{d,\min} = 0,8W_0 \cdot f_{ctk,sup} \quad 58$$

Onde:

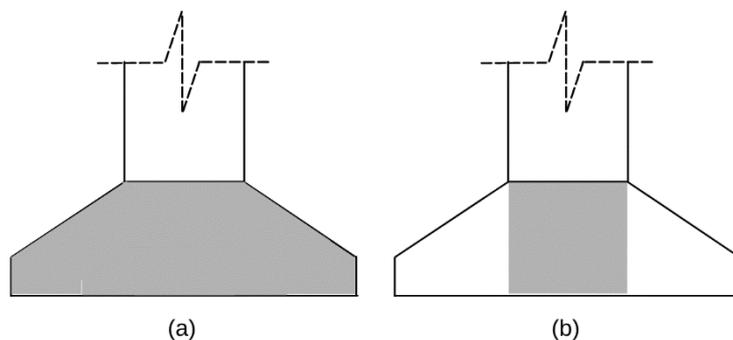
- $f_{ctk,sup}$ – Resistência Característica superior do concreto à tração.
- W_0 – Módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada;

$$W_0 = \frac{I}{X}$$

➤ Sendo:

- I – Momento de Inércia;
- X – Distância da linha neutra até a extremidade.

Figura 39 – Área total transversal da sapata (a); Área central da sapata (b)



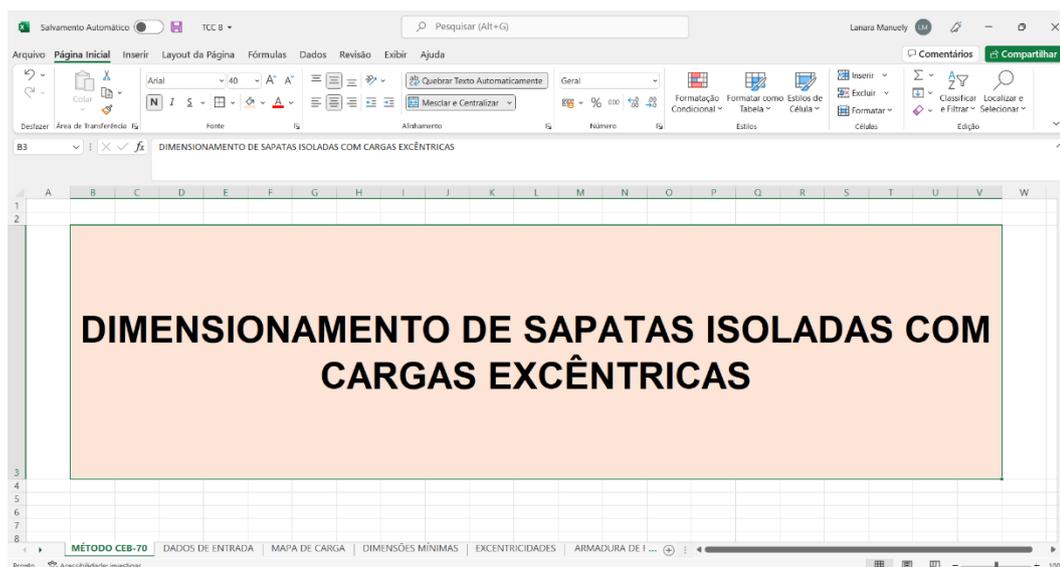
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

No TQS, para o desenvolvimento desse trabalho, foram utilizados o momento mínimo e a área total da seção transversal da sapata para o cálculo da armadura mínima.

7.3 MÉTODO CEB-70

Foi desenvolvido uma planilha inteligente no Excel, um editor de planilha do pacote Office produzido pela Microsoft capaz de organizar as informações e com o melhor aproveitamento do tempo. Com o programa foi possível estruturar, armazenar e manipular os dados, permitindo a criação de planilhas personalizadas para a formação desse trabalho **Figura 40**.

Figura 40 – Interface da Rotina de Cálculo



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Para a construção da rotina de cálculo foi necessário desenvolver 7 etapas para o dimensionamento de sapatas com cargas excêntricas em uma ou duas direções dentro do núcleo central de inércia. Para uma visão global do que acontece com todas as sapatas simultaneamente, é possível visualizar o dimensionamento para cada fundação.

I. Informações Iniciais

Inicialmente foi realizada a entrada de parâmetros (**Tabela 4**) de acordo com as características do projeto, utilizando os dados da **Tabela 3**.

Tabela 4 – Rotina de Cálculo: Informações Iniciais

INFORMAÇÕES INICIAIS							
Cobrimento	Tensão Admissível (kN/cm ²)	f _{ck} (MPa)	Aço CA-50 f _{yd} (kN/cm ²)	Coeficientes			
				γ _c	γ _f	γ _s	K _{maj}
3	0,012	25	43,48	1,4	1,4	1,15	1,05

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

II. Entrada de Dados

Com o mapa de cargas obtidas do TQS (**Tabela 6**) é possível dá entrada de alguns fatores importantes dos pilares para começar o dimensionamento (**Tabela 5**).

Vale salientar que para os procedimentos de cálculos foi considerado o maior lado da sapata na dimensão A e menor lado na dimensão B, para facilitar na construção da planilha.

Tabela 5 – Rotina de Cálculo: Dados de Entrada

DADOS DE ENTRADA						
Elemento	a _p (cm)	b _p (cm)	Nk (kN)	φ (mm)	Mx (kN.cm)	My (kN.cm)
P1	35,00	14,00	126,00	10,00	-110,00	-420,00
P2	35,00	14,00	155,90	12,50	420,00	-100,00
P3	50,00	25,00	154,30	10,00	-30,00	110,00
P4	50,00	25,00	129,60	10,00	-20,00	520,00
P5	30,00	14,00	20,00	10,00	50,00	10,00
P6	40,00	14,00	190,90	10,00	20,00	-150,00
P7	40,00	14,00	228,40	10,00	130,00	230,00
P8	30,00	19,00	158,60	10,00	30,00	-40,00
P9	30,00	14,00	116,80	10,00	70,00	200,00
P10	40,00	14,00	139,60	16,00	-10,00	180,00
P11	30,00	14,00	67,40	12,50	10,00	-10,00
P12	35,00	14,00	180,30	10,00	40,00	60,00
P13	40,00	14,00	196,70	10,00	-40,00	230,00
P14	50,00	20,00	80,80	10,00	210,00	200,00
P15	40,00	14,00	104,80	10,00	20,00	210,00
P16	40,00	14,00	132,30	10,00	60,00	-170,00
P17	40,00	14,00	154,60	10,00	20,00	160,00
P18	30,00	14,00	46,00	10,00	30,00	0,00
P19	30,00	14,00	44,30	10,00	80,00	40,00
P20	19,00	19,00	30,40	10,00	20,00	-220,00
P21	19,00	19,00	92,40	10,00	230,00	0,00

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

III. Dimensionamento e Geometria

Nessa etapa é possível calcular as dimensões mínimas necessárias das sapatas para o pré-dimensionamento usando as formulas **28**, **31** e **29**, adotar novos valores de A e B (preferência por múltiplos de 5 cm como visto anteriormente), garantindo que a nova área da sapata seja maior ou igual que a área mínima, atendendo todas as suas solicitações ($S_{sap} \leq \text{Área}$).

A altura adotada irá influenciar em seu comportamento estrutural de acordo com CEB-70, utilizando a $tg\beta$ (eq. 9). Como também na sua altura útil para garantir a possibilidade da ancoragem da armadura longitudinal do pilar dentro do volume da sapata. Onde a equação 59 deve se satisfazer.

$$d > \ell_b \quad \mathbf{59}$$

O comprimento de ancoragem, considera o diâmetro do pilar (**Tabela 5**), o concreto C25, aço CA-50 (**Tabela 4**), região de boa aderência, e ancoragem com gancho (**ANEXO B**).

No **APÊNDICE S** é possível visualizar toda interface da planilha para o dimensionamento e geometria da sapata.

IV. Excentricidade e Tensões

No **APÊNDICE T** é possível visualizar toda interface da planilha para a excentricidade e tensões atuantes na base de cada sapata. Vale ressaltar que a rotina de cálculo criada é funcional apenas para excentricidades dentro do núcleo de inércia, qualquer resultado diferente é necessário criar outro tipo de planilha com os cálculos apropriados para a situação.

Como simplificação a favor da segurança será considerada a maior tensão entre aquelas na metade dos lados A e B.

V. Armadura de Flexão

Para o cálculo das armaduras foi utilizado o método do CEB-70, e para o método ser aplicado as equações 34 e 36 devem ser atendidas.

Após conhecido os valores das armaduras são preciso transformar os valores em cm^2/m , utilizando as expressões 60 e 61 para utilizar o **ANEXO C** e verificar seus espaçamentos, respeitando a recomendação de Bastos (2019), em que o espaçamento deve estar no intervalo $10 \leq e \leq 20$ cm.

$$\frac{A_{s,A}}{B} \times 100 \quad \mathbf{60}$$

$$\frac{A_{s,B}}{A} \times 100 \quad \mathbf{61}$$

No **APÊNDICE U** é possível visualizar toda interface da planilha para o cálculo das armaduras de flexão.

VI. Compressão Diagonal

Nessa etapa é verificado a existência da possibilidade da ruptura por compressão diagonal. A **Tabela 15** apresenta os resultados e a interface desenvolvida.

VII. Detalhamento das Armaduras de Flexão

Essa etapa foi desenvolvida de acordo com a NBR 6118/2014, e a norma não relata uma armadura mínima para seu detalhamento, apenas que as barras das armaduras de flexão sejam estendidas até as faces nas extremidades da sapata, e terminadas em gancho, sem especificar detalhes quanto ao comprimento do gancho. Por isso será considerado que as barras se estenderão o comprimento de ancoragem básico (ℓ_b) a partir da extremidade da sapata. Para verificar o comprimento de ancoragem **ANEXO B** é preciso considerar o diâmetro do pilar (**Tabela 5**), o concreto C25, aço CA-50 (**Tabela 4**), região de boa aderência e sem gancho.

Para o gancho vertical e gancho inclinado foi utilizado a expressões **62** e **63**, e de preferência que seu resultado seja um valor múltiplo de 5 cm.

$$\ell_{\text{gancho,vert}} = h_0 - 2c \quad \mathbf{62}$$

$$\ell_{\text{gancho,incl}} = \ell_b - \ell_{\text{gancho,vert}} \quad \mathbf{63}$$

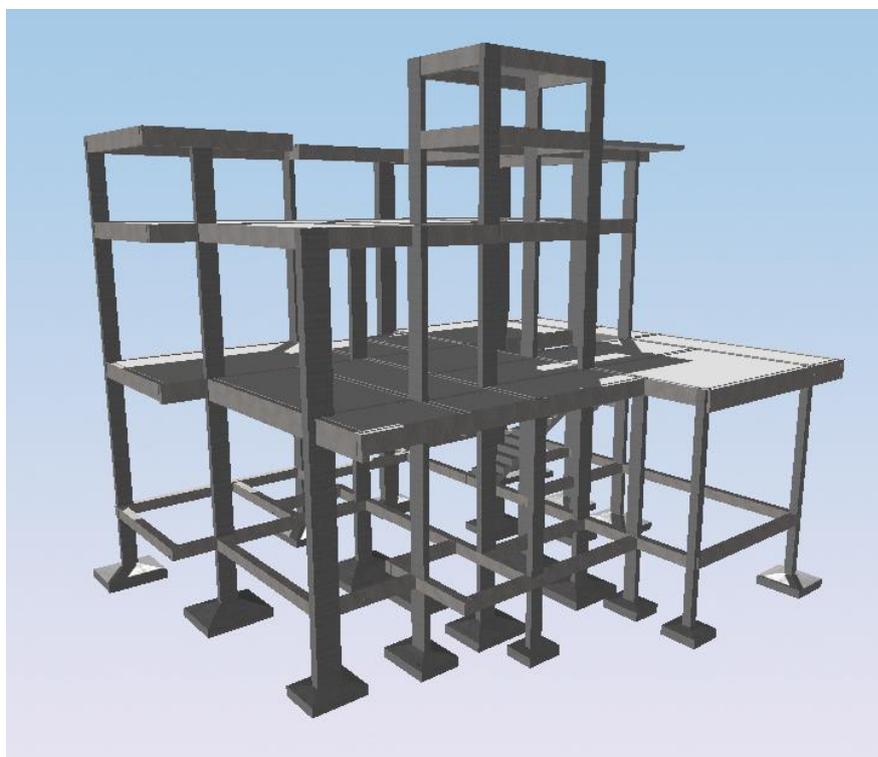
No **APÊNDICE V** é possível visualizar toda interface da planilha para o detalhamento das armaduras de flexão.

7.4 ANÁLISE E RESULTADOS

7.4.1 Resultados fornecidos pelo TQS

A superestrutura foi modelada em cinco níveis (**Figura 41**), incluindo cota de assentamento (1,50 m), pavimento térreo (3,45 m), pavimento cobertura (3,10 m), barrilete (1,80 m) e reservatório (1,40 m), com uma altura total de 9.75m. As plantas de formas da edificação se encontram no apêndice, nas páginas 91 à 95.

Figura 41 – Modelo Tridimensional da Estrutura



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Lançada e processada a superestrutura com todas as cargas de projeto e as devidas verificações, foi possível extrair o mapa de carga (**Tabela 6**) que foi utilizado nos dois métodos, vale ressaltar que estas cargas não estão majoradas. A planta de locação dos pilares se encontra no **APÊNDICE A**.

Importante salientar que o software considera o lado A da sapata como direção em X e o lado B como a direção em Y, independente do maior valor da direção.

Tabela 6 – Resultados do TQS: Mapa de Carga

Elem	Todas permanentes e acidentais dos pavimentos		
	Fz tf	Mx tfm	My tfm
S1	12.60	-0.11	-0.42
S2	15.59	-0.10	0.42
S3	15.43	-0.03	0.11
S4	12.96	-0.02	0.52
S5	2.00	0.01	0.05
S6	19.09	0.02	-0.15
S7	22.84	0.13	0.23
S8	15.86	0.03	-0.04
S9	11.68	0.20	0.07
S10	13.96	0.18	-0.01
S11	6.74	0.01	-0.01
S12	18.03	0.06	0.04
S13	19.67	0.23	-0.04
S14	8.08	0.21	0.20
S15	10.48	0.21	0.02
S16	13.23	0.06	-0.17
S17	15.46	0.02	0.16
S18	4.60	0.03	-0.00
S19	4.43	0.04	0.08
S20	3.04	0.02	-0.22
S21	9.24	-0.00	0.23

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Realizado o processamento das sapatas, houve a capacidade de obter os resultados em relação a sua geometria (**Tabela 7**).

Tabela 7 – Resultados do TQS: Dimensionamento e Geometria

RESULTADOS OBTIDOS PELO TQS					
Sapata	A (cm)	B (cm)	h (cm)	h0 (cm)	Vol (m³)
S1	135,0	115,0	35,0	20,0	0,40
S2	125,0	150,0	40,0	20,0	0,52
S3	135,0	115,0	35,0	20,0	0,42
S4	135,0	115,0	35,0	20,0	0,42
S5	65,0	85,0	25,0	20,0	0,12
S6	150,0	125,0	40,0	20,0	0,53
S7	165,0	140,0	45,0	20,0	0,69
S8	130,0	120,0	35,0	20,0	0,41
S9	105,0	125,0	35,0	20,0	0,34
S10	105,0	135,0	35,0	20,0	0,37
S11	90,0	75,0	25,0	20,0	0,15
S12	120,0	145,0	40,0	20,0	0,49
S13	125,0	155,0	40,0	20,0	0,54
S14	115,0	90,0	25,0	20,0	0,23
S15	90,0	120,0	30,0	20,0	0,26
S16	130,0	105,0	35,0	20,0	0,36
S17	135,0	110,0	35,0	20,0	0,39
S18	80,0	65,0	20,0	20,0	0,10
S19	70,0	90,0	25,0	20,0	0,14
S20	75,0	80,0	25,0	20,0	0,13
S21	100,0	105,0	30,0	20,0	0,25

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Realizando as verificações de estabilidade (tombamento e escorregamento), compressão diagonal, esforço cortante e fendilhamento. É possível observar que na área de base existem apenas tensões de compressão (**Tabela 8**).

Tabela 8 – Resultados do TQS: Verificações, Tensões e a Taxa de Aço

RESULTADOS OBTIDOS PELO TQS				
Sapata	Verificações	Tensão (Kgf/cm ²)		Taxa de aço (Kgf/m ³)
		$\sigma_{\text{máx}}$	$\sigma_{\text{méd}}$	
S1	Ok	1,18	0,88	33,80
S2	Ok	1,15	0,90	36,80
S3	Ok	1,13	1,06	34,10
S4	Ok	1,13	0,91	34,10
S5	Ok	0,55	0,42	39,30
S6	Ok	1,15	1,09	36,70
S7	Ok	1,18	1,06	36,80
S8	Ok	1,13	1,08	35,00
S9	Ok	1,13	0,96	34,00
S10	Ok	1,13	1,06	33,70
S11	Ok	1,17	1,11	40,30
S12	Ok	1,14	1,11	36,50
S13	Ok	1,17	1,08	36,00
S14	Ok	1,08	0,84	37,20
S15	Ok	1,15	1,03	35,00
S16	Ok	1,19	1,03	34,40
S17	Ok	1,19	1,11	34,50
S18	Ok	1,06	0,94	38,30
S19	Ok	0,99	0,77	38,80
S20	Ok	1,05	0,56	40,50
S21	Ok	1,16	0,94	38,30

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

A **Tabela 9** possui a descrição das armaduras de flexão. O detalhamento de cada sapata se encontra no apêndice, nas páginas 96 à 105. Todavia a tabela de aço fornecida se encontra nas páginas 106 e 107.

Tabela 9 – Resultados do TQS: Disposição das armaduras

RESULTADOS OBTIDOS PELO TQS		
DISPOSIÇÃO DAS ARMADURAS DE FLEXÃO		
Sapata	Direção A	Direção B
S1	11 \varnothing 8.0 c/10	13 \varnothing 8.00 c/10
S2	11 \varnothing 10.0 c/14	9 \varnothing 10.0 c/ 14
S3	11 \varnothing 8.0 c/10	9 \varnothing 10.0 c/ 16
S4	11 \varnothing 8.0 c/10	9 \varnothing 10.0 c/ 16
S5	7 \varnothing 8.0 c/ 13	6 \varnothing 8.0 c/ 11
S6	9 \varnothing 10.0 c/ 14	11 \varnothing 10.0 c/14
S7	11 \varnothing 10.0 c/ 13	13 \varnothing 10.0 c/ 13
S8	12 \varnothing 8.0 c/ 10	13 \varnothing 8.0 c/ 10
S9	12 \varnothing 8.0 c/ 10	10 \varnothing 8.0 c/11
S10	13 \varnothing 8.0 c/ 10	10 \varnothing 8.0 c/11
S11	7 \varnothing 8.0 c/ 11	8 \varnothing 8.0 c/ 12
S12	10 \varnothing 10.0 c/ 15	9 \varnothing 10.0 c/ 14
S13	11 \varnothing 10.0 c/ 14	9 \varnothing 10.0 c/ 14
S14	8 \varnothing 8.0 c/ 12	10 \varnothing 8.0 c/ 12
S15	11 \varnothing 8.0 c/11	8 \varnothing 8.0 c/ 12
S16	10 \varnothing 8.0 c/ 11	13 \varnothing 8.0 c/ 10
S17	11 \varnothing 8.0 c/ 10	13 \varnothing 8.0 c/ 10
S18	5 \varnothing 8.0 c/ 14	6 \varnothing 8.0 c/ 14
S19	8 \varnothing 8.0 c/ 12	6 \varnothing 8.0 c/ 12
S20	7 \varnothing 8.0 c/ 11	7 \varnothing 8.0 c/ 11
S21	10 \varnothing 8.0 c/ 11	10 \varnothing 8.0 c/11

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

7.4.2 Resultados fornecidos pelo CEB-70

Utilizando o Mapa de carga (**Tabela 6**) fornecido pelo software TQS foi possível realizar o dimensionamento por uma planilha eletrônica no Excel (**Figura 40**). A seguir será apresentado os resultados obtidos no procedimento de cálculo.

I. Estimativa das dimensões

As novas dimensões adotadas passaram nas verificações, em que a nova área da sapata seja superior ou igual a área mínima calculada ($S_{\text{sap}} \leq \text{Área}$). Como também sua altura o suficiente para ancoragem do pilar na sapata, e que ela possua um comportamento rígido, sem se preocupar com a ruptura por punção (**Tabela 10**).

Tabela 10 – Resultados pelo CEB-70: Dimensões e Geometria

DIMENSIONAMENTO E GEOMETRIA									
Fundação	A (cm)	B (cm)	Área (cm ²)	h (cm) (adotado)	tg β (°)	Comportamento Estrutural	h ₀ (cm)	d (cm)	Vol (m ³)
S1	125,00	115,00	14375,00	35,00	44,56	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,34
S2	140,00	120,00	16800,00	40,00	43,24	Sapata Rígida	15,00	36,00	0,44
S3	135,00	110,00	14850,00	35,00	46,64	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,37
S4	140,00	115,00	16100,00	35,00	44,56	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,40
S5	115,00	100,00	11500,00	35,00	46,64	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,28
S6	145,00	120,00	17400,00	40,00	43,24	Sapata Rígida	15,00	36,00	0,45
S7	150,00	145,00	21750,00	40,00	41,67	Sapata Rígida	15,00	36,00	0,56
S8	125,00	115,00	14375,00	35,00	41,78	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,35
S9	115,00	100,00	11500,00	35,00	46,64	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,28
S10	145,00	120,00	17400,00	50,00	54,05	Sapata Rígida	15,00	46,00	0,53
S11	115,00	100,00	11500,00	40,00	53,30	Sapata Rígida	15,00	36,00	0,30
S12	130,00	125,00	16250,00	40,00	47,75	Sapata Rígida	15,00	36,00	0,42
S13	145,00	130,00	18850,00	40,00	43,24	Sapata Rígida	15,00	36,00	0,49
S14	145,00	115,00	16675,00	35,00	41,78	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,41
S15	125,00	100,00	12500,00	35,00	46,64	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,30
S16	130,00	100,00	13000,00	35,00	46,64	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,32
S17	135,00	110,00	14850,00	35,00	41,78	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,36
S18	115,00	85,00	9775,00	35,00	55,70	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,24
S19	125,00	110,00	13750,00	45,00	53,71	Sapata Rígida	15,00	41,00	0,39
S20	90,00	90,00	8100,00	35,00	55,70	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,20
S21	100,00	100,00	10000,00	35,00	48,91	Sapata Rígida	15,00	31,00	0,24

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

II. Excentricidade

Com o auxílio das equações apresentadas anteriormente no tópico 6.3.6 foi possível conhecer o posicionamento da aplicação da força dentro do núcleo central de inércia, o que significa que as seções das sapatas estavam comprimidas e não existiu tração em sua base (**Tabela 11**).

Tabela 11 – Resultados pelo CEB-70: Excentricidade

Fundação	EXCENTRICIDADE		
	e_x (cm)	e_y (cm)	Posição da aplicação da carga vertical em relação ao núcleo de inércia
S1	3,17	0,83	Duas direção
S2	0,61	2,57	Duas direção
S3	0,68	0,19	Duas direção
S4	3,82	0,15	Duas direção
S5	0,48	2,38	Duas direção
S6	0,75	0,10	Duas direção
S7	0,96	0,54	Duas direção
S8	0,24	0,18	Duas direção
S9	1,63	0,57	Duas direção
S10	1,23	0,07	Duas direção
S11	0,14	0,14	Duas direção
S12	0,32	0,21	Duas direção
S13	1,11	0,19	Duas direção
S14	2,36	2,48	Duas direção
S15	1,91	0,18	Duas direção
S16	1,22	0,43	Duas direção
S17	0,99	0,12	Duas direção
S18	0,00	0,62	Uma direção
S19	0,86	1,72	Duas direção
S20	6,89	0,63	Duas direção
S21	0,00	2,37	Uma direção

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

V. Tensões Atuantes

Na **Tabela 12** é possível observar os valores das tensões verificando a condição estabelecida em que a máxima tensão da sapata é menor que a tensão admissível do solo ($\sigma_{\max} < \sigma_{\text{adm}}$). Para uma melhor visualização, a **Figura 42** nos mostra onde estão localizadas essas tensões quando há excentricidade em uma direção e na **Figura 43** quando há excentricidade em duas direções.

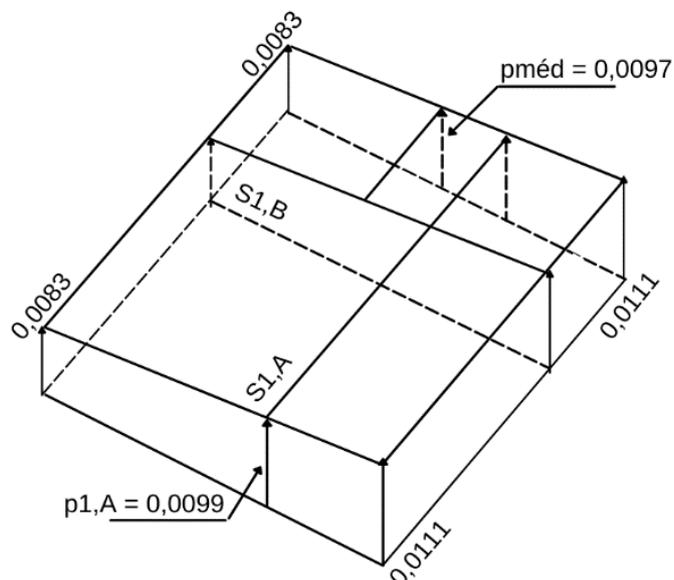
Tabela 12 – Resultados pelo CEB-70: Tensões Atuantes na Base das Sapatas

Fundação	TENSÕES (kN/cm ²)				Verificação ($\sigma_{\max} < \sigma_{\text{adm}}$)
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	
S1	0,0110	0,0102	0,0082	0,0074	Ok
S2	0,0112	0,0087	0,0107	0,0082	Ok
S3	0,0113	0,0111	0,0107	0,0105	Ok
S4	0,0099	0,0098	0,0071	0,0070	Ok
S5	0,0021	0,0016	0,0020	0,0015	Ok
S6	0,0119	0,0118	0,0112	0,0111	Ok
S7	0,0117	0,0112	0,0109	0,0104	Ok
S8	0,0118	0,0116	0,0116	0,0113	Ok
S9	0,0119	0,0112	0,0101	0,0094	Ok
S10	0,0089	0,0088	0,0080	0,0080	Ok
S11	0,0063	0,0061	0,0062	0,0061	Ok
S12	0,0119	0,0117	0,0116	0,0114	Ok
S13	0,0116	0,0114	0,0105	0,0104	Ok
S14	0,0062	0,0049	0,0052	0,0039	Ok
S15	0,0097	0,0095	0,0081	0,0079	Ok
S16	0,0116	0,0110	0,0104	0,0098	Ok
S17	0,0115	0,0113	0,0105	0,0104	Ok
S18	0,0051	0,0	0,0	0,0048	Ok
S19	0,0038	0,0032	0,0036	0,0029	Ok
S20	0,0059	0,0056	0,0023	0,0020	Ok
S21	0,0111	0,0	0,0	0,0083	Ok

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Figura 42 – Excentricidade em Uma Direção: Tensões na base da sapata (kN/cm²)

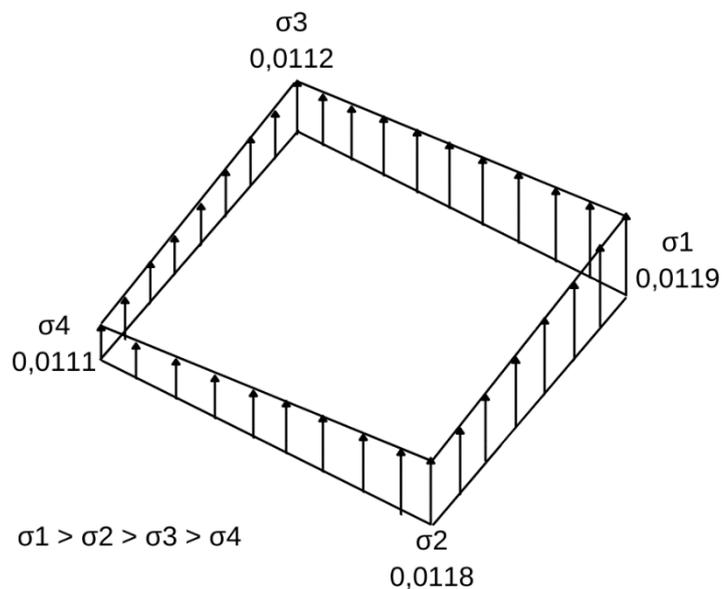
S21



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Figura 43 – Excentricidade em Duas Direções: Tensões nos vértices da sapata (kN/cm²).

S6



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Vale ressaltar novamente que as cargas atuantes na horizontal foram descartadas por serem muito pequenas. E como não há tensões de tração atuando nas

bases das sapatas, não existe a possibilidade de giro na fundação e não há tombamento, por isso não foi considerado esses cálculos nesse projeto.

VI. Armadura de Flexão

Nas **Tabela 13** e **Tabela 14** podem ser observados os valores obtidos, foram divididas em relação ao tipo de excentricidade para uma melhor compreensão. As **Figura 44** e **Figura 45** apresentam onde esses esforços estão aplicados.

Tabela 13 – Resultados pelo CEB-70: Armadura de Flexão Oblíqua

ARMADURA DE FLEXÃO										
Fundação	Verificação se o método é aplicado		A				B			
	$h/2 \leq c \leq 2h$	$d \leq 1,5C$	X_A (cm)	Duas direções		$A_{s,A}$ (cm ²)	X_B (cm)	Duas direções		$A_{s,B}$ (cm ²)
				p_A (kN.cm ²)	$M_{A,d}$ (kN.cm ²)			p_B (kN.cm ²)	$M_{B,d}$ (kN.cm ²)	
S1	Ok	Ok	50,25	0,01061	2155,84	1,88	53,10	0,0096	2369,14	2,07
S2	Ok	Ok	58,25	0,01000	2849,85	2,14	55,10	0,0110	3270,96	2,46
S3	Ok	Ok	50,50	0,01124	2207,06	1,93	46,75	0,0110	2276,08	1,99
S4	Ok	Ok	52,50	0,00984	2182,48	1,91	48,75	0,0085	1983,63	1,73
S5	Ok	Ok	47,50	0,00187	295,57	0,26	45,10	0,0021	341,71	0,30
S6	Ok	Ok	59,00	0,01188	3472,75	2,61	55,10	0,0116	3567,60	2,68
S7	Ok	Ok	61,00	0,01145	4324,15	3,25	68,10	0,0113	5489,64	4,13
S8	Ok	Ok	52,50	0,01172	2600,03	2,27	50,85	0,0117	2645,68	2,31
S9	Ok	Ok	47,50	0,01157	1827,61	1,60	45,10	0,0110	1805,96	1,58
S10	Ok	Ok	59,00	0,00885	2588,42	1,52	55,10	0,0085	2604,80	1,53
S11	Ok	Ok	47,50	0,00620	979,10	0,74	45,10	0,0062	1016,17	0,76
S12	Ok	Ok	53,25	0,01182	2932,82	2,20	58,10	0,0118	3614,99	2,72
S13	Ok	Ok	59,00	0,01146	3630,72	2,73	60,10	0,0111	4052,86	3,05
S14	Ok	Ok	55,50	0,00558	1384,65	1,21	51,00	0,0057	1516,67	1,32
S15	Ok	Ok	49,00	0,00961	1615,09	1,41	45,10	0,0089	1583,84	1,38
S16	Ok	Ok	51,00	0,01129	2055,45	1,79	45,10	0,0110	2029,14	1,77
S17	Ok	Ok	54,00	0,01141	2561,95	2,24	50,10	0,0110	2610,29	2,28
S19	Ok	Ok	52,50	0,00352	747,59	0,49	50,10	0,0037	812,67	0,54
S20	Ok	Ok	38,85	0,00575	546,89	0,48	38,85	0,0041	390,37	0,34

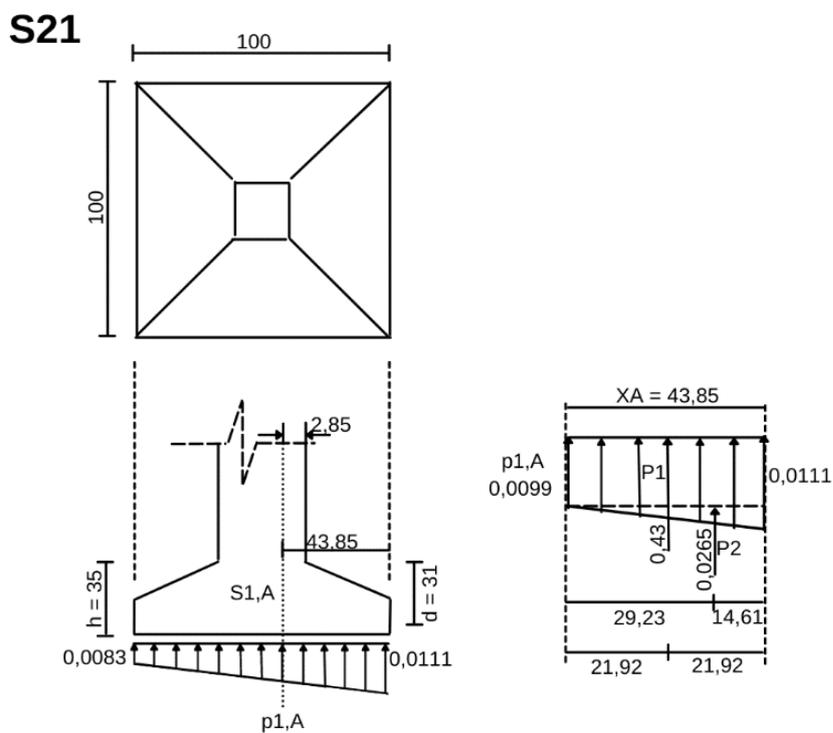
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Tabela 14 – Resultados pelo CEB-70: Armadura de Flexão Normal

ARMADURA DE FLEXÃO												
Fundação	Verificação se o método é aplicado		A						B			
	$h/2 \leq c \leq 2h$	$d \leq 1,5C$	X_A (cm)	Uma direção				$A_{s,A}$ (cm ²)	X_B (cm)	Uma direção		$A_{s,B}$ (cm ²)
				$p_{1,A}$ (kN/cm ²)	P_1 (kN)	P_2 (kN)	$M_{1A,d}$ (kN.cm ²)			$p_{méd}$ (kN/cm ²)	$M_{1B,d}$ (kN.cm ²)	
S18	Ok	Ok	47,50	0,0050	0,24	0,0031	678,91	0,59	38,10	0,0049	577,40	0,50
S21	Ok	Ok	43,85	0,0099	0,43	0,0265	1437,31	1,25	43,85	0,0097	1305,87	1,14

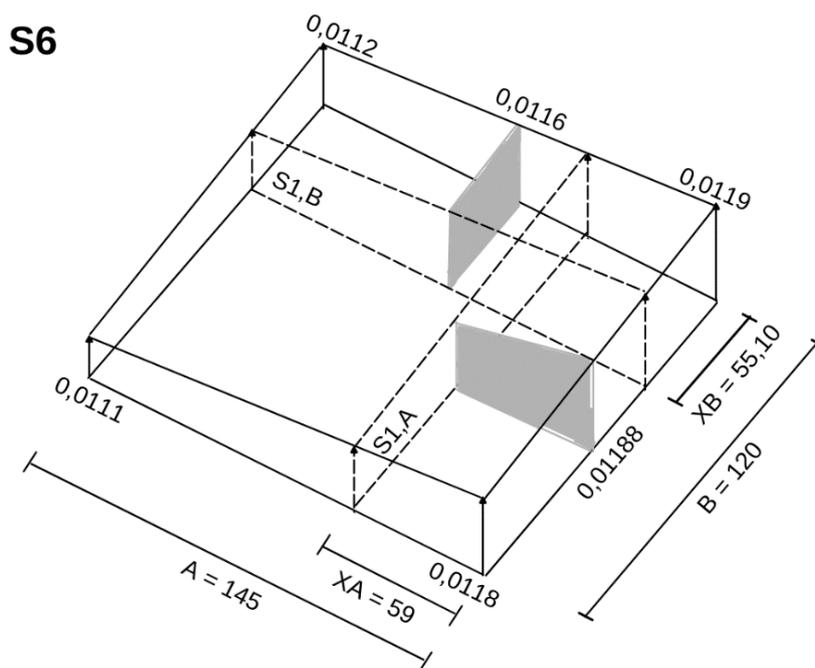
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Figura 44 – Flexão Normal: Seção de referência S_{1A} e valores das tensões do solo (kN/cm²)



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Figura 45 – Flexão Oblíqua: Tensões na base da sapata (kN/cm²) e seções de referência S₁



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

III. Compressão Diagonal

Nenhuma sapata apresentou esmagamento do concreto como mostra a **Tabela 15**, pois a condição **55** se satisfaz.

Tabela 15 – Resultados pelo CEB-70: Compressão Diagonal

TENSÃO DE COMPRESSÃO DIAGONAL					
Fundação	u_0 (cm)	F_{sd} (kN)	τ_{sd} (MPa)	$\tau_{Rd,2}$ (MPa)	Verificação $\tau_{sd} \leq \tau_{Rd,2}$
S1	98,00	176,40	0,581	4,34	ok
S2	98,00	218,26	0,619	4,34	ok
S3	150,00	216,02	0,465	4,34	ok
S4	150,00	181,44	0,390	4,34	ok
S5	88,00	28,00	0,103	4,34	ok
S6	108,00	267,26	0,687	4,34	ok
S7	108,00	319,76	0,955	4,34	ok
S8	98,00	222,04	0,731	4,34	ok
S9	88,00	163,52	0,599	4,34	ok
S10	108,00	195,44	0,393	4,34	ok
S11	88,00	94,36	0,298	4,34	ok
S12	98,00	252,42	0,715	4,34	ok
S13	108,00	275,38	0,708	4,34	ok
S14	140,00	113,12	0,261	4,34	ok
S15	108,00	146,72	0,438	4,34	ok
S16	108,00	185,22	0,553	4,34	ok
S17	108,00	216,44	0,646	4,34	ok
S18	88,00	64,40	0,236	4,34	ok
S19	88,00	62,02	0,172	4,34	ok
S20	76,00	42,56	0,181	4,34	ok
S21	76,00	129,36	0,549	4,34	ok

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

IV. Detalhamento das Armaduras

A **Tabela 16** mostra o resumo do detalhamento das armaduras e a **Figura 46** a representação da disposição na base da sapata S1. Tendo em vista que as bitolas

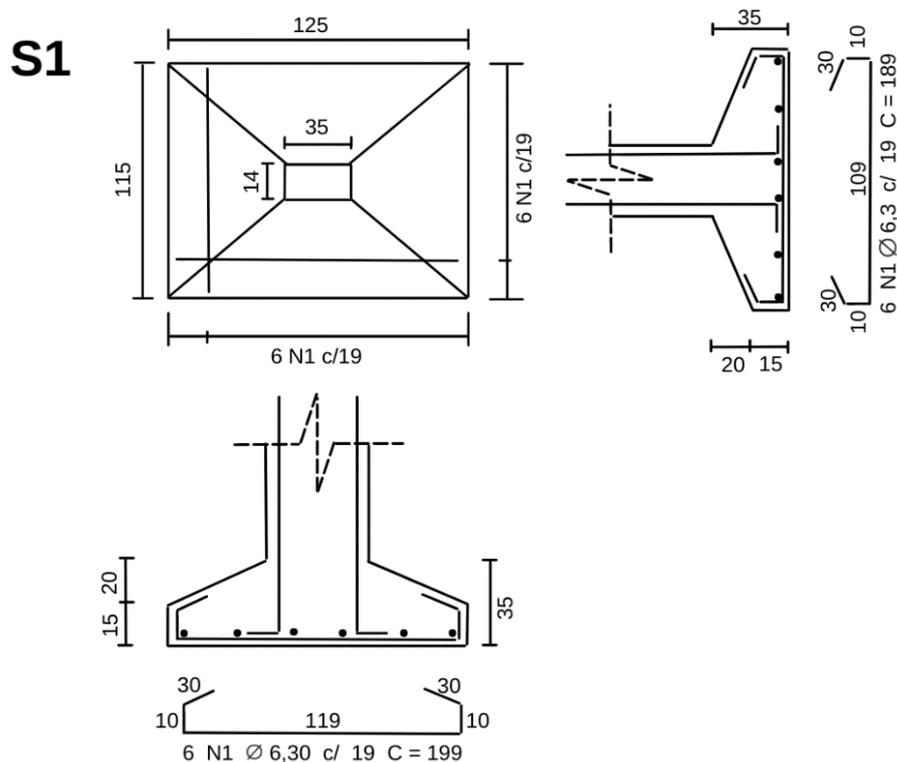
das armaduras são inferiores a 25 mm, não houve a necessidade verificar a sua aderência no concreto.

Tabela 16 – Resultados pelo CEB-70: Descrição das Armaduras de Flexão

DETALHAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO				
Fundação	Dimensão A		Dimensão B	
	As (cm ² /m)	Descrição	As (cm ² /m)	Descrição
S1	1,65	6 φ 6,30 c/ 19,00 cm	1,64	6 φ 6,30 c/ 19,00 cm
S2	1,76	8 φ 6,30 c/ 17,50 cm	1,79	7 φ 6,30 c/ 17,50 cm
S3	1,47	6 φ 6,30 c/ 20,00 cm	1,75	5 φ 6,30 c/ 18,00 cm
S4	1,24	7 φ 6,30 c/ 20,00 cm	1,66	5 φ 6,30 c/ 19,00 cm
S5	0,26	5 φ 6,30 c/ 20,00 cm	0,26	5 φ 6,30 c/ 20,00 cm
S6	1,85	8 φ 6,30 c/ 17,00 cm	2,18	7 φ 6,30 c/ 14,00 cm
S7	2,75	13 φ 6,30 c/ 11,00 cm	2,24	13 φ 6,30 c/ 14,00 cm
S8	1,85	7 φ 6,30 c/ 17,00 cm	1,97	6 φ 6,30 c/ 16,00 cm
S9	1,37	5 φ 6,30 c/ 20,00 cm	1,60	5 φ 6,30 c/ 19,00 cm
S10	1,06	7 φ 6,30 c/ 20,00 cm	1,27	6 φ 6,30 c/ 20,00 cm
S11	0,66	5 φ 6,30 c/ 20,00 cm	0,74	5 φ 6,30 c/ 20,00 cm
S12	2,09	8 φ 6,30 c/ 15,00 cm	1,76	8 φ 6,30 c/ 17,50 cm
S13	2,10	9 φ 6,30 c/ 15,00 cm	2,10	8 φ 6,30 c/ 15,00 cm
S14	0,91	7 φ 6,30 c/ 20,00 cm	1,05	5 φ 6,30 c/ 20,00 cm
S15	1,11	6 φ 6,30 c/ 20,00 cm	1,41	5 φ 6,30 c/ 20,00 cm
S16	1,36	6 φ 6,30 c/ 20,00 cm	1,79	5 φ 6,30 c/ 17,50 cm
S17	1,69	7 φ 6,30 c/ 18,00 cm	2,03	6 φ 6,30 c/ 15,00 cm
S18	0,44	5 φ 6,30 c/ 20,00 cm	0,70	4 φ 6,30 c/ 20,00 cm
S19	0,43	6 φ 6,30 c/ 20,00 cm	0,45	5 φ 6,30 c/ 20,00 cm
S20	0,38	4 φ 6,30 c/ 20,00 cm	0,53	4 φ 6,30 c/ 20,00 cm
S21	1,14	5 φ 6,30 c/ 20,00 cm	1,25	5 φ 6,30 c/ 20,00 cm

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Figura 46 – Detalhamento das Armaduras de Flexão da Sapata (cm)



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

7.4.3 Comparativo entre metodologias

Inicialmente a análise comparativa toma como base a utilização da variação percentual feita individualmente para cada sapata, dividida em três categorias: área da base, volume de concreto e peso do aço. O parâmetro de referência para o comparativo é o TQS, na expressão 64 é possível visualizar como é utilizado.

$$\% = \frac{\text{TQS} - \text{CEB 70}}{\text{TQS}} \times 100 \quad 64$$

Posteriormente, é verificado o impacto financeiro que cada metodologia proporciona ao projeto.

I. Área da base (m²)

De início é possível observar que não existe muita discrepância de metodologia em relação a área da base de cada elemento de fundação (**Tabela 17**).

Analisando individualmente a maior divergência é encontrada nas sapatas S5, S11, S14, S18 e S19, exatamente por alguns fatores que tiveram que ser levados em consideração nas dimensões adotadas pelo método CEB-70, critérios como:

- A área adotada maior ou igual que área mínima calculada ($\text{Área} \geq S_{\text{sap}}$);
- A maior tensão atuante na sua base, seja menor que a tensão admissível ($\sigma_{\text{max}} < \sigma_{\text{adm}}$);

Empregando como referência a média de todas as sapatas e verificando seu percentual conclui-se um aumento de 8,86% da área da base pelo método CEB-70 em relação ao software TQS.

Tabela 17 – Comparativo: Área da Base (m²)

COMPARATIVO			
Sapata	Área da base (m ²)		
	TQS	CEB-70	%
S1	1,55	1,44	-7,41
S2	1,88	1,68	-10,40
S3	1,55	1,49	-4,35
S4	1,55	1,61	3,70
S5	0,55	1,15	108,14
S6	1,88	1,74	-7,20
S7	2,31	2,18	-5,84
S8	1,56	1,44	-7,85
S9	1,31	1,15	-12,38
S10	1,42	1,74	22,75
S11	0,68	1,15	70,37
S12	1,74	1,63	-6,61
S13	1,94	1,89	-2,71
S14	1,04	1,67	61,11
S15	1,08	1,25	15,74
S16	1,37	1,30	-4,76
S17	1,49	1,49	0,00
S18	0,52	0,98	87,98
S19	0,63	1,38	118,25
S20	0,60	0,81	35,00
S21	1,05	1,00	-4,76
MÉDIA	1,32	1,43	8,86

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

II. Volume de Concreto (m³) (Tabela 18)

Igualmente ao tópico anterior, a divergência que ocorre aqui não é tão grande. Conseqüentemente, se a base da fundação for maior o volume de concreto também será. Mas nesse caso, um fator importante para a determinação do volume é a altura, e esse parâmetro adotado na planilha eletrônica considerou os seguintes critérios:

- Comportamento estrutural, onde as especificações para a sapata ser considerada rígida é mais rigorosa no método do CEB-70 em comparação com a NBR 6118/2014;
- Altura útil para o comprimento de ancoragem do pilar;

Com a média de todas as sapatas e verificando seu percentual conclui-se um aumento de 5,74% do volume do concreto pelo método CEB-70 em relação ao software TQS (Tabela 18).

Tabela 18 – Comparativo: Volume de concreto (m³)

COMPARATIVO			
Sapata	Volume de Concreto (m ³)		
	TQS	CEB-70	%
S1	0,40	0,34	-13,77
S2	0,52	0,44	-16,06
S3	0,42	0,37	-11,20
S4	0,42	0,40	-4,38
S5	0,12	0,28	131,43
S6	0,53	0,45	-14,32
S7	0,69	0,56	-18,83
S8	0,41	0,35	-15,51
S9	0,34	0,28	-18,32
S10	0,37	0,53	43,60
S11	0,15	0,30	102,68
S12	0,49	0,42	-13,66
S13	0,54	0,49	-9,36
S14	0,23	0,41	78,18
S15	0,26	0,30	17,17
S16	0,36	0,32	-12,22
S17	0,39	0,36	-8,23
S18	0,10	0,24	138,61
S19	0,14	0,39	178,34
S20	0,13	0,20	52,70
S21	0,25	0,24	-3,36
MÉDIA	0,35	0,37	5,74

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

III. Peso do aço (kg)

A maior diferença entre as metodologias se encontra na quantidade e peso do aço. Utilizando a média de todas as sapatas e verificando seu percentual concluiu-se uma redução de 50% do peso do aço pelo método CEB-70 em relação ao software TQS (**Tabela 19**).

Isso aconteceu porque o método computacional no cálculo da armadura de flexão admite uma armadura mínima de tração, levando em consideração um momento fletor mínimo (observado no item 7.2). Esse critério é utilizado em elemento lineares, as vigas por exemplo, como a sapata tem uma altura relativa maior e, é um elemento de volume, resultou em valores altos para área de armadura.

Levando em consideração também que o TQS utilizou bitolas de 8 mm e 10 mm e na rotina de cálculo foi adotado diâmetro de 6,3 mm, influenciando no seu peso.

Tabela 19 – Comparativo: Peso do Aço (kg)

COMPARATIVO			
Sapata	Peso do aço (Kg)		
	TQS	CEB-70	%
S1	13,63	5,70	-58,15
S2	19,23	7,89	-58,98
S3	14,19	5,33	-62,46
S4	14,19	5,99	-57,81
S5	4,82	4,45	-7,81
S6	19,23	7,62	-60,38
S7	25,33	14,11	-44,30
S8	14,27	6,19	-56,61
S9	11,62	4,45	-61,73
S10	12,50	7,88	-36,94
S11	6,03	4,69	-22,14
S12	17,77	7,90	-55,54
S13	19,51	8,83	-54,75
S14	8,58	6,07	-29,26
S15	9,17	5,06	-44,83
S16	12,30	5,13	-58,29
S17	13,37	6,29	-52,97
S18	3,98	3,87	-2,56
S19	5,43	5,18	-4,56
S20	5,38	3,21	-40,29
S21	9,66	4,26	-55,88
MÉDIA	12,39	6,20	-50,00

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

IV. Impacto Financeiro

Considerando o volume do concreto e peso do aço utilizados nas sapatas e com assistência do software SEOBRA foi viável obter os valores unitário dos serviços que seriam utilizados para iniciar o orçamento básico do projeto com o serviço de fundações (**Tabela 20**).

Tabela 20 – Orçamento Básico das Fundações

REFERÊNCIA	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	UN	QTD		VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL	
				TQS	CEB-70		TQS	CEB-70
SINAPI	94965	CONCRETO FCK = 25MPA, TRAÇO 1:2,3:2,7 (EM MASSA SECA DE CIMENTO/ AREIA MÉDIA/ BRITA 1) - PREPARO MECÂNICO COM BETONEIRA 400 L. AF_05/2021	M³	7,26	7,68	R\$ 413,19	R\$ 2.999,76	R\$ 3.171,91
ORSE	S00140	Aço CA - 50 Ø 6,3 a 12,5mm, inclusive corte, dobragem, montagem e colocação de ferragens nas formas, para superestruturas e fundações - R1	KG	260,18	130,10	R\$ 13,27	R\$ 3.452,62	R\$ 1.726,36
TOTAL							R\$ 6.452,37	R\$ 4.898,27

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Cogitando apenas esses dois parâmetros, analisando a **Tabela 21** e verificando seu percentual conforme a equação **64** conclui-se uma redução de 24,09% em seu orçamento preliminar com o dimensionamento pelo método CEB-70 em relação ao software TQS.

Tabela 21 – Orçamento Básico Comparativo

VALOR TOTAL		%
TQS	CEB-70	
R\$ 6.452,37	R\$ 4.898,27	-24,09

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Porém, os resultados do software não significam que sempre ocorrerá um superdimensionamento utilizando o mesmo, ou que não seja confiável no dimensionamento. Os programas computacionais possuem o sistema default, onde suas configurações foram pré-determinadas e cabe ao usuário conhecer e modificar os parâmetros conforme a necessidade. Assim, realizando os ajustes é possível obter também a economia utilizando uma metodologia computacional.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho alcançou seu objeto em dimensionar as sapatas isoladas rígidas com cargas excêntricas de um sobrado utilizando o software computacional TQS e uma rotina de cálculo baseada no método CEB-70. Fazendo uma verificação em relação ao estrutural e uma análise comparativa de metodologias a nível educacional.

No decorrer do trabalho foi possível observar que o estudo previamente do solo causa impacto em toda a edificação, e é de suma importância que ele possa garantir segurança em toda a superestrutura. Com o conhecimento sobre a tensão admissível do solo e a distribuição de tensões na base da sapata, é possível realizar um projeto estrutural confiável.

Existem vários métodos possíveis de executar um projeto estrutural (computacional ou planilha) e cabe ao profissional habilitado fazer uso de acordo com o que achar conveniente e tendo domínio sobre as ferramentas que irá utilizar. Levando as considerações das normas técnicas e as recomendações práticas de alguns pesquisadores sobre o assunto.

Não é possível dizer qual metodologia sempre será a mais econômica, nesse trabalho a rotina de cálculo apresentou uma economia em relação ao software, pois o programa apresenta uma configuração pré-definida e ocorrerá um superdimensionamento no projeto de sapatas. Porém, é possível realizar correções em alguns parâmetros e o software pode se tornar tão econômico quanto qualquer rotina de cálculo.

Para isso, é preciso interpretar os resultados obtidos, e conhecer os procedimentos de cálculos que estão sendo executados. É importante o conhecimento teórico em disciplinas como Mecânica Geral, Resistência dos Materiais I e II, Estática I e II, Estrutura de Concreto I, II e III, entre outras para um melhor desenvolvimento na área de estruturas.

Contudo, com o projeto foi possível obter uma visão global no processo de dimensionamento de uma estrutura, e colocar em prática o conhecimento adquirido ao longo do curso. O crescimento e formação profissional na área de estruturas foi atingido em meio ao desenvolvimento desse trabalho, fazendo aplicações dos conhecimentos adquiridos e considerações ao projetar uma edificação real.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR: 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios**. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificações**. Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, L.M. **Edifícios de Concreto Armado – Fundações**. São Paulo, FDTE, EPUSP, fev. 1984, p.10.1-10.16.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. Sapatas de fundação. **Notas de Aula do Curso de Estruturas de Concreto III. UNESP. Bauru**, 2019.

LOPES, Francisco R.; VELLOSO, Dirceu A. **Fundações-Volume único**. Oficina de Textos, 2016.

DE CAMPOS, João Carlos. Elementos de fundações em concreto. Oficina de Textos, 2015.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. Zigurate, 2008.

CARVALHO, Roberto Chust; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: volume 2**. Pini, 2009.

DE ARAÚJO, José Milton. **Curso de concreto armado**. Editora Dunas, 2014.

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Exercícios de fundações**. Editora Blucher, 2019.

BORGES, Alberto Nogueira. **Curso Prático de Cálculo em Concreto Armado- Projetos de Edifícios**. Editora Imperial Novo Milênio, 2015.

FICKS JÚNIOR, Paulo Renato. **Projeto de fundações por sapatas rígidas dimensionadas por software estrutural verificado por metodologia manual**. 2020.

GIACOMASSI, Thales Sanches. **Análise do dimensionamento por software das sapatas de um edifício de múltiplos pavimentos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

VIEIRA, Wendel Silva Rodrigues. **DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO E ESTRUTURAL DE SAPATAS RÍGIDAS**. 2014.

MONTEIRO, João Victor Santos. **Desenvolvimento de aplicação Android para dimensionamento de sapatas rígidas isoladas**. 2020.

LIMA, José Leonilo Romeu de Figueiredo. **Projeto estrutural de fundações superficiais: análise crítica da utilização de programas computacionais**. 2015.

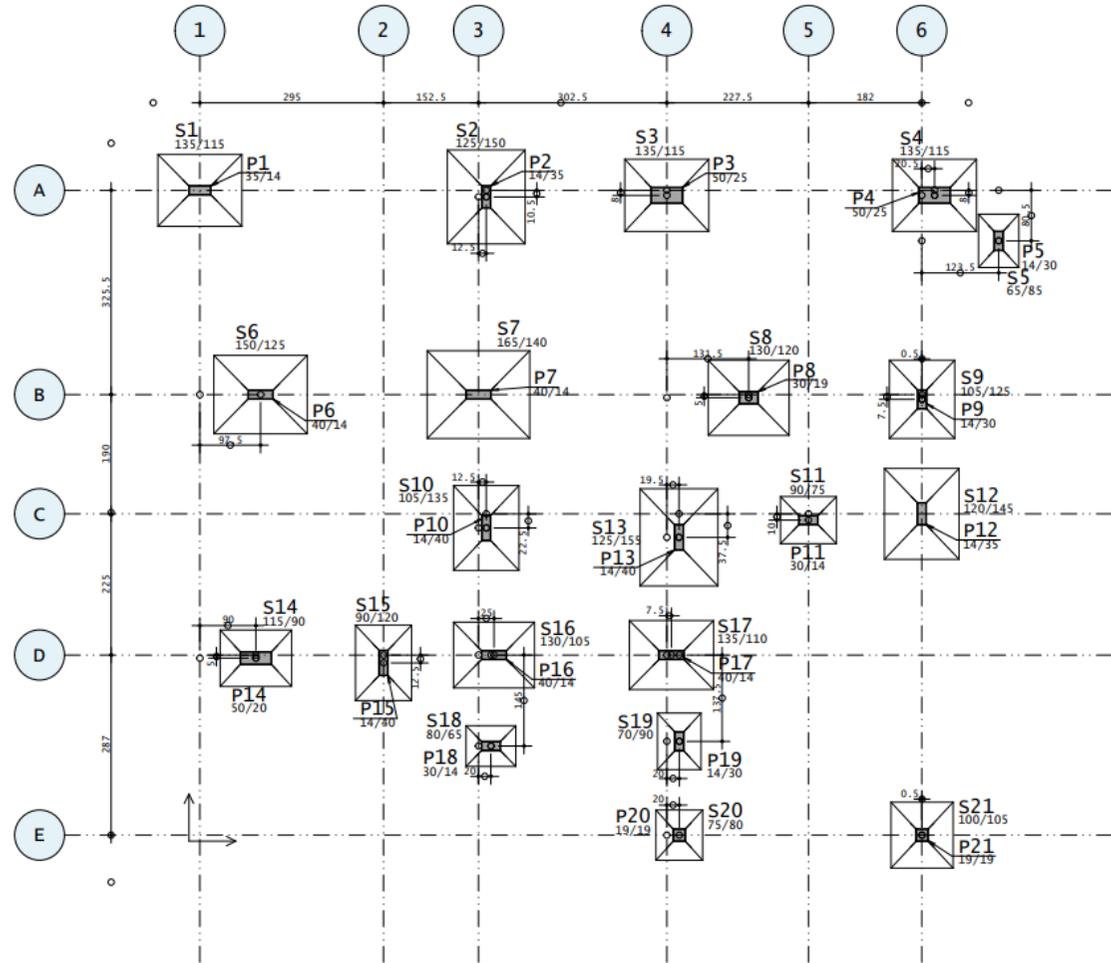
Figueiredo, Brenno Furtado de. **Desenvolvimento de ábacos e tabelas de dimensionamento para sapatas isoladas quadradas**. 2016.

Vieira, Pedro Sanderson Fernandes. **Estudo comparativo entre métodos de dimensionamento, CEB-70 e bielas e tirantes, para sapatas rígidas com cargas centradas**. 2019.

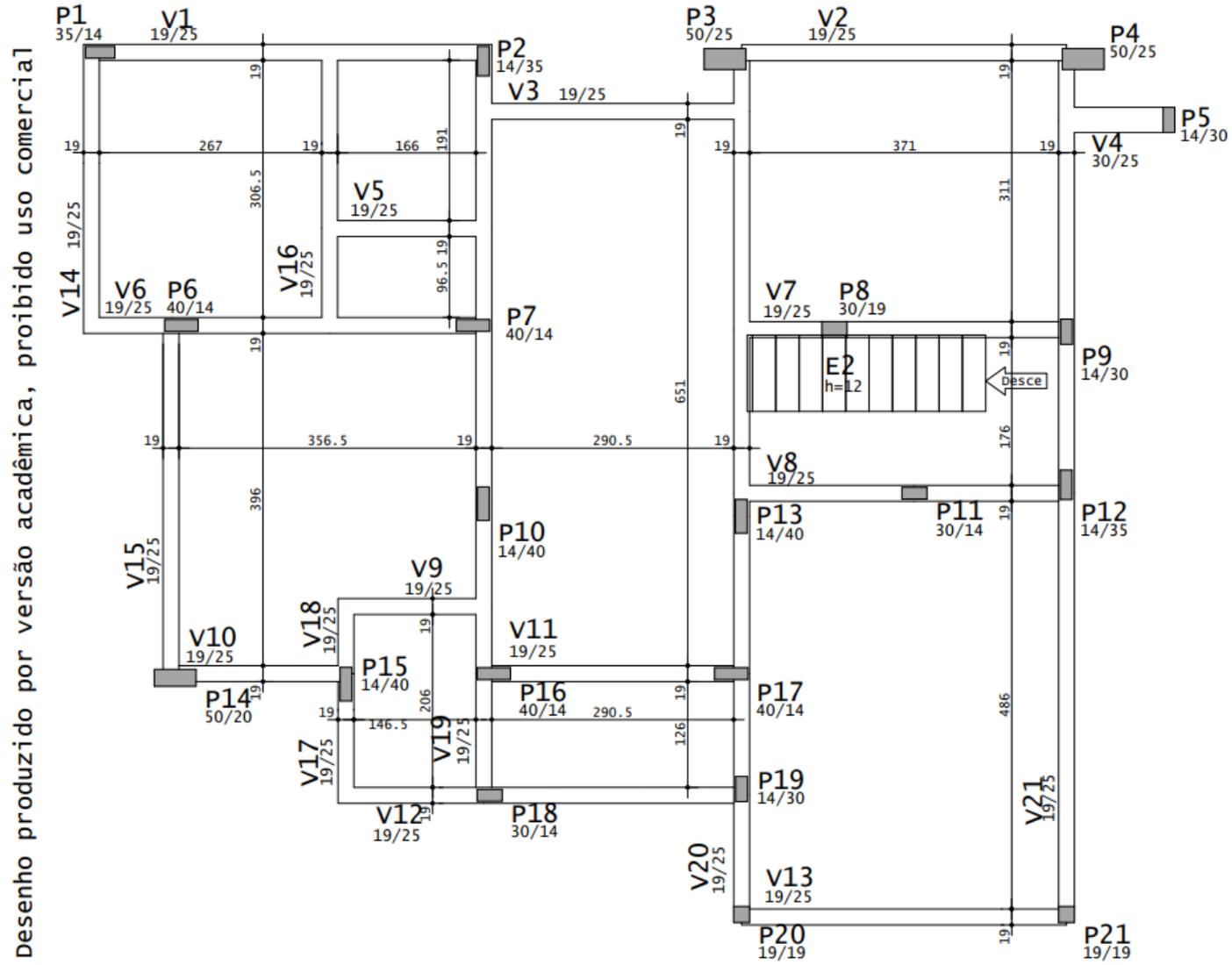
Desenho produzido por versão acadêmica, proibido uso comercial

APÊNDICES

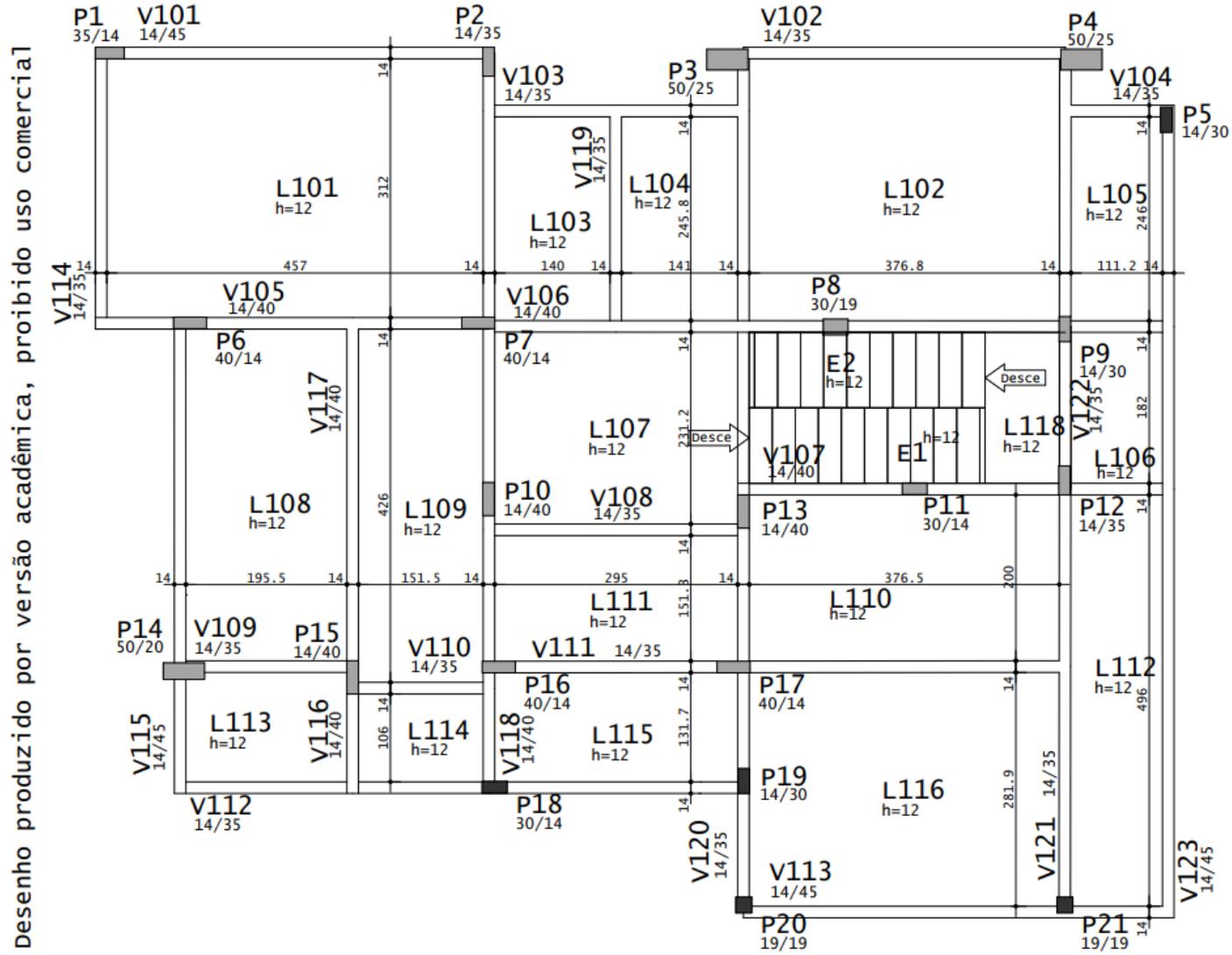
APÊNDICE A – Localização dos Pilares



APÊNDICE B – Planta de fôrma do térreo

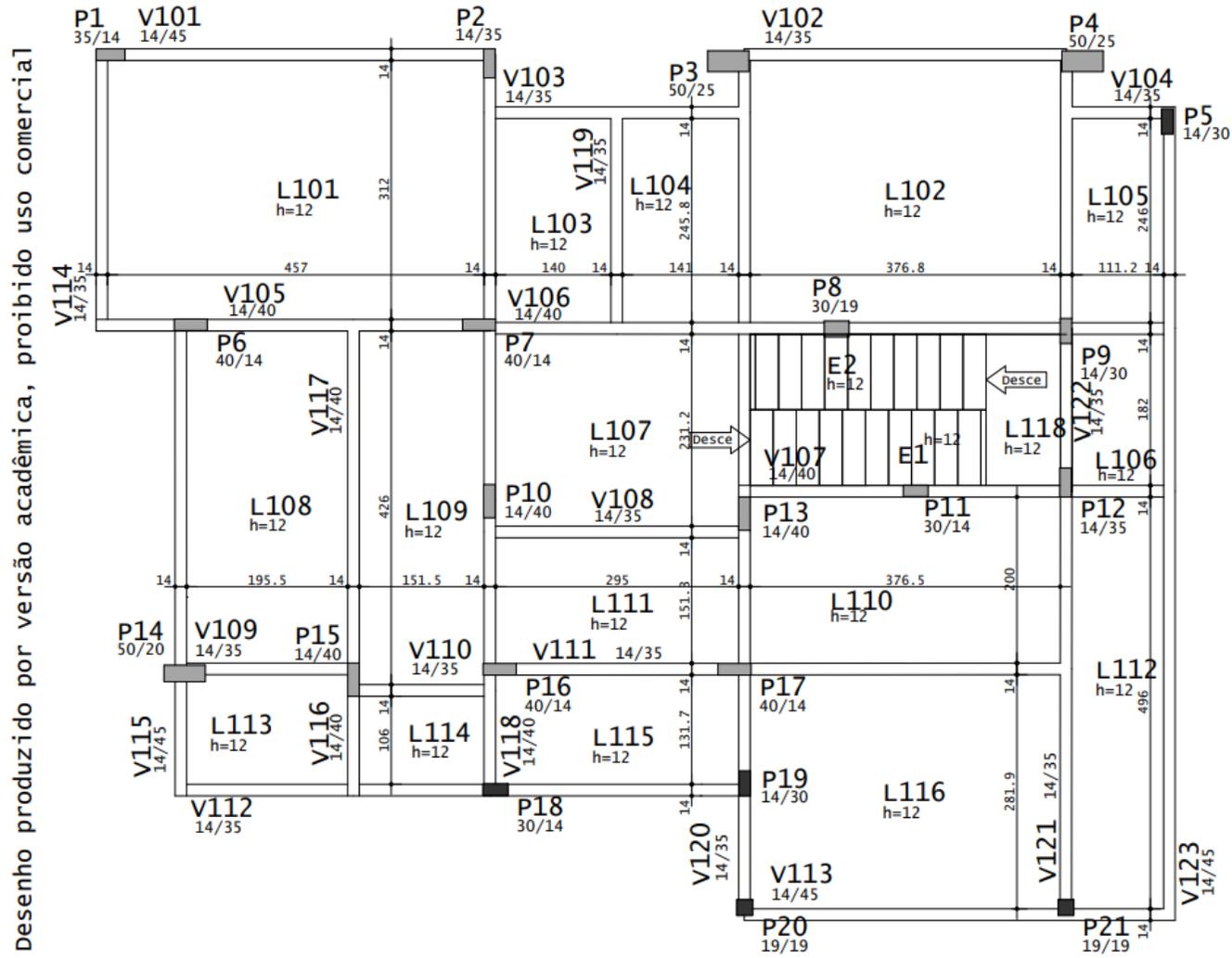


APÊNDICE C – Planta de fôrma do superior

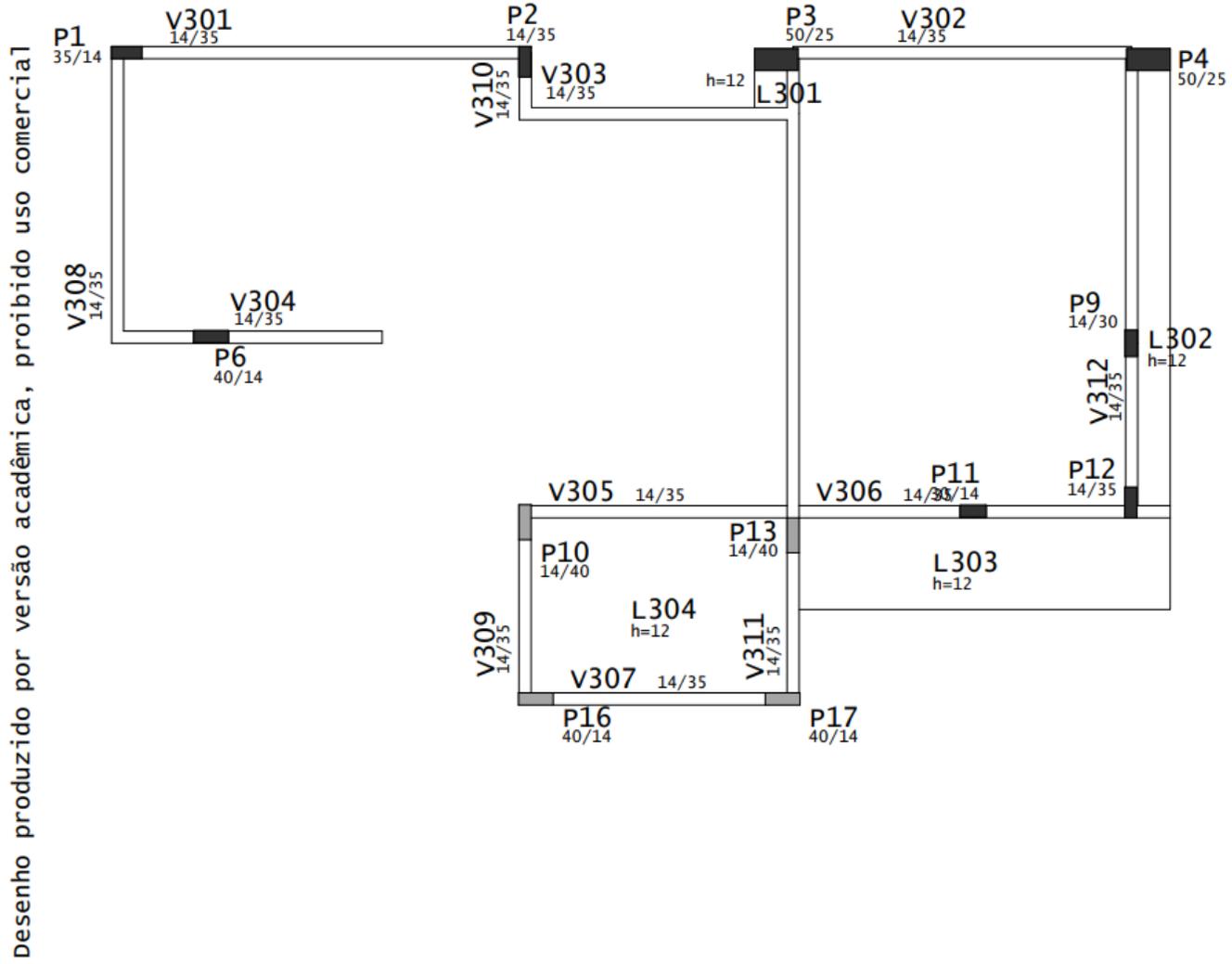


Desenho produzido por versão acadêmica, proibido uso comercial

APÊNDICE D – Planta de fôrma da cobertura

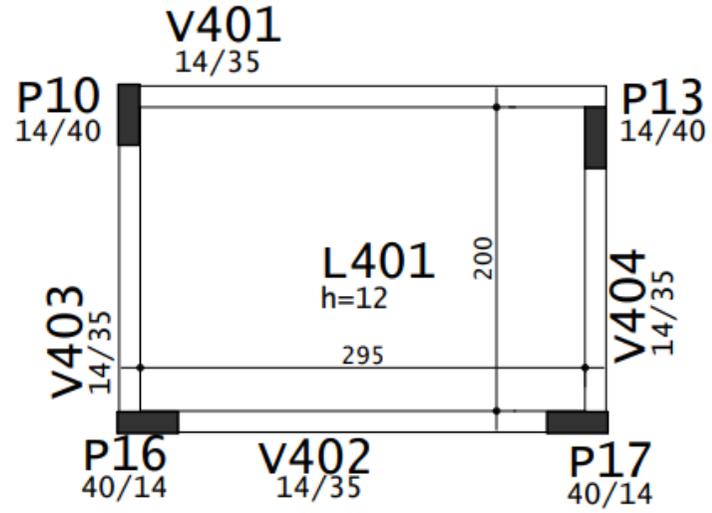


APÊNDICE E – Planta de forma do Nível 1

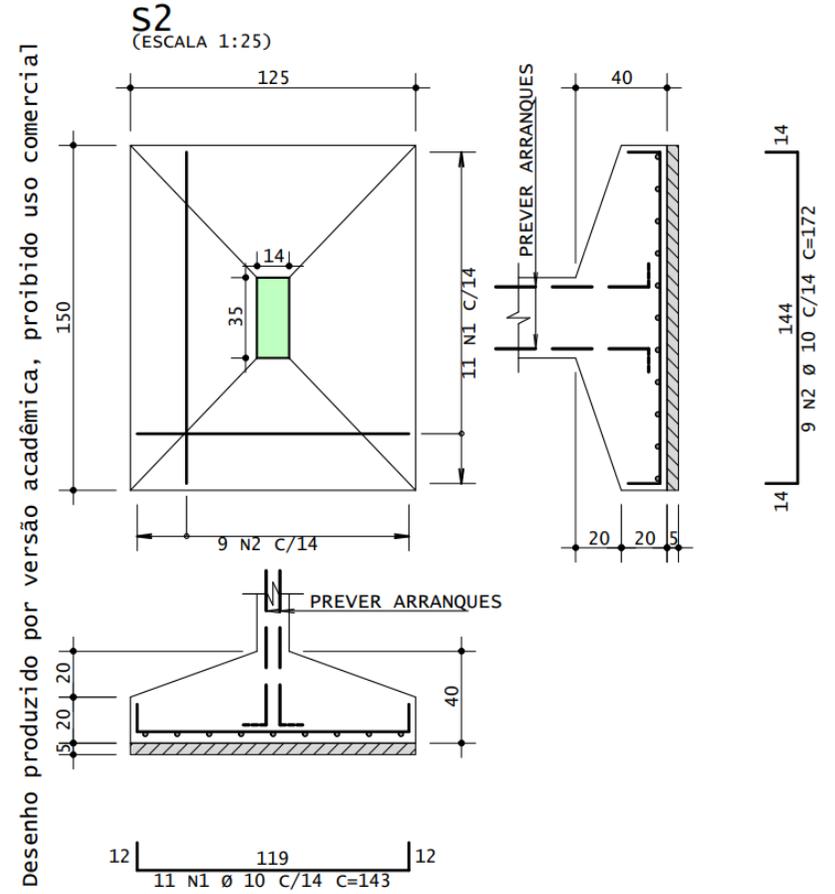
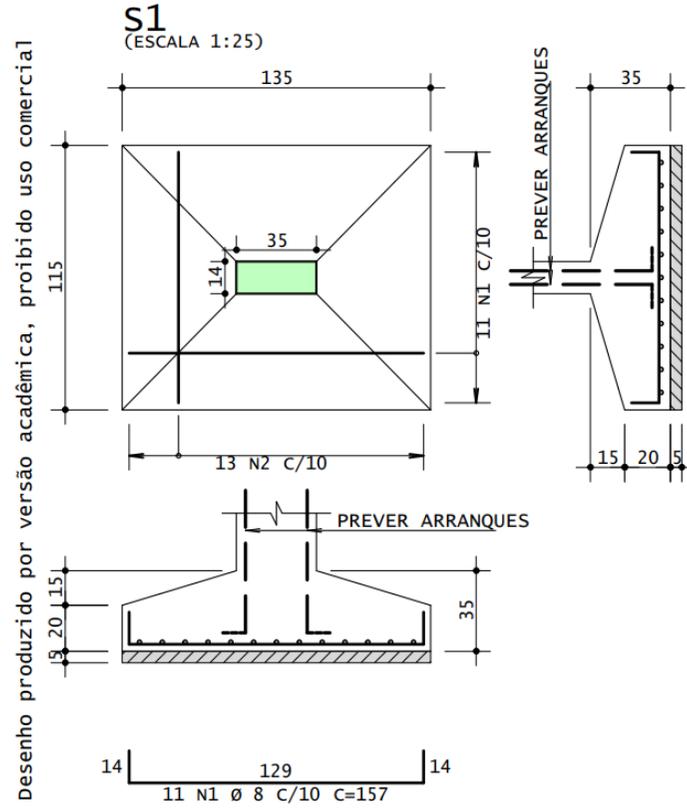


APÊNDICE F – Planta de forma do Reservatório

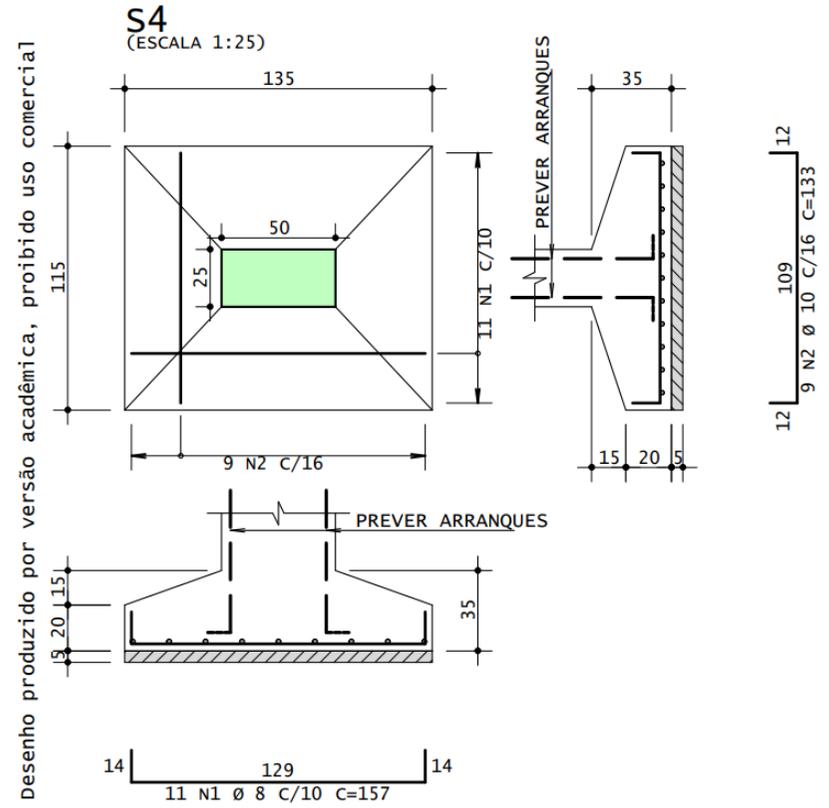
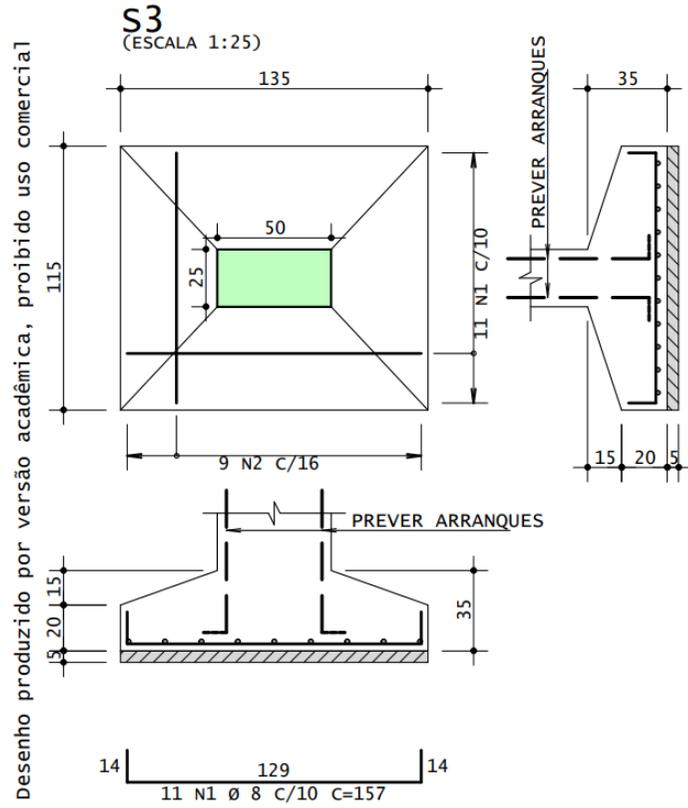
Desenho produzido por versão acadêmica, proibido uso comercial



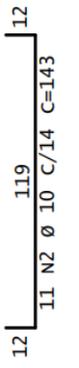
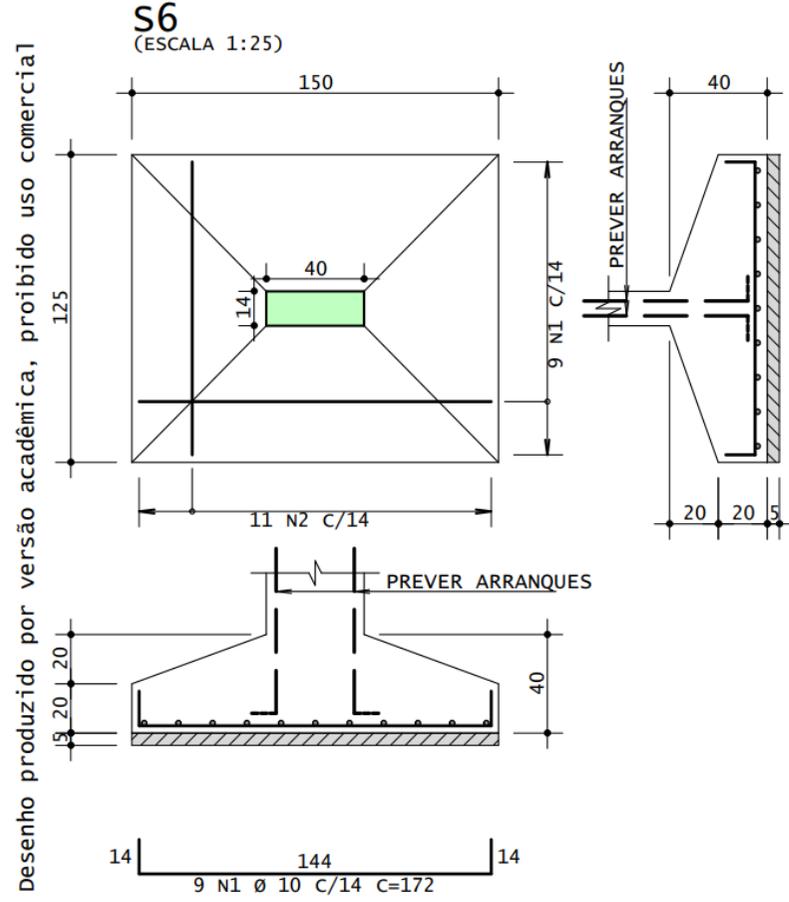
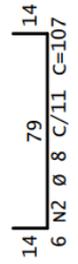
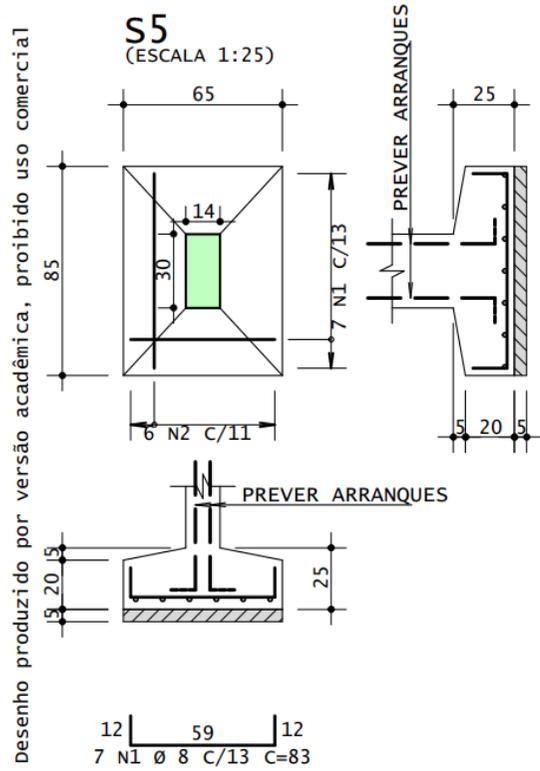
APÊNDICE G – Detalhamento da Armadura de Flexão (S1 e S2)



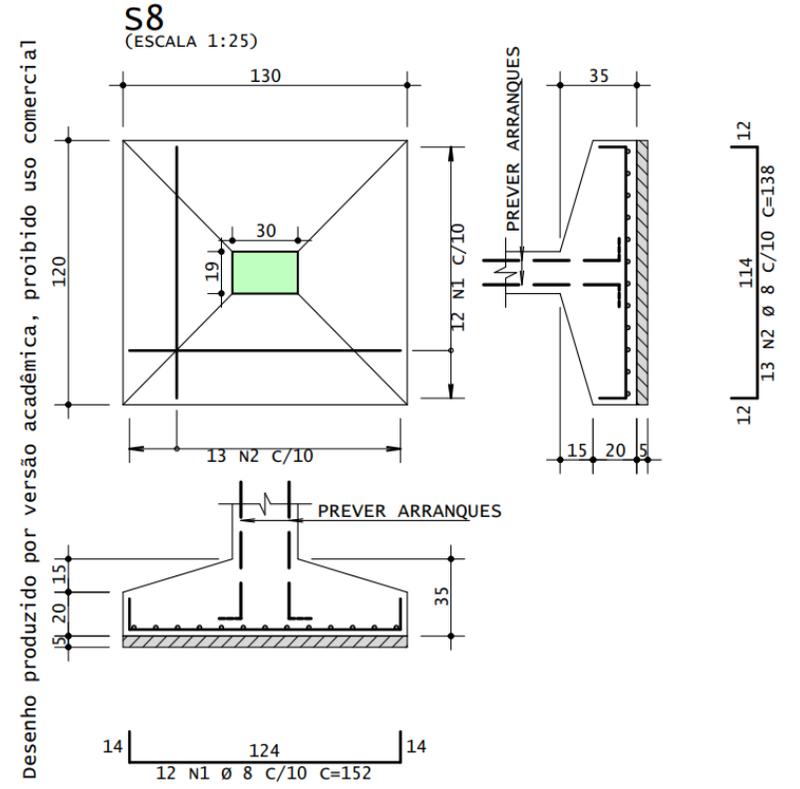
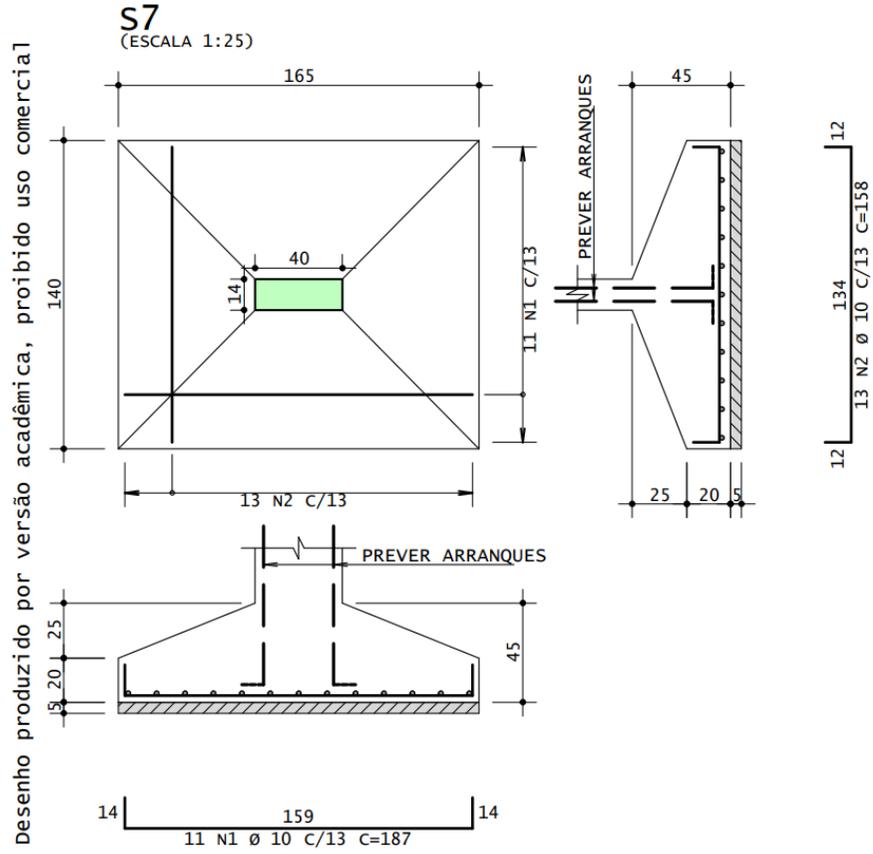
APÊNDICE H – Detalhamento da Armadura de Flexão (S3 e S4)



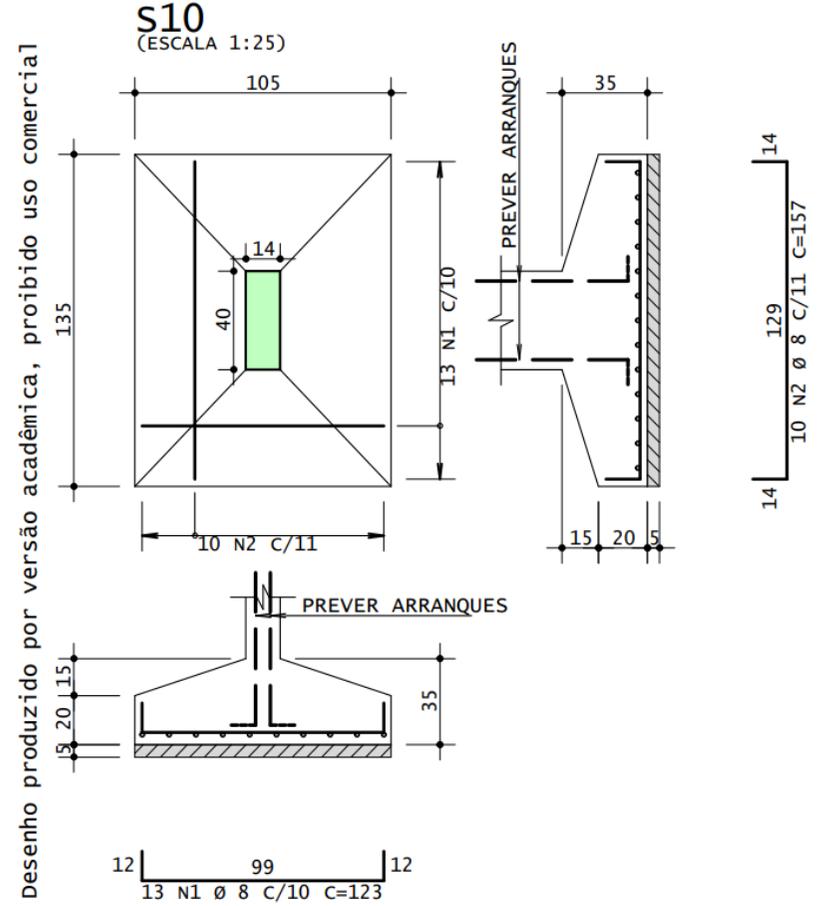
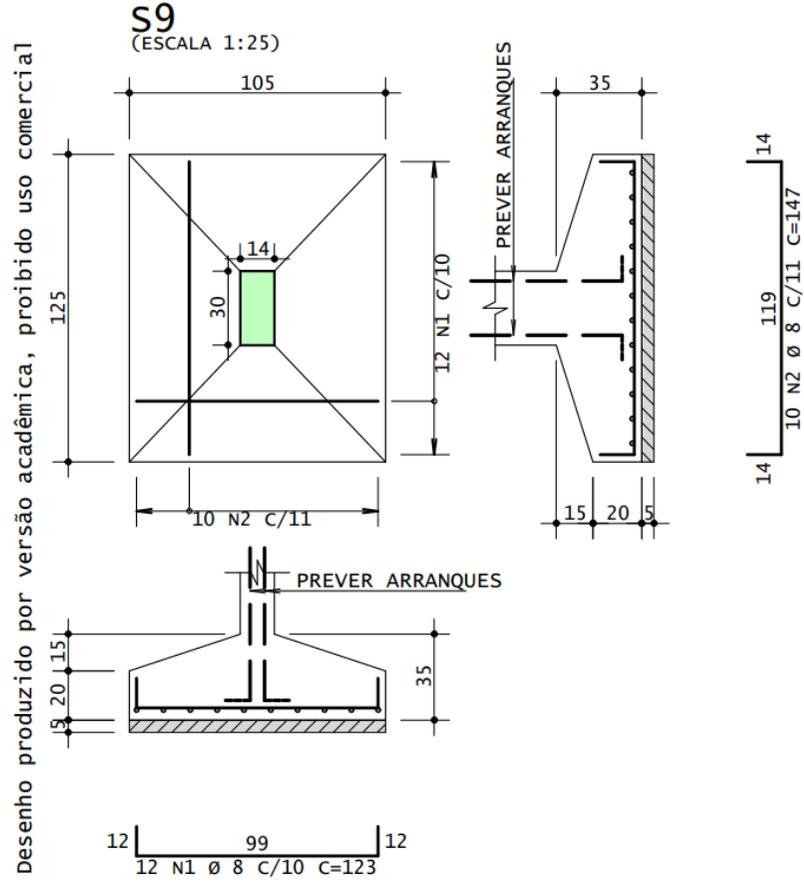
APÊNDICE I – Detalhamento da Armadura de Flexão (S5 e S6)



APÊNDICE J – Detalhamento da Armadura de Flexão (S7 e S8)



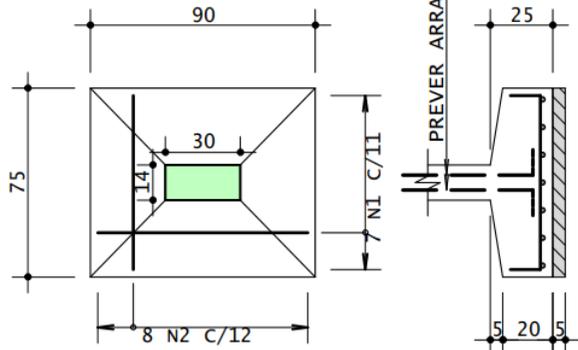
APÊNDICE K – Detalhamento da Armadura de Flexão (S9 e S10)



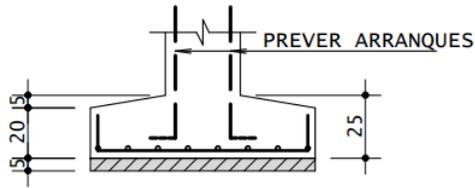
APÊNDICE L – Detalhamento da Armadura de Flexão (S11 e S12)

Desenho produzido por versão acadêmica, proibido uso comercial

S11
(ESCALA 1:25)



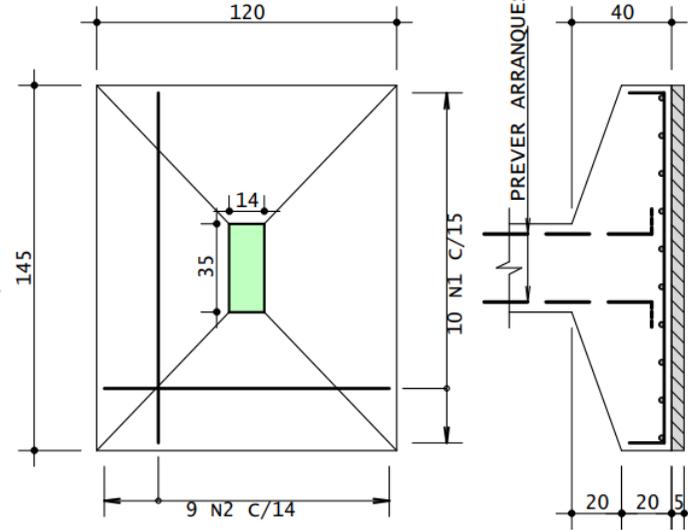
12 | 69 | 12
8 N2 Ø 8 C/12 C=93



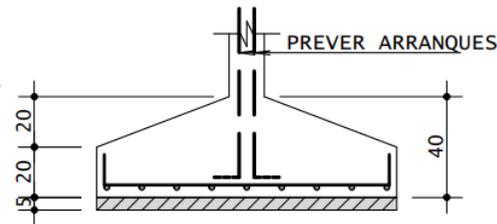
14 | 84 | 14
7 N1 Ø 8 C/11 C=112

Desenho produzido por versão acadêmica, proibido uso comercial

S12
(ESCALA 1:25)

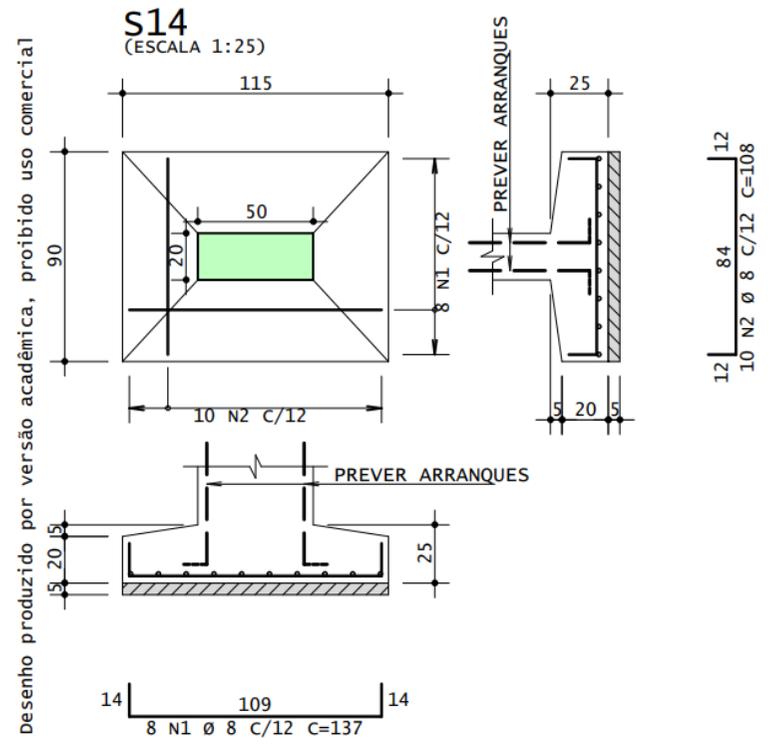
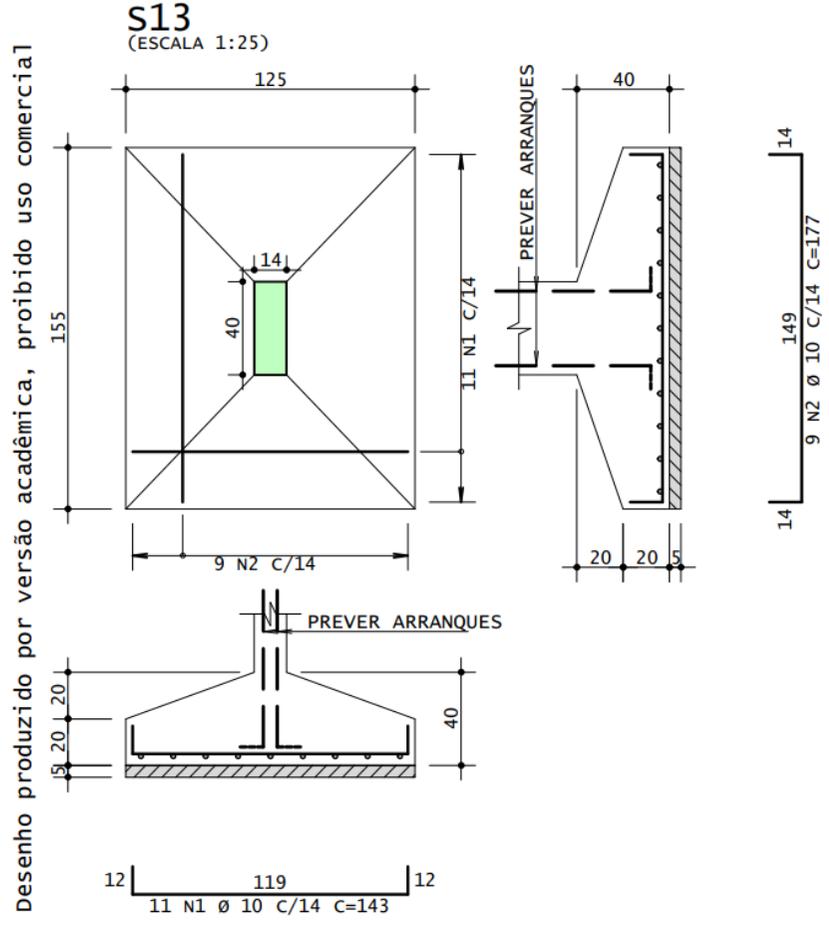


14 | 139 | 14
9 N2 Ø 10 C/14 C=167

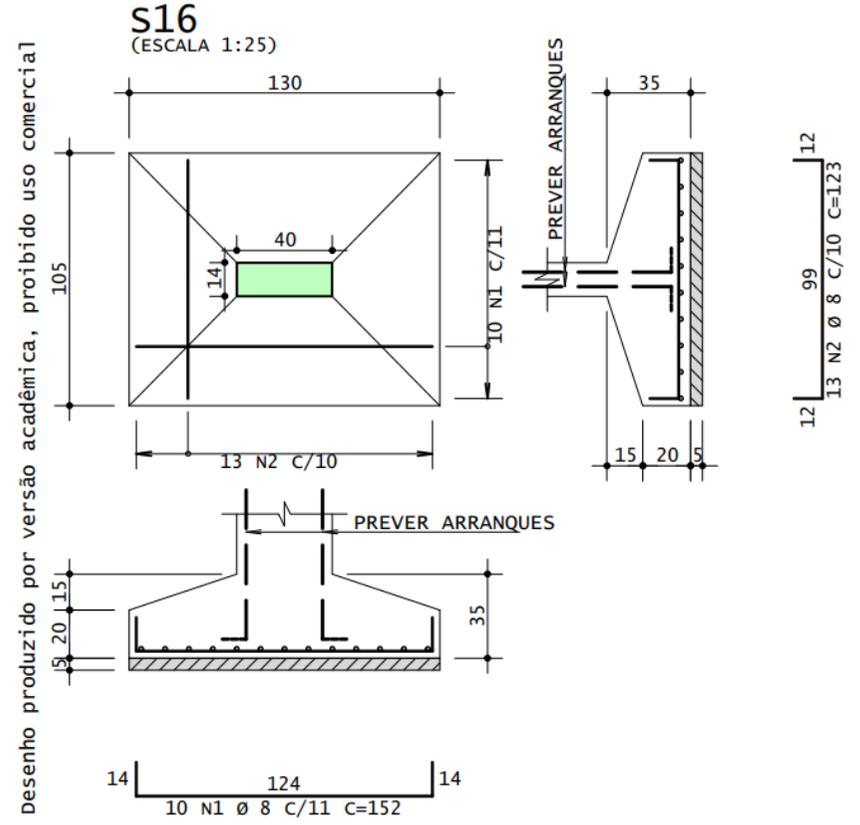
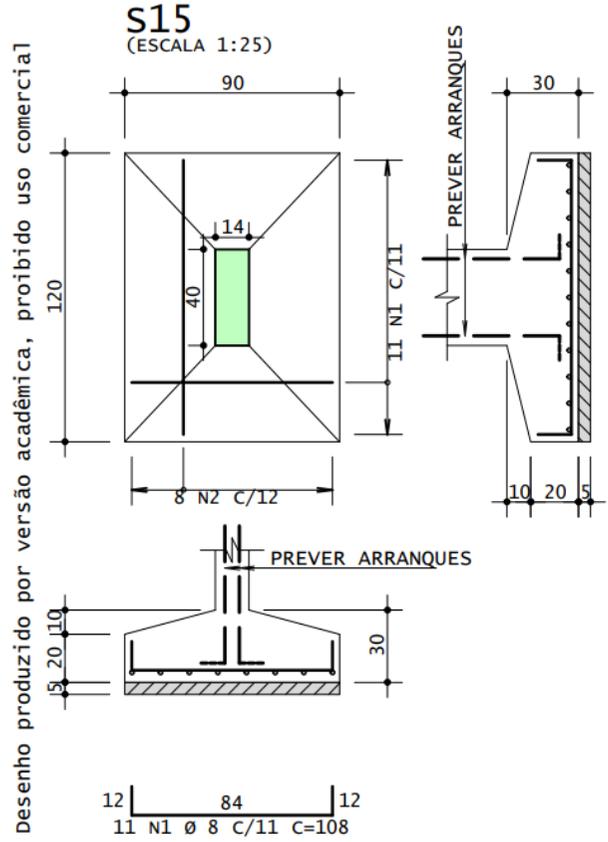


12 | 114 | 12
10 N1 Ø 10 C/15 C=138

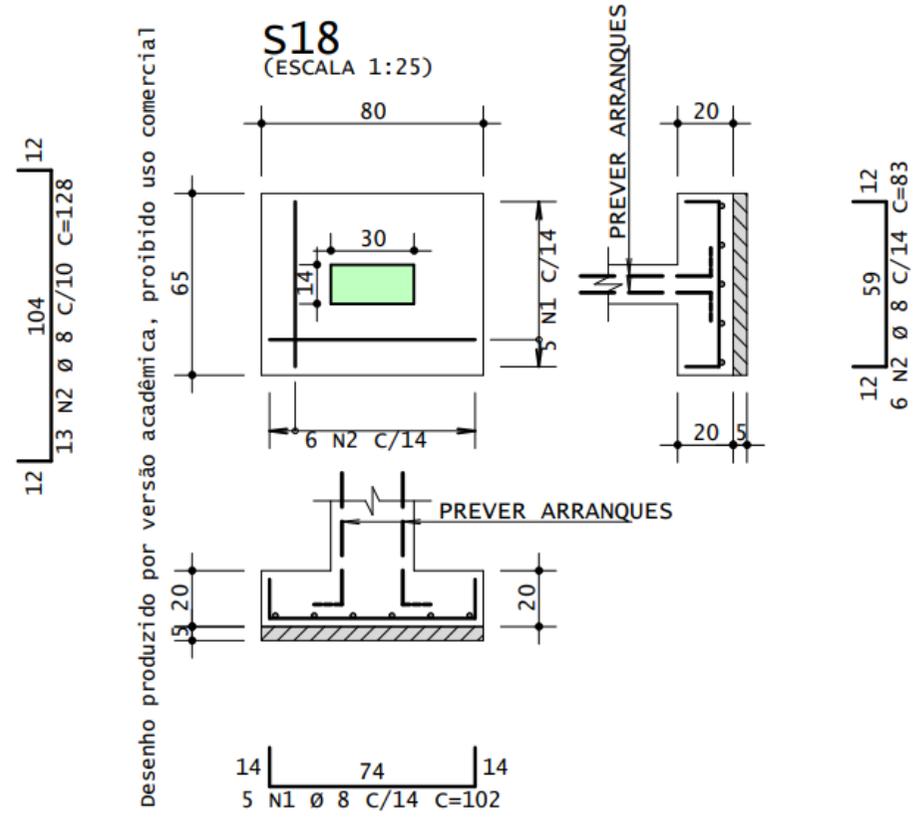
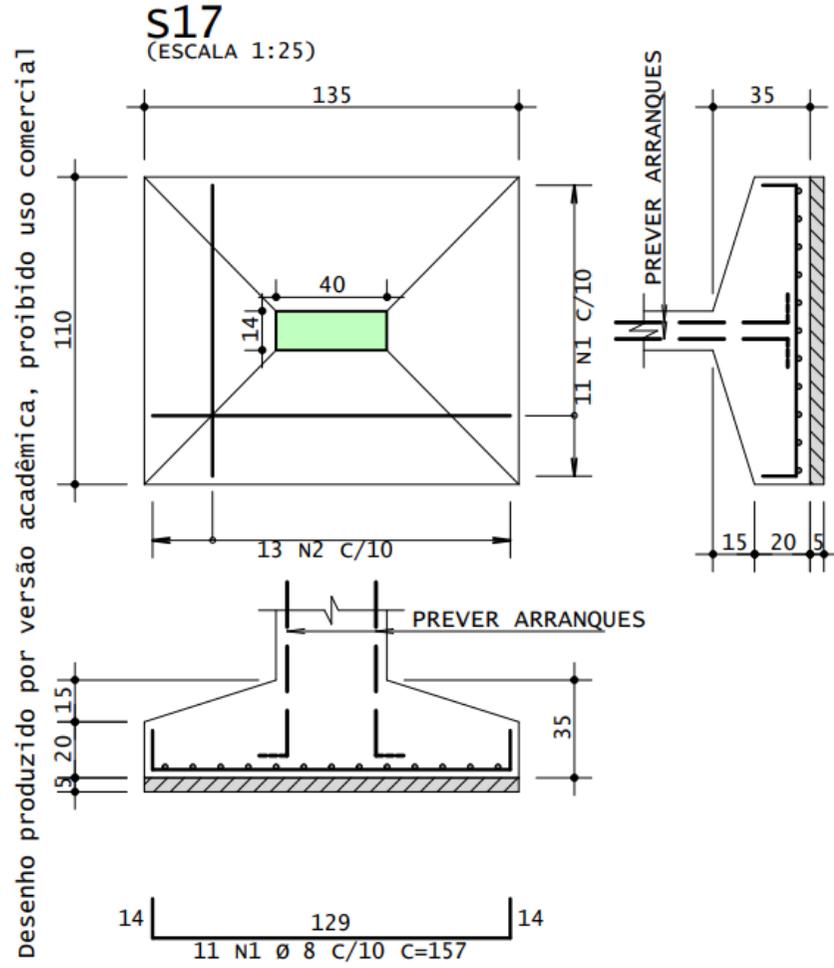
APÊNDICE M – Detalhamento da Armadura de Flexão (S13 e S14)



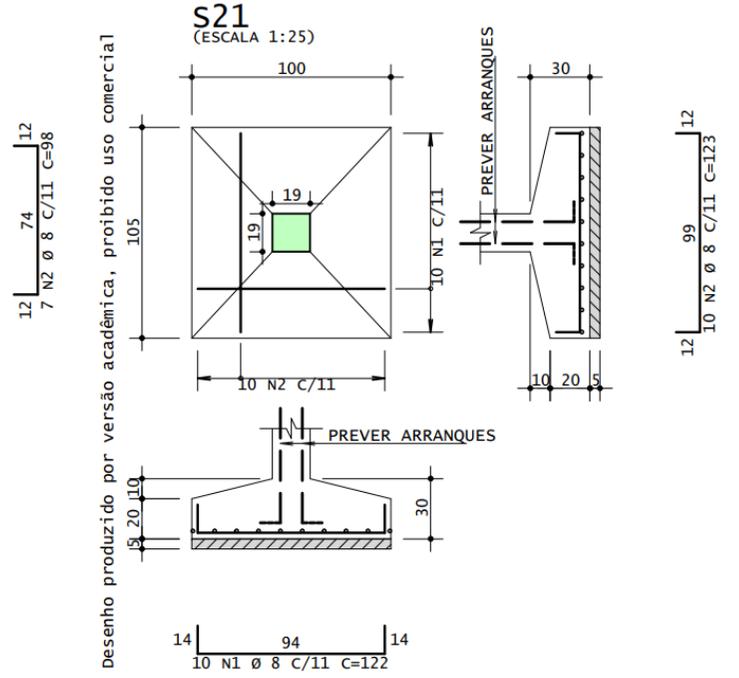
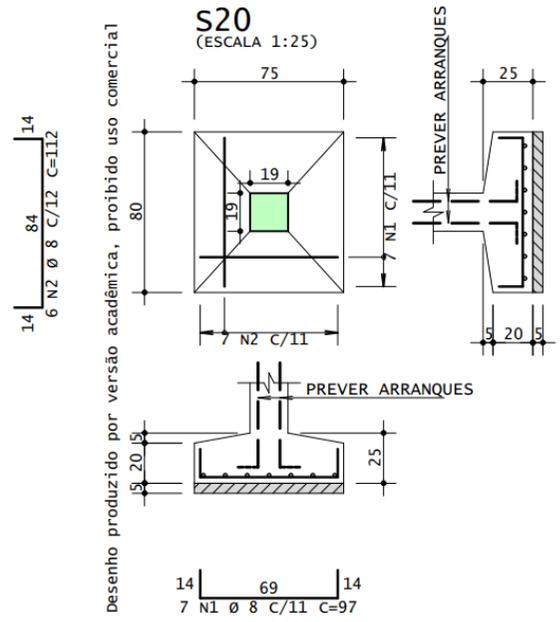
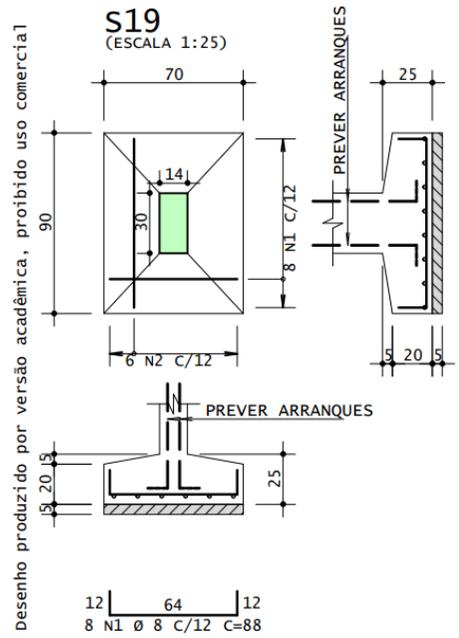
APÊNDICE N – Detalhamento da Armadura de Flexão (S15 e S16)



APÊNDICE O – Detalhamento da Armadura de Flexão (S17 e S18)



APÊNDICE P – Detalhamento da Armadura de Flexão (S19 à S21)



APÊNDICE Q – Tabela de Aço (S1 à S12)

Desenho produzido por versão acadêmica, proibido uso comercial

AÇO	POS	BIT mm	QUANT	COMPRIMENTO		
				UNIT cm	TOTAL cm	
S1						
50A	1	8	11	157	1727	
50A	2	8	13	133	1729	
S2						
50A	1	10	11	143	1573	
50A	2	10	9	172	1548	
S3						
50A	1	8	11	157	1727	
50A	2	10	9	133	1197	
S4						
50A	1	8	11	157	1727	
50A	2	10	9	133	1197	
S5						
50A	1	8	7	83	581	
50A	2	8	6	107	642	
S6						
50A	1	10	9	172	1548	
50A	2	10	11	143	1573	
S7						
50A	1	10	11	187	2057	
50A	2	10	13	158	2054	
S8						
50A	1	8	12	152	1824	
50A	2	8	13	138	1794	
S9						
50A	1	8	12	123	1476	
50A	2	8	10	147	1470	
S10						
50A	1	8	13	123	1599	
50A	2	8	10	157	1570	
S11						
50A	1	8	7	112	784	
50A	2	8	8	93	744	
S12						
50A	1	10	10	138	1380	
50A	2	10	9	167	1503	

RESUMO DE AÇO			
AÇO	BIT mm	COMPR m	PESO kgf
50A	8	194	77
50A	10	156	96
Peso Total	50A =		173 kgf

APÊNDICE R – Tabela de Aço (S13 à S21)

	AÇO	POS	BIT mm	QUANT	COMPRIMENTO	
					UNIT cm	TOTAL cm
S13						
	50A	1	10	11	143	1573
	50A	2	10	9	177	1593
S14						
	50A	1	8	8	137	1096
	50A	2	8	10	108	1080
S15						
	50A	1	8	11	108	1188
	50A	2	8	8	142	1136
S16						
	50A	1	8	10	152	1520
	50A	2	8	13	123	1599
S17						
	50A	1	8	11	157	1727
	50A	2	8	13	128	1664
S18						
	50A	1	8	5	102	510
	50A	2	8	6	83	498
S19						
	50A	1	8	8	88	704
	50A	2	8	6	112	672
S20						
	50A	1	8	7	97	679
	50A	2	8	7	98	686
S21						
	50A	1	8	10	122	1220
	50A	2	8	10	123	1230

RESUMO DE AÇO			
AÇO	BIT mm	COMPR m	PESO kgf
50A	8	172	68
50A	10	32	20
Peso Total	50A =		88 kgf

Desenho produzido por versão acadêmica, proibido uso comercial

APÊNDICE S – Rotina de Cálculo: Interface Dimensionamento e Geometria

DIMENSIONAMENTO E GEOMETRIA															
Fundação	DIMENSÕES MÍNIMAS			DIMENSÕES ADOTADAS			Verificação da base da sapata	C	h (cm) (adotado)	tg β (°)	Comportamento Estrutural	h ₀ (cm)	d	Volume	
	A (cm)	B (cm)	S _{sap} (cm ²)	A (cm)	B (cm)	Área (cm ²)	S _{sap} ≤ Área	Classificação					(cm)	Descrição	(m ³)
S1	117,58	96,58	11025,00	125,00	115,00	14375,00	ok	Abas diferentes	35,00	44,56	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,34
S2	129,17	108,17	13641,25	140,00	120,00	16800,00	ok	Abas iguais	40,00	43,24	Sapata Rígida	15,00	36,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,44
S3	131,35	106,35	13501,25	135,00	110,00	14850,00	ok	Abas iguais	35,00	46,64	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,37
S4	121,88	96,88	11340,00	140,00	115,00	16100,00	ok	Abas iguais	35,00	44,56	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,40
S5	52,79	36,79	1750,00	115,00	100,00	11500,00	ok	Abas iguais	35,00	46,64	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,28
S6	144,83	118,83	16703,75	145,00	120,00	17400,00	ok	Abas iguais	40,00	43,24	Sapata Rígida	15,00	36,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,45
S7	156,74	130,74	19985,00	150,00	145,00	21750,00	ok	Abas diferentes	40,00	41,67	Sapata Rígida	15,00	36,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,56
S8	123,82	112,82	13877,50	125,00	115,00	14375,00	ok	Abas iguais	35,00	41,78	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,35
S9	110,35	94,35	10220,00	115,00	100,00	11500,00	ok	Abas iguais	35,00	46,64	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,28
S10	126,54	100,54	12215,00	145,00	120,00	17400,00	ok	Abas iguais	50,00	54,05	Sapata Rígida	15,00	46,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,53
S11	86,44	70,44	5897,50	115,00	100,00	11500,00	ok	Abas iguais	40,00	53,30	Sapata Rígida	15,00	36,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,30
S12	137,85	116,85	15776,25	130,00	125,00	16250,00	ok	Abas diferentes	40,00	47,75	Sapata Rígida	15,00	36,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,42
S13	146,74	120,74	17211,25	145,00	130,00	18850,00	ok	Abas diferentes	40,00	43,24	Sapata Rígida	15,00	36,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,49
S14	104,27	74,27	7070,00	145,00	115,00	16675,00	ok	Abas iguais	35,00	41,78	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,41
S15	112,23	86,23	9170,00	125,00	100,00	12500,00	ok	Abas iguais	35,00	46,64	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,30
S16	123,69	97,69	11576,25	130,00	100,00	13000,00	ok	Abas diferentes	35,00	46,64	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,32
S17	132,18	106,18	13527,50	135,00	110,00	14850,00	ok	Abas iguais	35,00	41,78	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,36
S18	73,43	57,43	4025,00	115,00	85,00	9775,00	ok	Abas diferentes	35,00	55,70	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,24
S19	72,28	56,28	3876,25	125,00	110,00	13750,00	ok	Abas iguais	45,00	53,71	Sapata Rígida	15,00	41,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,39
S20	51,58	51,58	2660,00	90,00	90,00	8100,00	ok	Abas iguais	35,00	55,70	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,20
S21	89,92	89,92	8085,00	100,00	100,00	10000,00	ok	Abas iguais	35,00	48,91	Sapata Rígida	15,00	31,00	Altura mínima ideal para ancoragem	0,24

APÊNDICE T – Rotina de Cálculo: Interface Excentricidades e Tensões

Fundação	EXCENTRICIDADE			TENSÕES (kN/cm ²)				Verificação ($\sigma_{\max} < \sigma_{\text{adm}}$)	
	e _x (cm)	e _y (cm)	Tipo	Posição da aplicação da carga vertical em relação ao núcleo de inércia	σ_1	σ_2	σ_3		σ_4
S1	3,17	0,83	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0110	0,0102	0,0082	0,0074	Ok
S2	0,61	2,57	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0112	0,0087	0,0107	0,0082	Ok
S3	0,68	0,19	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0113	0,0111	0,0107	0,0105	Ok
S4	3,82	0,15	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0099	0,0098	0,0071	0,0070	Ok
S5	0,48	2,38	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0021	0,0016	0,0020	0,0015	Ok
S6	0,75	0,10	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0119	0,0118	0,0112	0,0111	Ok
S7	0,96	0,54	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0117	0,0112	0,0109	0,0104	Ok
S8	0,24	0,18	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0118	0,0116	0,0116	0,0113	Ok
S9	1,63	0,57	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0119	0,0112	0,0101	0,0094	Ok
S10	1,23	0,07	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0089	0,0088	0,0080	0,0080	Ok
S11	0,14	0,14	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0063	0,0061	0,0062	0,0061	Ok
S12	0,32	0,21	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0119	0,0117	0,0116	0,0114	Ok
S13	1,11	0,19	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0116	0,0114	0,0105	0,0104	Ok
S14	2,36	2,48	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0062	0,0049	0,0052	0,0039	Ok
S15	1,91	0,18	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0097	0,0095	0,0081	0,0079	Ok
S16	1,22	0,43	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0116	0,0110	0,0104	0,0098	Ok
S17	0,99	0,12	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0115	0,0113	0,0105	0,0104	Ok
S18	0,00	0,62	Uma direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0051	0,0	0,0	0,0048	Ok
S19	0,86	1,72	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0038	0,0032	0,0036	0,0029	Ok
S20	6,89	0,63	Duas direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0059	0,0056	0,0023	0,0020	Ok
S21	0,00	2,37	Uma direção	Dentro do Núcleo de Inércia	0,0111	0,0	0,0	0,0083	Ok

APÊNDICE U – Rotina de Cálculo: Interface Armadura de Flexão

ARMADURA DE FLEXÃO																
Fundação	Verificação se o método é aplicado		Dimensão A								Dimensão B					
	h/2 ≤ c ≤ 2h	d ≤ 1,5C	X _A (cm)	Duas direções		Uma direção				A _{s,A} (cm ²)	X _B (cm)	Duas direções		Uma direção		A _{s,B} (cm ²)
				p _A (kN.cm ²)	M _{A,d} (kN.cm ²)	P _{1,A} (kN/cm ²)	P ₁ (kN)	P ₂ (kN)	M _{1A,d} (kN.cm ²)			p _B (kN.cm ²)	M _{B,d} (kN.cm ²)	P _{méd} (kN/cm ²)	M _{1B,d} (kN.cm ²)	
S1	Ok	Ok	50,25	0,01061	2155,84	0,00	0,00	0,00	0,00	1,88	53,10	0,0096	2369,14	0,00	0,00	2,07
S2	Ok	Ok	58,25	0,01000	2849,85	0,00	0,00	0,00	0,00	2,14	55,10	0,0110	3270,96	0,00	0,00	2,46
S3	Ok	Ok	50,50	0,01124	2207,06	0,00	0,00	0,00	0,00	1,93	46,75	0,0110	2276,08	0,00	0,00	1,99
S4	Ok	Ok	52,50	0,00984	2182,48	0,00	0,00	0,00	0,00	1,91	48,75	0,0085	1983,63	0,00	0,00	1,73
S5	Ok	Ok	47,50	0,00187	295,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	45,10	0,0021	341,71	0,00	0,00	0,30
S6	Ok	Ok	59,00	0,01188	3472,75	0,00	0,00	0,00	0,00	2,61	55,10	0,0116	3567,60	0,00	0,00	2,68
S7	Ok	Ok	61,00	0,01145	4324,15	0,00	0,00	0,00	0,00	3,25	68,10	0,0113	5489,64	0,00	0,00	4,13
S8	Ok	Ok	52,50	0,01172	2600,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,27	50,85	0,0117	2645,68	0,00	0,00	2,31
S9	Ok	Ok	47,50	0,01157	1827,61	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	45,10	0,0110	1805,96	0,00	0,00	1,58
S10	Ok	Ok	59,00	0,00885	2588,42	0,00	0,00	0,00	0,00	1,52	55,10	0,0085	2604,80	0,00	0,00	1,53
S11	Ok	Ok	47,50	0,00620	979,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	45,10	0,0062	1016,17	0,00	0,00	0,76
S12	Ok	Ok	53,25	0,01182	2932,82	0,00	0,00	0,00	0,00	2,20	58,10	0,0118	3614,99	0,00	0,00	2,72
S13	Ok	Ok	59,00	0,01146	3630,72	0,00	0,00	0,00	0,00	2,73	60,10	0,0111	4052,86	0,00	0,00	3,05
S14	Ok	Ok	55,50	0,00558	1384,65	0,00	0,00	0,00	0,00	1,21	51,00	0,0057	1516,67	0,00	0,00	1,32
S15	Ok	Ok	49,00	0,00961	1615,09	0,00	0,00	0,00	0,00	1,41	45,10	0,0089	1583,84	0,00	0,00	1,38
S16	Ok	Ok	51,00	0,01129	2055,45	0,00	0,00	0,00	0,00	1,79	45,10	0,0110	2029,14	0,00	0,00	1,77
S17	Ok	Ok	54,00	0,01141	2561,95	0,00	0,00	0,00	0,00	2,24	50,10	0,0110	2610,29	0,00	0,00	2,28
S18	Ok	Ok	47,50	0,00	0,00	0,0050	0,24	0,0031	678,91	0,59	38,10	0,00	0,00	0,0049	577,40	0,50
S19	Ok	Ok	52,50	0,00352	747,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49	50,10	0,0037	812,67	0,00	0,00	0,54
S20	Ok	Ok	38,85	0,00575	546,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	38,85	0,0041	390,37	0,00	0,00	0,34
S21	Ok	Ok	43,85	0,00	0,00	0,0099	0,43	0,0265	1437,31	1,25	43,85	0,00	0,00	0,0097	1305,87	1,14

APÊNDICE V – Rotina de Cálculo: Interface Detalhamento das Armaduras de Flexão

DETALHAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO														
Fundação	Dimensão A							Dimensão B						
	As (cm ² /m)	Descrição	Gancho Vertical	Gancho Incluído	Barra Estirada	Comprimento da Armadura de Flexão (cm)	Comprimento Total da Armadura de Flexão (cm)	As (cm ² /m)	Descrição	Gancho Vertical	Gancho Incluído	Barra Estirada	Comprimento da Armadura de Flexão (cm)	Comprimento Total da Armadura de
S1	1,65	6 φ 6,30 c/ 19,00	10,00	30,00	119,00	199,00	1194,00	1,64	6 φ 6,30 c/ 19,00	10,00	30,00	109,00	189,00	1134,00
S2	1,76	8 φ 6,30 c/ 17,50	10,00	35,00	134,00	224,00	1792,00	1,79	7 φ 6,30 c/ 17,50	10,00	35,00	114,00	204,00	1428,00
S3	1,47	6 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	129,00	209,00	1254,00	1,75	5 φ 6,30 c/ 18,00	10,00	30,00	104,00	184,00	920,00
S4	1,24	7 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	134,00	214,00	1498,00	1,66	5 φ 6,30 c/ 19,00	10,00	30,00	109,00	189,00	945,00
S5	0,26	5 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	109,00	189,00	945,00	0,26	5 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	94,00	174,00	870,00
S6	1,85	8 φ 6,30 c/ 17,00	10,00	30,00	139,00	219,00	1752,00	2,18	7 φ 6,30 c/ 14,00	10,00	30,00	114,00	194,00	1358,00
S7	2,75	13 φ 6,30 c/ 11,00	10,00	30,00	144,00	224,00	2912,00	2,24	13 φ 6,30 c/ 14,00	10,00	30,00	139,00	219,00	2847,00
S8	1,85	7 φ 6,30 c/ 17,00	10,00	30,00	119,00	199,00	1393,00	1,97	6 φ 6,30 c/ 16,00	10,00	30,00	109,00	189,00	1134,00
S9	1,37	5 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	109,00	189,00	945,00	1,60	5 φ 6,30 c/ 19,00	10,00	30,00	94,00	174,00	870,00
S10	1,06	7 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	50,00	139,00	259,00	1813,00	1,27	6 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	50,00	114,00	234,00	1404,00
S11	0,66	5 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	35,00	109,00	199,00	995,00	0,74	5 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	35,00	94,00	184,00	920,00
S12	2,09	8 φ 6,30 c/ 15,00	10,00	30,00	124,00	204,00	1632,00	1,76	8 φ 6,30 c/ 17,50	10,00	30,00	119,00	199,00	1592,00
S13	2,10	9 φ 6,30 c/ 15,00	10,00	30,00	139,00	219,00	1971,00	2,10	8 φ 6,30 c/ 15,00	10,00	30,00	124,00	204,00	1632,00
S14	0,91	7 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	139,00	219,00	1533,00	1,05	5 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	109,00	189,00	945,00
S15	1,11	6 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	119,00	199,00	1194,00	1,41	5 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	94,00	174,00	870,00
S16	1,36	6 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	124,00	204,00	1224,00	1,79	5 φ 6,30 c/ 17,50	10,00	30,00	94,00	174,00	870,00
S17	1,69	7 φ 6,30 c/ 18,00	10,00	30,00	129,00	209,00	1463,00	2,03	6 φ 6,30 c/ 15,00	10,00	30,00	104,00	184,00	1104,00
S18	0,44	5 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	109,00	189,00	945,00	0,70	4 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	79,00	159,00	636,00
S19	0,43	6 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	119,00	199,00	1194,00	0,45	5 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	104,00	184,00	920,00
S20	0,38	4 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	84,00	164,00	656,00	0,53	4 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	84,00	164,00	656,00
S21	1,14	5 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	94,00	174,00	870,00	1,25	5 φ 6,30 c/ 20,00	10,00	30,00	94,00	174,00	870,00

ANEXOS

ANEXO A – Âbaco para determinação das tensões máximas nas sapatas retangulares rígidas para

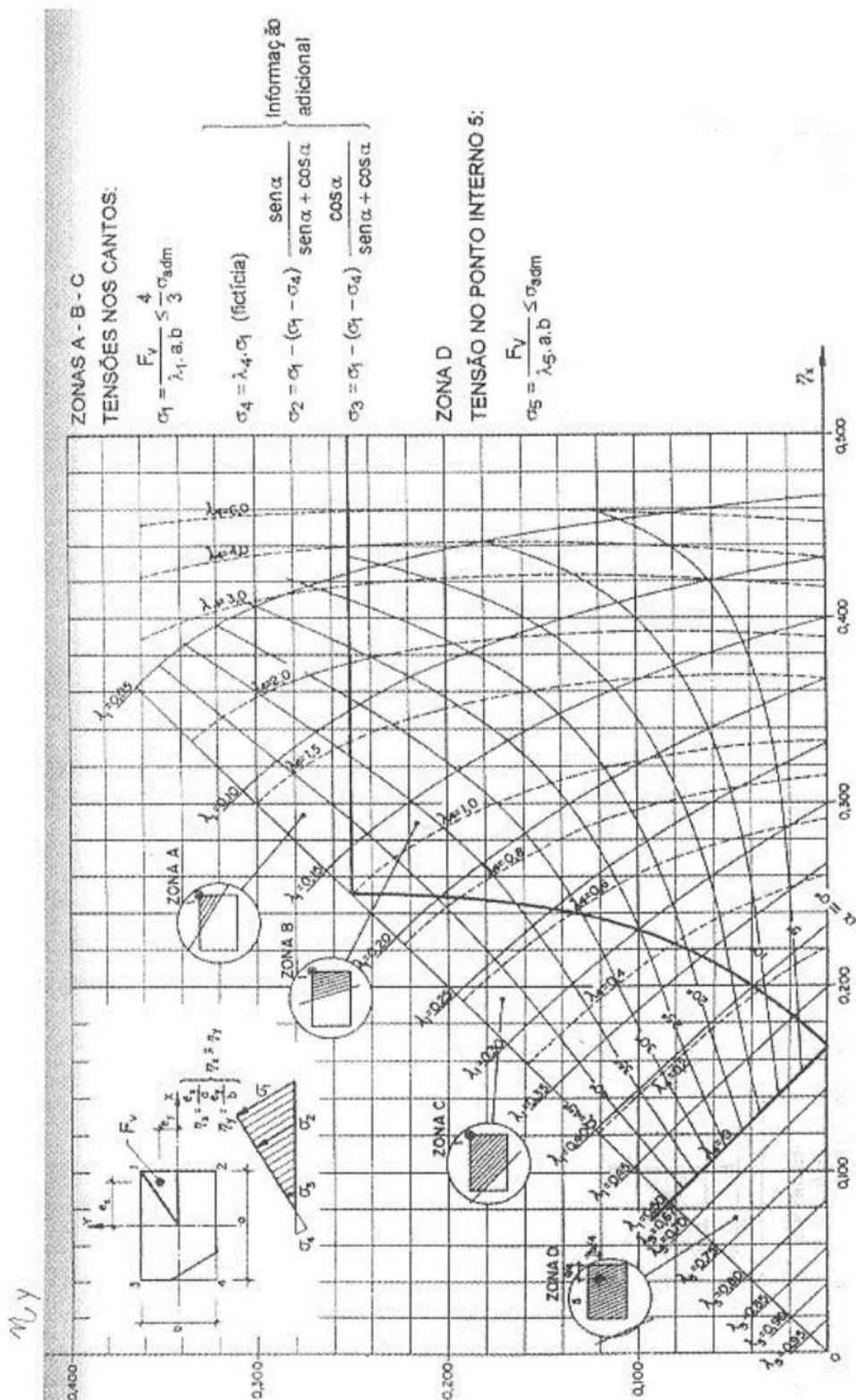


Figura 2.10 - Âbaco para determinação das tensões máximas nas sapatas retangulares rígidas para ação com dupla excentricidade.

MONTOYA [1973]

ANEXO B – Comprimento de Ancoragem (cm) para aço CA-50

Tabela A-7 – Comprimento de ancoragem (cm) para o aço CA-50 nervurado.

COMPRIMENTO DE ANCORAGEM (cm) PARA $A_{s,ef} = A_{s,calc}$ CA-50 nervurado																
ϕ (mm)	Concreto															
	C15		C20		C25		C30		C35		C40		C45		C50	
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
6,3	48	33	39	28	34	24	30	21	27	19	25	17	23	16	21	15
	33	23	28	19	24	17	21	15	19	13	17	12	16	11	15	10
8	61	42	50	35	43	30	38	27	34	24	31	22	29	20	27	19
	42	30	35	24	30	21	27	19	24	17	22	15	20	14	19	13
10	76	53	62	44	54	38	48	33	43	30	39	28	36	25	34	24
	53	37	44	31	38	26	33	23	30	21	28	19	25	18	24	17
12,5	95	66	78	55	67	47	60	42	54	38	49	34	45	32	42	30
	66	46	55	38	47	33	42	29	38	26	34	24	32	22	30	21
16	121	85	100	70	86	60	76	53	69	48	63	44	58	41	54	38
	85	59	70	49	60	42	53	37	48	34	44	31	41	29	38	27
20	151	106	125	87	108	75	95	67	86	60	79	55	73	51	68	47
	106	74	87	61	75	53	67	47	60	42	55	39	51	36	47	33
22,5	170	119	141	98	121	85	107	75	97	68	89	62	82	57	76	53
	119	83	98	69	85	59	75	53	68	47	62	43	57	40	53	37
25	189	132	156	109	135	94	119	83	108	75	98	69	91	64	85	59
	132	93	109	76	94	66	83	58	75	53	69	48	64	45	59	42
32	242	169	200	140	172	121	152	107	138	96	126	88	116	81	108	76
	169	119	140	98	121	84	107	75	96	67	88	62	81	57	76	53
40	329	230	271	190	234	164	207	145	187	131	171	120	158	111	147	103
	230	161	190	133	164	115	145	102	131	92	120	84	111	77	103	72

Valores de acordo com a NBR 6118.
 N° Superior: Má Aderência ; N° Inferior: Boa Aderência
 Sem e Com indicam sem ou com gancho na extremidade da barra
 $A_{s,ef}$ = área de armadura efetiva ; $A_{s,calc}$ = área de armadura calculada

O comprimento de ancoragem deve ser maior do que o comprimento mínimo: $\ell_{b,min} \geq \begin{cases} 0,3 \ell_b \\ 10 \phi \\ 100mm \end{cases}$

$\gamma_c = 1,4$; $\gamma_s = 1,15$

ANEXO C – Área de Armadura cm^2/m

Tabela A-11 – Área de armadura por metro de largura (cm^2/m).

ÁREA DE ARMADURA POR METRO DE LARGURA (cm^2/m)						
Espaçamento (cm)	Diâmetro Nominal (mm)					
	4,2	5	6,3	8	10	12,5
5	2,77	4,00	6,30	10,00	16,00	25,00
5,5	2,52	3,64	5,73	9,09	14,55	22,73
6	2,31	3,33	5,25	8,33	13,33	20,83
6,5	2,13	3,08	4,85	7,69	12,31	19,23
7	1,98	2,86	4,50	7,14	11,43	17,86
7,5	1,85	2,67	4,20	6,67	10,67	16,67
8	1,73	2,50	3,94	6,25	10,00	15,63
8,5	1,63	2,35	3,71	5,88	9,41	14,71
9	1,54	2,22	3,50	5,56	8,89	13,89
9,5	1,46	2,11	3,32	5,26	8,42	13,16
10	1,39	2,00	3,15	5,00	8,00	12,50
11	1,26	1,82	2,86	4,55	7,27	11,36
12	1,15	1,67	2,62	4,17	6,67	10,42
12,5	1,11	1,60	2,52	4,00	6,40	10,00
13	1,07	1,54	2,42	3,85	6,15	9,62
14	0,99	1,43	2,25	3,57	5,71	8,93
15	0,92	1,33	2,10	3,33	5,33	8,33
16	0,87	1,25	1,97	3,13	5,00	7,81
17	0,81	1,18	1,85	2,94	4,71	7,35
17,5	0,79	1,14	1,80	2,86	4,57	7,14
18	0,77	1,11	1,75	2,78	4,44	6,94
19	0,73	1,05	1,66	2,63	4,21	6,58
20	0,69	1,00	1,58	2,50	4,00	6,25
22	0,63	0,91	1,43	2,27	3,64	5,68
24	0,58	0,83	1,31	2,08	3,33	5,21
25	0,55	0,80	1,26	2,00	3,20	5,00
26	0,53	0,77	1,21	1,92	3,08	4,81
28	0,49	0,71	1,12	1,79	2,86	4,46
30	0,46	0,67	1,05	1,67	2,67	4,17
33	0,42	0,61	0,95	1,52	2,42	3,79

Elaborada por PINHEIRO (1994)
Diâmetros especificados pela NBR 7480.