



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ÁQUILA FIGUEIREDO DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE
SAPATAS ISOLADAS**

PAU DOS FERROS

2023

ÁQUILA FIGUEIREDO DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE
SAPATAS ISOLADAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semiárido como
requisito para obtenção do título de Bacharela
em Engenharia Civil.

Orientador: Matheus Fernandes de Araújo
Silva, Prof. Dr.

PAU DOS FERROS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

d SS725 Sousa, Áquila Figueiredo de.
DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA PARA
DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS ISOLADAS / Áquila
Figueiredo de Sousa. - 2023.
59 f. : il.

Orientador: Matheus Fernandes de
Araújo Silva. Monografia (graduação) -
Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de
Engenharia Civil, 2023.

1. Fundação. 2. Excel. 3. Planilha
eletrônica.
4. Sapatas isoladas. I. de Araújo Silva,
Matheus Fernandes, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes
da Silva CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA PARA DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS ISOLADAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semiárido como
requisito para obtenção do título de Bacharela
em Engenharia Civil.

DATA DE APROVAÇÃO 10/10/2023

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MATHEUS FERNANDES DE ARAÚJO SILVA**
Data: 16/10/2023 16:51:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. MATHEUS FERNANDES DE ARAÚJO SILVA
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **FRANCISCO EDVAR LIMA JÚNIOR**
Data: 11/10/2023 14:42:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. FRANCISCO EDVAR LIMA JÚNIOR
1º Examinador

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO HENRIQUE BORGES DE OLIVEIRA**
Data: 11/10/2023 17:55:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. LEONARDO HENRIQUE BORGES DE OLIVEIRA
2º Examinador

*“É preciso que eu suporte duas ou três larvas
se quiser conhecer as borboletas.”*

O pequeno príncipe

AGRADECIMENTOS

Ter chegado até essa reta final significa muito para mim e, por isso, não poderia deixar de começar esses agradecimentos sem demonstrar minha gratidão a Deus, pois sei que sem Ele nada disso estaria sendo possível agora. Cursar engenharia Civil nunca foi meu objetivo inicial, caí no curso completamente de paraquedas e talvez por isso a caminhada tenha sido um pouco mais complicada. Agora, olhando para trás, lembro das vezes que me senti perdida achando que aqui não era o meu lugar e percebo que cair de paraquedas foi o empurrão necessário na minha vida para entender que oportunidades vão e vem e cabe somente a nós escolher o que fazer com elas.

À Aila, minha gêmea, serei eternamente grata pelo apoio durante os dias difíceis em que me vi sobrecarregada, você foi e sempre será importante em qualquer etapa da minha vida. Eu via e sentia você vibrar a cada conquista minha, desde à monitoria até uma simples aprovação em disciplina e isso não tem preço. Você, juntamente com nossos familiares, é lar independentemente de onde eu esteja. À minha mãe, Gelza, minha tia, Francisca, meus tios, Francisco e Railda, obrigada pelo suporte e compreensão durante esses 6 anos, vocês, melhor do que ninguém, sabem o quanto são peças-chaves para que essa caminhada fosse concluída. O carinho e a compreensão de todos foram essenciais para que eu não me culpasse tanto por estar perdendo momentos importantes entre família. Isso tudo é por vocês.

Às minhas primas quase irmãs, Ana Clara e Ana Raquel, vocês são a alegria dos meus dias, lembro-me o quão difícil foi o processo de desapego quando comecei a morar longe de casa, voltar à rotina era sempre um desafio, o peito pesado, o coração pedia para ficar quando via vocês chorando. Foi ali, com vocês, que aprendi e aprendo todos os dias o que é o amor e o quanto ele pode se intensificar mesmo com a distância. Voltar para casa sempre vai ser lindo sabendo que vocês estarão lá, meninas. Obrigada pelos dias leves.

Ao meu companheiro, Franklyn, por ter sido calmaria nos dias de caos, além de ter me ajudado e encorajado a tomar decisões das quais me orgulho hoje. Você foi importantíssimo, principalmente no cenário pós-pandemia onde as coisas pareciam tão mais difíceis. Obrigada por todo cuidado, carinho, amor e atenção.

Não poderia deixar de lembrar de Alaíze, Dayane, Roberta, Suyanne e Pablo que começaram juntos comigo e, embora alguns tenham seguido rumos diferentes, nunca perdemos a conexão. Roberta, as horas pós-almoço no nosso apartamento sempre serão lembradas, assim como os bolos que você fazia para a gente comer enquanto ríamos das poucas e boas que essa

vida nos aprontava, você é incrível e nunca me esquecerei das vezes em que me estendeu a mão. Alaíze, Dayane e Pablo, ambos com um carisma e bom humor que qualquer um jamais vai ter, conviver com vocês é realmente uma verdadeira emoção. Suyanne, minha dupla de projetos desde à pesquisa até a extensão, você é gigante, amiga. Obrigada pelas inúmeras vezes em que me estendeu a mão e me auxiliou. Difícil será encontrar uma dupla tão boa quanto você.

À Empresa Junior Pirâmides Topografia e Projetos que me proporcionou a experiência profissional incrível e foi uma virada de chave no meu entendimento, ainda que pouco, sobre o funcionamento do mercado de trabalho e os processos de projetos. Além de me permitir conhecer Nadisna, a qual tenho um carinho enorme. Pirâmides, obrigada pela oportunidade!

Agradeço também aos professores – Leonardo, Barbara, Marília, William – que participaram diretamente e indiretamente da minha passagem pela Universidade e foram essenciais na minha formação, vocês são mestres com excelência. Em especial destaco Matheus, meu orientador e pessoa pelo qual me espelho para seguir no meio acadêmico. Suas aulas, assim como suas orientações, fazem qualquer um explodir em busca de conhecimento. Espero que todos tenham a oportunidade de passar, em algum momento, por disciplinas ministradas por você.

Por último, à UFERSA por todo acolhimento e oportunidade, o Campus Pau dos Ferros é tão lar quanto a nossa casa, e isso é importante de ser lembrado.

RESUMO

Um projeto de fundações compreende etapas que iniciam desde o dimensionamento geométrico até o estrutural, estes são parâmetros importantes na hora de avaliar a confiabilidade e segurança da subestrutura. Planilhas eletrônicas desenvolvidas no Microsoft Excel são excelentes ferramentas que auxiliam na automatização dos cálculos desse tipo de projeto, minimizando as falhas humanas. Diante disso, este trabalho teve como objetivo desenvolver uma planilha capaz de dimensionar a fundação, avaliar parâmetros estruturais como perda de contato com o solo, colapso da fundação em detrimento da máxima tensão aplicada na base da sapata, punção em sapatas flexíveis, esmagamento da biela de concreto em sapatas rígidas e, por último, dimensionamento e detalhamento das armaduras por meio de dois métodos, sendo eles: bielas e tirantes e CEB-70. Para isso, utilizou-se os trabalhos publicados por Bastos (2016) para obter o embasamento teórico e os modelos de cálculo e foram consultadas as normas que regem todo o dimensionamento de fundação e de concreto armado (NBR 6122/19 e NBR 6118/23). Como forma de validação dos resultados obtidos pela planilha, optou-se pela comparação com um software disponibilizado pela TQS, o SAPFORTE v20. Em resultados principais a esse estudo, notou-se a semelhança entre os parâmetros avaliados, sendo eles: estimativas dos lados da sapata e sua altura, tensão cisalhante solicitante, tensão resistente e áreas de aço. Sendo este último fator determinante para o quantitativo de aço na estrutura. Os resultados se mostram pertinentes uma vez que os valores, em sua maioria, se aproximam. Assim sendo, nota-se que a empregabilidade da planilha é bastante útil para fins acadêmicos uma vez que os recursos para obtenção de *softwares* são escassos.

Palavras-chave: fundação; sapatas isoladas; planilhas eletrônicas; Excel.

ABSTRACT

A foundation project comprises steps that start from geometric to structural sizing, these are important parameters when evaluating the reliability and safety of the substructure. Electronic spreadsheets developed in Microsoft Excel are excellent tools that help automate calculations for this type of project, minimizing human errors. Therefore, this work aimed to develop a spreadsheet capable of sizing the foundation, evaluating structural parameters such as loss of contact with the ground, collapse of the foundation to the detriment of the maximum tension applied to the base of the footing, puncture in flexible footings, crushing of the connecting rod of concrete on rigid footings and, finally, sizing and detailing of the reinforcement using two methods, namely: struts and ties and CEB-70. For this, the works published by Bastos (2016) were used to obtain the theoretical basis and calculation models and the standards that govern all foundation and reinforced concrete sizing were consulted (NBR 6122/19 and NBR 6118/23). As a way of validating the results obtained by the spreadsheet, we chose to compare them with software provided by TQS, SAPFORTE v20. In the main results of this study, the similarity between the evaluated parameters was noted, namely: estimates of the sides of the footing and its height, shear stress, resistant stress and steel areas. The latter being a determining factor for the quantity of steel in the structure. The results are relevant since the values, for the most part, are close. Therefore, it is noted that the use of spreadsheets is very useful for academic purposes since resources for obtaining software are scarce.

Keywords: foundation; insulated shoes; electronic spreadsheets; Excel.

SUMÁRIO

1 Introdução	14
2 Objetivos.....	16
2.1 GERAL	16
2.2 ESPECÍFICOS	16
3 Revisão teórica	17
3.1 FUNDAÇÕES.....	17
3.1.1 Fundações superficiais.....	17
3.1.1.1 Sapatas isoladas	18
3.2 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS SAPATAS	19
3.2.1 Rígidas	20
3.2.2 Flexíveis.....	22
3.3 DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS	24
3.3.1 Considerações de projeto.....	24
3.3.1.1 Estimativa das dimensões da sapata	24
3.3.1.2 Balanços iguais nas duas direções	25
3.3.1.3 Balanços não iguais nas duas direções	26
3.3.2 Verificação à punção	27
3.3.2.1 Tensão de cisalhamento solicitante em pilar interno com carregamento simétrico	29
3.3.2.2 Tensão de cisalhamento solicitante em pilar interno com momento fletor aplicado....	29
3.3.2.3 Tensão resistente de compressão diagonal do concreto na superfície crítica C	31
3.3.2.4 Tensão resistente na superfície crítica C' em elementos estruturais ou trechos sem armadura de punção.....	32
3.3.3 Método de cálculo.....	34
3.3.3.1 CEB – 70	34
3.3.3.2 Método das bielas	38
4 Metodologia	40
4.1 ESTRUTURAÇÃO DA PLANILHA	41
4.1.1 Geometria dos pilares e cargas	41
4.1.2 Dimensionamento e verificação estrutural da sapata.....	43
4.1.3 Concreto e aço	45
4.1.4 Verificação ao funcionamento	46

4.1.5	Dimensionamento das armaduras	46
5	Resultados e discussões.....	47
5.1	DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO.....	48
5.2	PARÂMETROS ESTRUTURAIS	49
5.3	PUNÇIONAMENTO	51
5.4	ARMADURAS	53
5.5	DETALHAMENTO DAS SAPATAS	54
6	Considerações finais	55
	Referências bibliográficas.....	56
	Anexo	58

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1.1 Fluxo de cargas na edificação.	14
Figura 3.1 Principais tipos de fundações superficiais.....	18
Figura 3.2 Modelo de sapata retangular isolada.	19
Figura 3.3 Cargas atuantes em sapatas isoladas.	19
Figura 3.4 Ângulo mínimo que deve ser formado pela biela.	20
Figura 3.5 Tensões principais na sapata.	21
Figura 3.6 Ângulo β e balanço C.....	22
Figura 3.7 Distribuição das tensões na base da sapata conforme o tipo de solo.	22
Figura 3.8 Sapata flexível.....	23
Figura 3.9 Distribuição das tensões em solo para sapata flexível.	23
Figura 3.10 Possíveis superfícies de ruptura de sapatas flexíveis.	24
Figura 3.11 Notações da sapata isolada.....	25
Figura 3.12 Sapata isolada com balanços diferentes nas duas direções.	27
Figura 3.13 Cone de punção em sapata isolada.....	28
Figura 3.14 Superfícies críticas C e C'.	28
Figura 3.15 Pilar submetido à força normal e momento fletor.....	30
Figura 3.16 Tensão de cisalhamento na sapata.....	32
Figura 3.17 Representação da distância a^*	33
Figura 3.18 Balanço c na sapata.	34
Figura 3.19 Distribuição das tensões na base da sapata.	35
Figura 3.20 Seção de referência S1A, relativa à dimensão A da sapata.....	35
Figura 3.21 Diagrama para cálculo do momento fletor na seção de referência S1.	36
Figura 3.22 Notações e seções de referência.	36
Figura 3.23 Ancoragem da armadura quando $c > h$	38
Figura 3.24 Ancoragem da armadura quando $c < h$	38
Figura 3.25 Caminhamento da carga do pilar em direção à base da sapata.	39
Figura 4.1 Planilha eletrônica - dados de entrada.....	41
Figura 4.2 Representação das cargas para auxiliar o usuário.	42
Figura 4.3 Representação das dimensões e das mesas das sapatas.	42
Figura 4.4 Planilha eletrônica - estimativas iniciais.	43

Figura 4.5 Representação esquemática do NCI e excentricidades geradas pelos momentos fletores.	43
Figura 4.6 Planilha eletrônica - parâmetros geométricos e estruturais finais.	44
Figura 4.7 Planilha eletrônica - verificação do NCI e tensões na base da sapata.	44
Figura 4.8 Planilha eletrônica - seção para inserção de dados do concreto e do aço.	45
Figura 4.9 Planilha eletrônica - determinação das armaduras.	46
Figura 4.10 Representação simplificada das armaduras nas duas direções (método de bielas e tirantes).	47

TABELAS

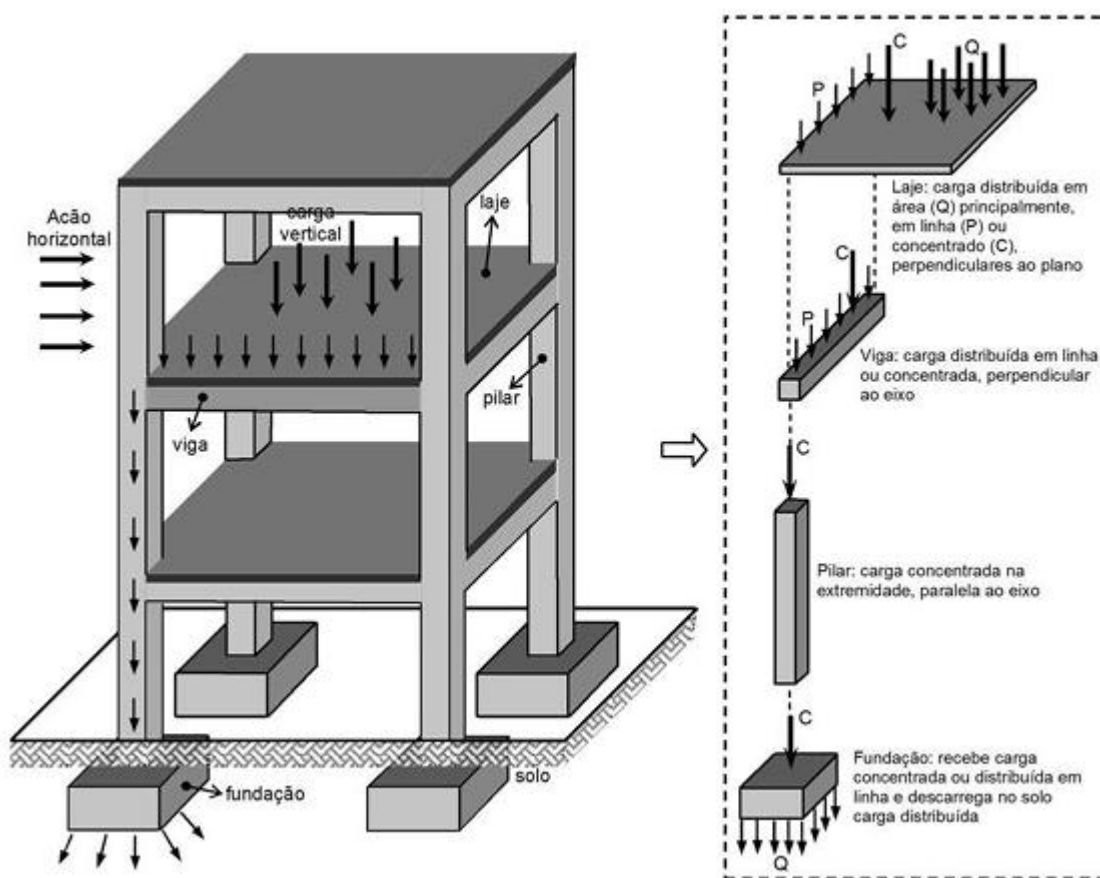
Tabela 3-1 Valores de K em função de C_1 e C_2	30
Tabela 5-1 Dados de entrada na planilha eletrônica.	47
Tabela 5-2 Dimensões da sapata encontradas pelo <i>software</i> e pela planilha eletrônica.	48
Tabela 5-3 Valores encontrados para h e h_0	49
Tabela 5-4 valores das excentricidades e NCI.	49
Tabela 5-5 Tensões máximas e mínimas na base da sapata.	50
Tabela 5-6 Balanços nas duas direções (c_a e c_b).	51
Tabela 5-7 Parâmetros para cálculo da tensão cisalhante solicitante.	52
Tabela 5-8 Determinação das tensões τ_{Sd} e τ_{Rd2}	52
Tabela 5-9 Verificação ao puncionamento na sapata do P5.	53
Tabela 5-10 Comparação das áreas de aço encontradas por meio de bielas e tirantes e pelo SAPFORTE v20.	53
Tabela 5-11 Comparação das áreas de aço encontradas por meio do CEB -70 e pelo SAPFORTE V20.	54

1 INTRODUÇÃO

Em meados do século XX, a construção civil se tornou um setor importante para economia brasileira atrelando-se a grandes obras como estradas, pontes, portos e hidrelétricas, o que contribuiu para o desenvolvimento do país na época. Nas décadas seguintes, impulsionada pela urbanização e pelo crescimento econômico, a construção civil continuou a crescer. Essa evolução tem levado a projetos e execuções de obras cada vez mais robustas e desafiadoras que, na maioria dos casos, necessitam de elevada solicitação mecânica.

E quando se trata de solicitações mecânicas, sabe-se que as fundações são as últimas peças de uma construção a receberem essas solicitações antes que ocorra a dissipação no maciço do solo. Isso é justificado devido ao comportamento estrutural da edificação que funciona da seguinte forma: as principais cargas externas são suportadas pelas lajes e transmitidas, sequencialmente, para as vigas, os pilares, as fundações e para o solo (GOMES, 2021) (Figura 1.1).

Figura 1.1 Fluxo de cargas na edificação.



Fonte: Freitas, 2016.

Convencionalmente separam-se as fundações em dois grupos: superficiais (rasas ou diretas) e profundas. De acordo com a ABNT NBR 6122:2019, fundação superficial se configura como elementos de fundação aqueles em que a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação.

Sua utilização se dá em projetos sem muita complexidade ou altas solicitações de carga, sendo executadas nas primeiras camadas do solo, sem que haja necessidade de equipamentos especiais para escavação ou cravação (ARCOS, 2017; VOITILLE, 2018). Neste tipo são inclusas as sapatas, os blocos, os radiers, as sapatas associadas, as vigas de fundação e as sapatas corridas.

As sapatas são elementos indicados para regiões de solo estável e de alta resistência superficial, além de estarem entre os tipos de fundações mais econômicas. Quando bem projetadas, costumam demandar pouca escavação e consumo moderado de concreto. Além disso, suportam cargas elevadas e, em comparação com outros tipos de fundação superficial, como os blocos não armados, as vigas baldrame e o radier (SOUZA et. al, 2014).

Dado o exposto, é evidente que em construções geralmente optam-se pelo uso de fundações rasas, especificamente as sapatas, isto porque essas construções geralmente são casas e comércios de um pavimento em que as cargas estruturais não costumam ser elevadas.

Dessa forma, no decorrer deste trabalho serão apresentadas considerações utilizadas para cálculos de capacidade de cargas referente às fundações superficiais, bem como os métodos utilizados para que seja feito o dimensionamento de sapatas isoladas. Além disso, será desenvolvida uma planilha eletrônica no *software* Microsoft Excel® para dimensionamento deste tipo de sapata.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Proporcionar aos profissionais e estudantes da área uma planilha que possa auxiliar, de maneira segura, no dimensionamento de projetos de fundação envolvendo o uso de sapatas isoladas.

2.2 ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma planilha voltada para dimensionamento estrutural de sapatas isoladas.
- Analisar os diferentes métodos para cálculo e dimensionamento estrutural de sapatas isoladas;
- Validar os resultados da planilha em Excel comparando com o *software* SAPFORTE v20;

3 REVISÃO TEÓRICA

3.1 FUNDAÇÕES

As fundações, entre os diversos elementos estruturais existentes na construção civil, nada mais são que elementos pelo qual ocorre a transmissão de cargas horizontais e verticais da edificação para o solo, essa transmissão se dá pelo uso de elementos capazes de permitir esta distribuição sendo eles as vigas, os pilares, a alvenaria, as sapatas e as estacas. Todos trabalham em conjunto buscando a estabilidade da estrutura.

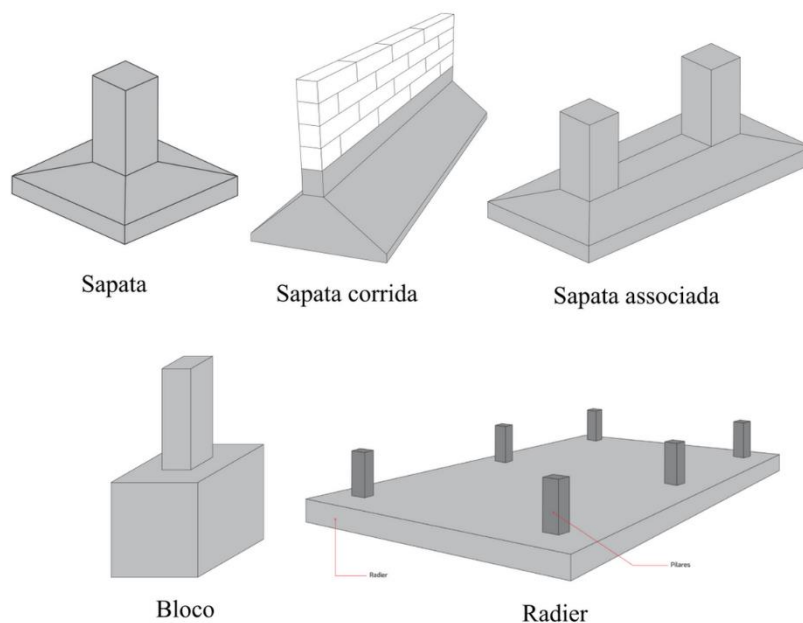
3.1.1 Fundações superficiais

Também chamadas de fundações diretas, esse tipo de elemento estrutural compreende basicamente as sapatas e radiers. São elementos de fundação responsáveis pelas transferências das cargas predominantemente pelas pressões distribuídas sob a base da fundação (MOURA e JUNIOR, 2013; CHUST e MIRANDA, 2013). A Figura 3.1 apresenta os tipos de fundações superficiais.

As sapatas são fundações de concreto armado e de pequena altura em relação às dimensões da base. Ao contrário dos blocos, que trabalham a compressão simples, as sapatas trabalham a flexão, conforme aponta (SOUZA et. al, 2014). Quanto à forma, são usualmente de base quadrada, triangular, retangular ou octogonal.

Souza et. al (2014) afirma que estes elementos estruturais são utilizados como base para construções de diferentes tamanhos, posicionadas em níveis próximos da superfície do terreno, construídas em concreto armado e dimensionadas de forma que as tensões de tração não sejam resistidas pelo concreto, mas sim pelo uso de barras de aço.

Figura 3.1 Principais tipos de fundações superficiais.



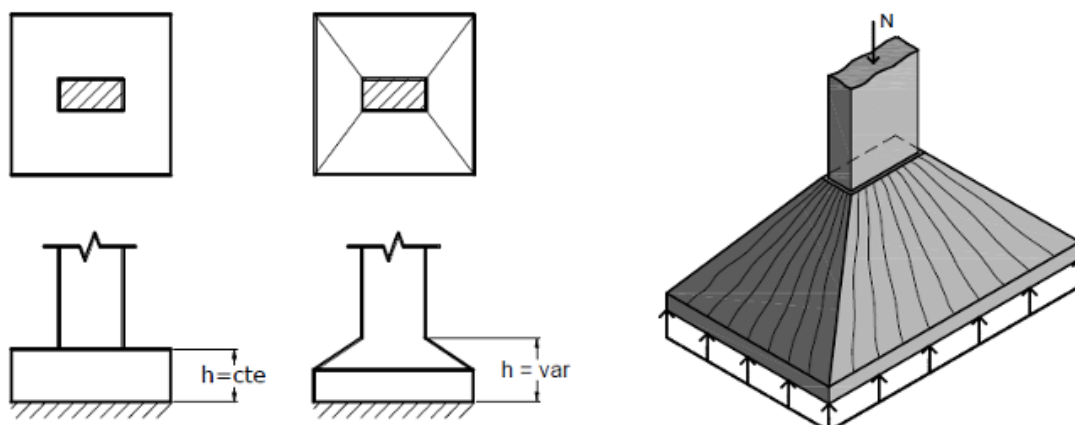
Fonte: Geo Portal, 2020.

3.1.1.1 Sapatas isoladas

As sapatas isoladas são elementos de concreto que recebem carga de um único pilar. Sua utilização é adequada para terrenos em que há uma boa taxa de trabalho e uma carga a ser suportada relativamente pequena, essas sapatas costumam ser executadas de forma simples ou armadas e ligadas entre si por vigas baldrame.

Em casos em que há pilares cujo formato seja retangular, a sapata deve ter seu centro de gravidade (CG) coincidindo com o centro de cargas. Esses elementos em específico podem assumir vários formatos, entretanto o mais comum em obras é a sapata retangular, devido a maioria dos pilares serem retangulares (BASTOS, 2016), conforme pode ser visualizado abaixo na Figura 3.2.

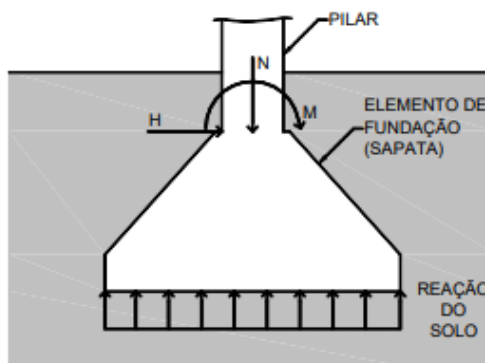
Figura 3.2 Modelo de sapata retangular isolada.



Fonte: Bastos, 2016.

Bastos (2016) aponta ainda que geralmente as ações que mais ocorrem nas sapatas são força normal (N), os momentos fletores (M_x e M_y) e força horizontal (H) (Figura 3.3).

Figura 3.3 Cargas atuantes em sapatas isoladas.



Fonte: Bastos, 2016.

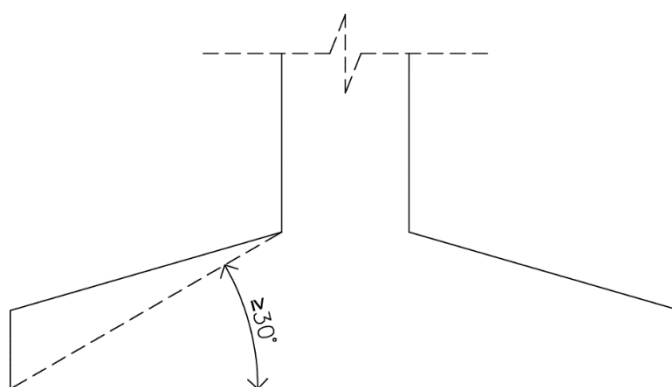
Segundo Caputo (1998), as dimensões da base da sapata são definidas em função da carga atuante na superestrutura e da resistência oferecida pelo solo, de maneira que as tensões aplicadas sobre o solo sejam iguais ou menores que as tensões admissível do solo. Ao dimensionar uma sapata retangular adota-se um limite de modo que a dimensão maior da base não ultrapasse cinco vezes a largura ($A \leq 5B$), neste caso entende-se que A é a maior dimensão em planta. Quando se tem o inverso ($A > 5B$) a sapata deixa de ser isolada e passa a ser corrida (HACHICH, 2000).

3.2 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS SAPATAS

3.2.1 Rígidas

Inicialmente é preciso compreender que as sapatas rígidas têm preferência no mercado, isso porque agregam mais segurança, uma vez que são menos deformáveis e menos sujeitas aos efeitos de punção. Dado o exposto, a conceituação do que é uma sapata rígida é definida por meio de condições geométricas específicas do elemento estrutural onde o ângulo com a horizontal, da biela da diagonal mais inclinada, deve ser maior ou igual a 30° (Figura 3.4).

Figura 3.4 Ângulo mínimo que deve ser formado pela biela.



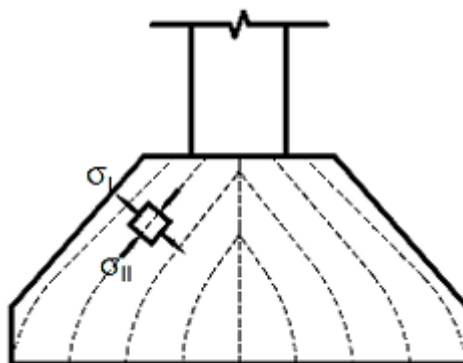
Fonte: Autor, 2023.

Na NBR 6118 (2023), item 22.6.2.2, admite-se que as sapatas rígidas trabalhem à flexão nas duas direções de modo que a tração na flexão seja distribuída uniformemente. Porém, essa mesma ideia não se aplica para a compressão na flexão porque não há uniformidade na distribuição, uma vez que se concentra na região próxima ao pilar que se apoia na sapata, tampouco para o caso de sapatas muito alongadas em relação a forma do pilar.

Em se tratando do cisalhamento, a ideia é semelhante, admite-se o trabalho nas duas direções, entretanto, é verificado que a ruptura se dá por compressão na diagonal, também conhecido como esmagamento das bielas ou do concreto, e não por tração. Isso ocorre porque a sapata fica inteiramente dentro do cone hipotético de punção, não havendo, portanto, possibilidade física de punção.

Desenvolvido através de ensaios realizados por Lebel (1936), a teoria e método das bielas identificou que em sapatas cuja altura seja maior ou igual a $(B-b)/4$ as fissuras se apresentam de maneira específica, sugerindo bielas simétricas, independentes ou atirantadas pela armadura (Figura 3.5).

Figura 3.5 Tensões principais na sapata.



Fonte: Bastos, 2016.

Ao tratar sobre as condições impostas pela NBR 6118 (2023), item 22.6.1, a respeito da altura (h) desse tipo de sapata deve ser verificada a seguinte expressão:

$$h \geq \frac{A - b_p}{3} \quad (4.1)$$

Onde,

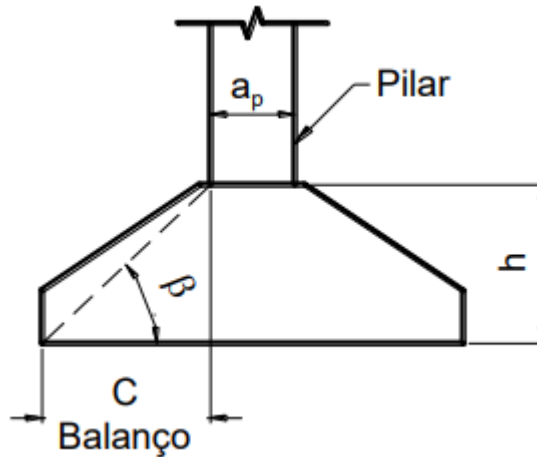
A – Maior dimensão da sapata;

b_p – Menor dimensão do pilar.

É importante salientar ainda que deve também ser verificada relativamente às dimensões B e b_p da outra direção da sapata, pois a condição só é satisfeita se, de fato, for atendida em ambas as direções. Ainda nessa perspectiva, existe, além da normatização pela NBR 6118 (2023), outro método que trata sobre a definição dos parâmetros para que uma sapata seja considerada rígida. O método é o CEB-70 o qual utiliza o critério em que o ângulo β (Figura 3.6) fica compreendido entre os limites:

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

Figura 3.6 Ângulo β e balanço C.

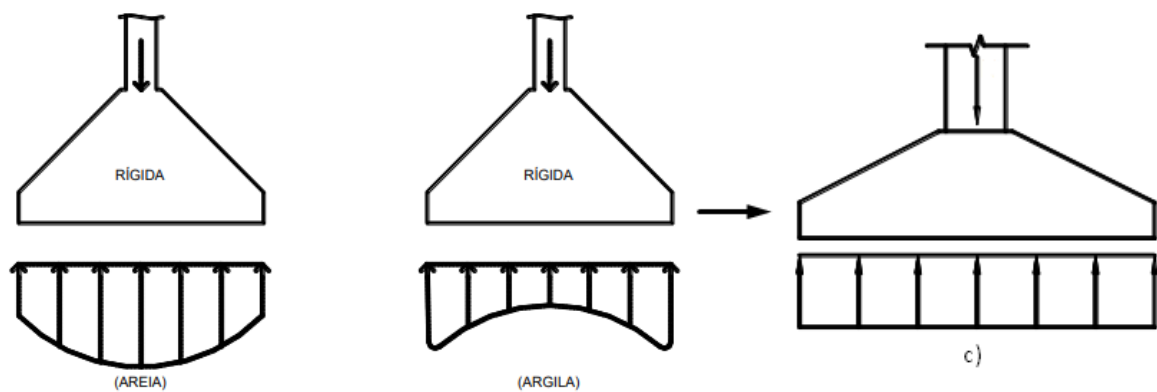


Fonte: Bastos, 2016.

À medida em que a fundação é carregada, o solo sob ela deforma em diversos tipos de formas, pois as tensões que estão presentes na base da sapata rígida variam conforme o tipo de solo em que ela se apoia (Figura 3.7). Corroborando essa afirmação, Meseguer e Cabré (1973) apontam que a distribuição das pressões no solo embaixo da fundação rígida não é uniforme.

Entretanto, visando a simplificação dessas tensões para efeito de cálculo, é habitual assumir que essas tensões são distribuídas linearmente (Figura 3.7 c)).

Figura 3.7 Distribuição das tensões na base da sapata conforme o tipo de solo.

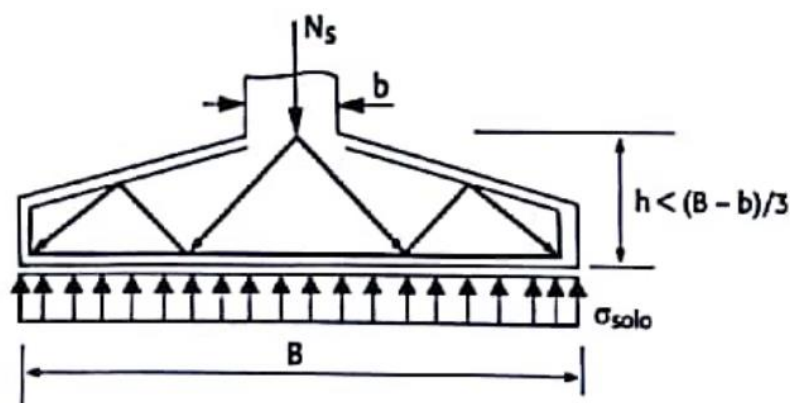


Fonte: Adaptado de Bastos, 2016.

3.2.2 Flexíveis

Quando não se atende à equação 4.1, se tem uma sapata flexível (Figura 3.8).

Figura 3.8 Sapata flexível.



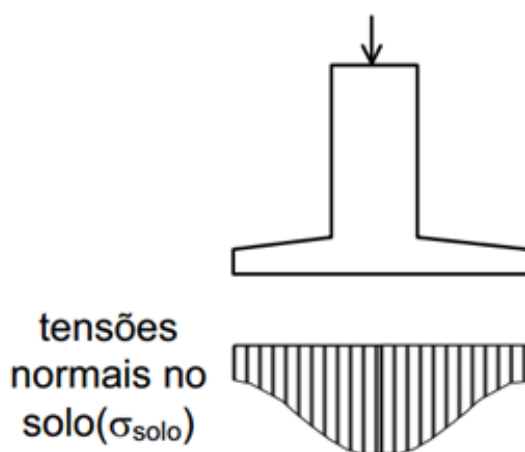
Fonte: Campos, 2015.

O uso de sapatas flexíveis é raro, porém comum em fundações de cargas pequenas e solos relativamente menos resistentes. A NBR 6118 (2023) menciona que o comportamento estrutural de sapatas flexíveis se apoia em dois pontos importantes:

- a) “Trabalho à flexão nas duas direções, não sendo possível admitir tração na flexão uniformemente distribuída na largura correspondente da sapata. A concentração de flexão junto ao pilar deve ser, em princípio, avaliada.”
- b) “Trabalho ao cisalhamento que pode ser descrito pelo fenômeno da punção.”

Campos (2015) diz que as deformações em sapatas desse tipo fazem com que, em solos rígidos, a pressão no solo aumente sob o pilar e seja menor nas bordas, conforme indicado na Figura 3.9. Em solos deformáveis, por conseguinte, essa pressão se apresenta praticamente uniforme.

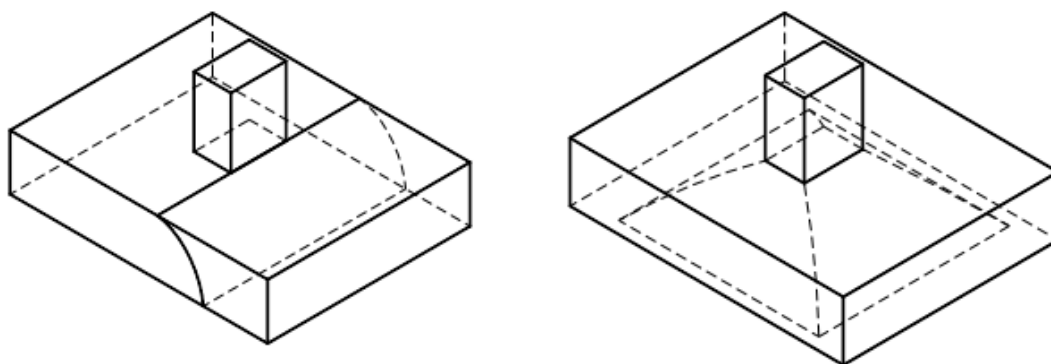
Figura 3.9 Distribuição das tensões em solo para sapata flexível.



Fonte: Campos, 2015.

A norma indica ainda que devem ser verificadas as tensões de contato com o solo, a fim de verificar se ela vai perder de contato com o solo, levantando-se. Esse tipo de elemento pode romper tanto pelo efeito de puncionamento quanto por tração. Abaixo (Figura 3.10) é apresentada as possíveis superfícies de ruptura para esse tipo de sapata.

Figura 3.10 Possíveis superfícies de ruptura de sapatas flexíveis.



Fonte: McCORMAC, 2006.

3.3 DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS

3.3.1 Considerações de projeto

3.3.1.1 Estimativa das dimensões da sapata

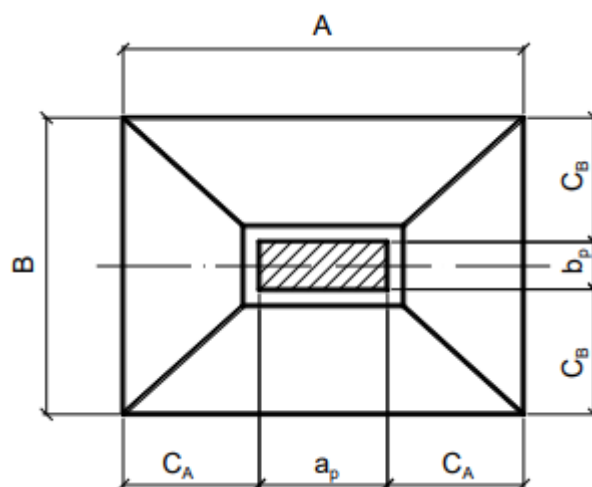
Para Bastos (2016), quando se trata da determinação das dimensões A e B é necessário que exista balanços iguais ou semelhantes, pois dessa forma fica assegurado que os momentos fletores e armaduras de flexão não serão muito distintos nas direções da sapata. Isso implica dizer que as distâncias c_A e c_B (Figura 3.11) da face do pilar à extremidade da sapata em cada direção devem ser aproximadamente iguais. Nesse sentido, faz-se:

$$A - a_p = B - b_p \quad (4.2)$$

$$A - B = a_p - b_p \quad (4.3)$$

E como consequência se obtém $A_{s,A}$ aproximadamente igual a $A_{s,B}$.

Figura 3.11 Notações da sapata isolada.



Fonte: Bastos, 2016.

Por conseguinte, a área de apoio da sapata pode ser definida como:

$$A_{ap} = \frac{1,05 \cdot N_k}{\sigma_{adm}} \quad (4.4)$$

Em que,

N_k – Carga vertical devido às ações permanentes e variáveis;

1,05 – Fator que majora às ações permanentes;

σ_{adm} – Tensão admissível do solo.

Acerca do coeficiente de segurança que majora as ações, a NBR 6122 (2019) indica que se deve considerar o peso próprio da sapata em, no mínimo, 5% da carga vertical permanente. Enquanto Campos (2015), recomenda a utilização de 1,05 para sapatas flexíveis e 1,05 a 1,10 para sapatas rígidas e quando não houver conhecimento sobre das ações permanentes e variáveis também deve-se adotar 1,10 como fator multiplicador da carga total, conforme utilizado em prática.

3.3.1.2 Balanços iguais nas duas direções

O dimensionamento considerando balanços iguais é pertinente para que se garanta a utilização armaduras de mesmo diâmetro nas duas direções da sapata, assim, fica compreendido, portanto, que essa consideração de projeto é um método que a proporciona

simplificação nas etapas executivas.

Para se determinar a área da base da sapata, é necessário que se tenha as dimensões A e B, desse modo:

$$A_{ap} = A \cdot B \quad (4.5)$$

Isolando A tem-se:

$$A = \frac{A_{ap}}{B} \quad (4.6)$$

No entanto, para que se tenha balanços iguais é imprescindível que se atenda a equação 4.3, conforme já mencionado no item 4.3.1.1 deste capítulo.

Substituindo a equação 4.3 na equação 4.6, chega-se a equação 4.7:

$$\frac{A_{ap}}{B} - B = a_p - b_p \quad (4.7)$$

Multiplicando a equação 4.7 por B se obtém uma equação de segundo grau. Resolvendo-a, tem-se:

$$A_{ap} - B^2 = (a_p - b_p)B \quad (4.8)$$

$$B = \frac{1}{2}(a_p - b_p) + \sqrt{\frac{1}{4}(a_p - b_p)^2 + A_{ap}} \quad (4.9)$$

Encontrado o valor de B, o próximo passo consiste em determinar A. Este pode ser encontrado substituindo o valor de B na equação 4.3.

Por último, objetivando uma melhor praticidade durante a execução da fundação, os lados A e B devem compreender valores múltiplos de 5 cm.

3.3.1.3 Balanços não iguais nas duas direções

No caso em que c_A e c_B são diferentes (Figura 3.12) a relação entre os lados se

apresenta da seguinte forma:

$$\frac{A}{B} \leq 3,0 \quad (4.10)$$

Para tanto, considera-se R como a relação entre os lados, chegando à equação 4.13.

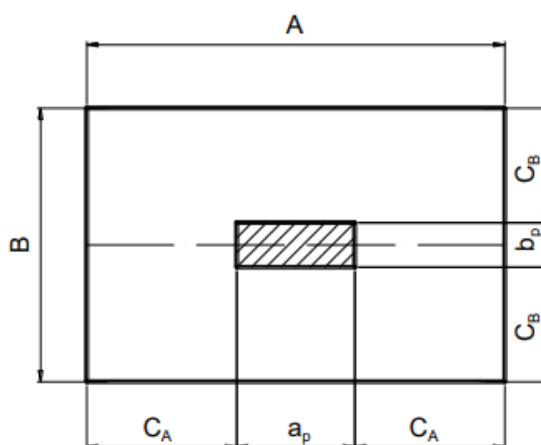
$$\frac{A}{B} = R \quad \rightarrow \quad A = R \cdot B \quad (4.11)$$

$$A_{ap} = A \cdot B \quad \rightarrow \quad A_{ap} = R \cdot B^2 \quad (4.12)$$

$$B = \sqrt{\frac{A_{ap}}{R}} \quad (4.13)$$

Bastos (2016) recomenda que a escolha para o valor de R seja entre 1 e 3, assim sendo, o cálculo da área da sapata deve ser feito utilizando a Eq. 4.4. Semelhante aos balanços iguais, os lados A e B devem ser múltiplos de 5 cm.

Figura 3.12 Sapata isolada com balanços diferentes nas duas direções.

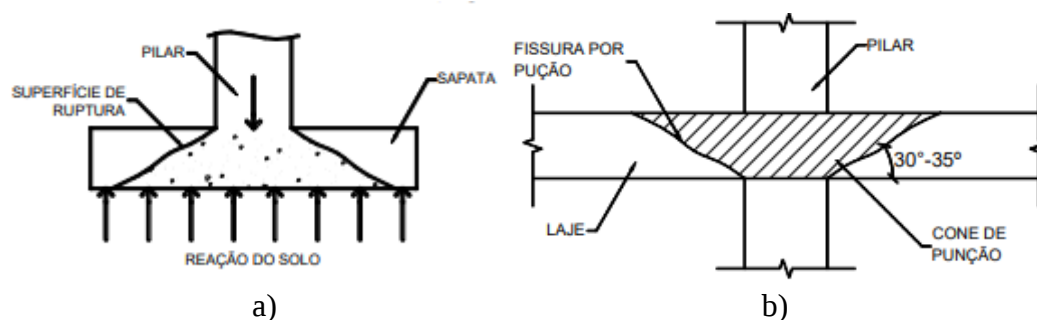


Fonte: Bastos, 2016.

3.3.2 Verificação à punção

Para BROMS (2005), a ruptura por punção em sapata isolada (Figura 4.13 a)) se assemelha à ruptura por cisalhamento de uma viga, em que a fissura de cisalhamento se estende desde às extremidades do pilar até a face superior da laje, formando um tronco de cone.

Figura 3.13 Cone de punção em sapata isolada.

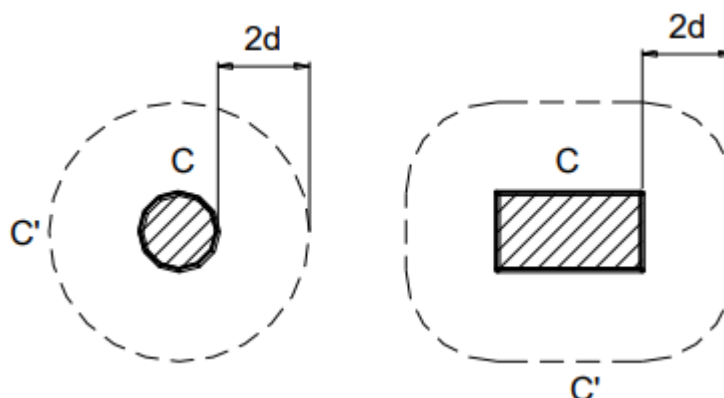


Fonte: Bastos, 2016.

Conforme apontado por Guandalini (2009), o punçonnement ocorre de maneira abrupta, através do cisalhamento, que pode estar associado ao excesso de carga concentrada em uma determinada área. No caso da resistência à punção por sapata de concreto armado, a ocorrência do efeito por ser influenciada por vários fatores como: taxa de armadura de flexão, geometria, resistência à compressão do concreto ou até mesmo a espessura e esbeltez da sapata.

Além disso, a verificação ao punçonnement é feita para sapatas flexíveis, uma vez que sapatas rígidas são isentas desse comportamento. A capacidade de punçonnement é verificada, segundo a NBR 6118/23, no contorno C' (Figura 4.14) associada à resistência à tração diagonal, além disso, também é feita uma análise da tensão de cisalhamento.

Nesse sentido, os tópicos a seguir remetem à verificação onde se compara a tensão de cisalhamento solicitante (τ_{sd}) nas superfícies críticas (C e C') com a tensão de cisalhamento resistente (τ_{Rd2}).

Figura 3.14 Superfícies críticas C e C' .

Fonte: NBR 6118, 2023.

As tensões de cisalhamento solicitante e resistente para carregamento simétrico, momento fletor aplicado e elementos estruturais sem armaduras de punção são analisadas no contorno C' , por outro lado, a tensão resistente à compressão da diagonal do concreto é

verificada no contorno C.

3.3.2.1 Tensão de cisalhamento solicitante em pilar interno com carregamento simétrico

De acordo com a NBR 6118 (2023), nos casos em que só há atuação de um único carregamento simétrico atuando sobre o pilar, a tensão de cisalhamento é definida por:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{\mu d} \quad (4.14)$$

Sendo que,

$d = \frac{d_x + d_y}{2}$ – Altura útil da laje ao longo do contorno crítico C', externo ao contorno C da área de aplicação da força e distante 2d no plano da laje;

d_x e d_y – Alturas úteis nas duas direções ortogonais;

μ – Perímetro do contorno crítico C';

μd – Área da superfície crítica;

F_{sd} – Força concentrada com seu valor de cálculo.

A altura útil (d), segundo a NBR 6118 (2023), é compreendida como a distância da borda comprimida ao centro de gravidade da armadura de tração.

3.3.2.2 Tensão de cisalhamento solicitante em pilar interno com momento fletor aplicado

O efeito de assimetria passa a ser considerado a partir do momento em que deixa de atuar sobre o pilar somente cargas verticais e dá-se início a transferência de momento da laje para o pilar (Figura 4.15). Assim sendo, a tensão de cisalhamento (τ_{sd}) pode ser calculada como:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{\mu \cdot d} + \frac{K \cdot M_{sd}}{W_p \cdot d} \quad (4.15)$$

Com,

K – Coeficiente que fornece a parcela do momento fletor M_{sd} transmitida ao pilar por cisalhamento, dependente da relação C_1/C_2 (ver tabela 4-1);

C_1 – dimensão do pilar paralela à excentricidade da força;

C_2 – dimensão do pilar perpendicular à excentricidade da força.

Tabela 3-1 Valores de K em função de C_1 e C_2 .

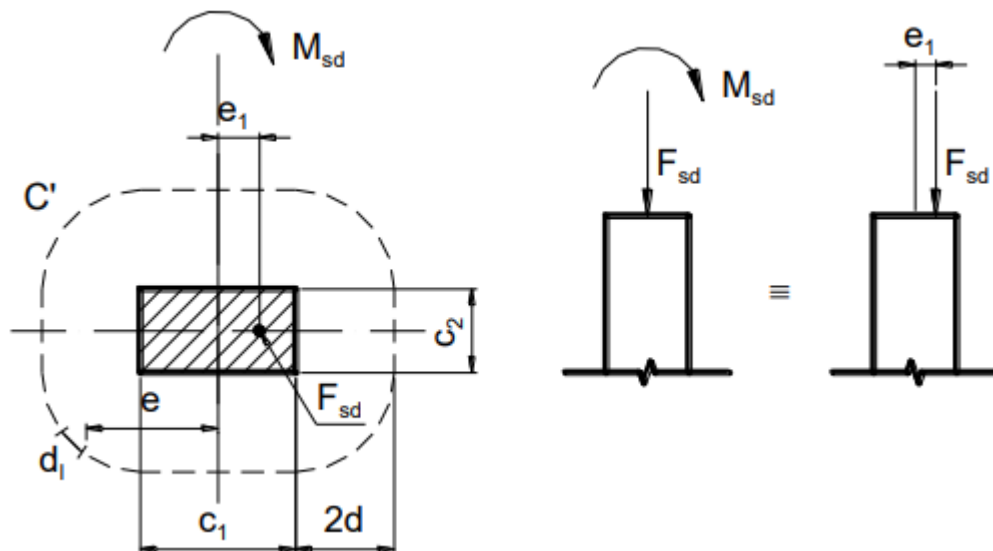
C_1/C_2	0,5	1,0	2,0	3,0
K	0,45	0,6	0,7	0,8

Fonte: NBR 6118, 2023.

A NBR 6118 (2023) dispõe dos valores para módulo de resistência plástica no contorno C' (W_p) para casos em que se tem pilares circulares e retangulares, entretanto considerando que usualmente no mercado são utilizados, em sua maioria, pilares retangulares o valor de W_p correspondente a esse tipo de geometria pode ser calculado pela expressão a seguir:

$$W_p = \frac{C_1^2}{C_2} + C_1 C_2 + 4C_2 d + 16d^2 + 2\pi d C_1 \quad (4.16)$$

Figura 3.15 Pilar submetido à força normal e momento fletor.



Fonte: Bastos, 2016.

Essa verificação da tensão de cisalhamento solicitante considerando o efeito do momento é realizada para pilares internos, portanto, caso exista a necessidade de realizar essa verificação para pilares de borda e será necessária a avaliação da superfície crítica, conforme o caso.

3.3.2.3 Tensão resistente de compressão diagonal do concreto na superfície crítica C

Esta verificação compreende lajes submetidas à punção com armadura ou sem. Consiste, inclusive, em uma das principais verificações para o caso de sapatas rígidas haja visto que, embora não sejam passíveis de puncionar, podem comprimir de tal maneira que o concreto será esmagado comprometendo a estrutura que se apoia sobre a fundação.

De acordo com a NBR 6118 (2023), que normatiza a verificação de ruptura por compressão diagonal do concreto, a tensão de cisalhamento atuante deve ser menor ou igual a tensão de cisalhamento resistente.

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd2} \quad (4.17)$$

Nesse quesito, a tensão de cisalhamento é determinada conforme explicitado no item 4.3.2.1 deste capítulo, com u_0 no lugar de u .

$$\tau_{Sd} = \frac{F_{Sd}}{\mu_0 d} \quad (4.18)$$

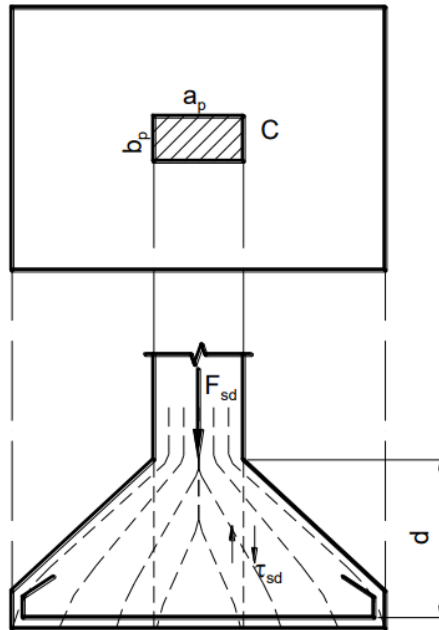
De modo que,

μ_0 – Perímetro da superfície crítica C;

$\mu_0 = 2(a_p + b_p)$;

Bastos (2016) explica que a superfície crítica C (Figura 3.16) corresponde ao contorno do pilar ou da carga concentrada, meio pelo qual atua a tensão de cisalhamento que conduz indiretamente à verificação de compressão diagonal do concreto.

Figura 3.16 Tensão de cisalhamento na sapata.



Fonte: Bastos, 2016.

Por outro lado, a tensão de cisalhamento resistente é determinada da seguinte maneira:

$$\tau_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_v \cdot f_{cd} \quad (4.19)$$

Sendo,

$$\alpha_v = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (4.2)$$

Com,

α_v – Coeficiente relacionado à resistência característica do concreto (f_{ck} – em MPa);

f_{cd} – Resistência característica de cálculo do concreto;

γ_c – Coeficiente de ponderação da resistência do concreto no Estado Limite Último (ELU).

3.3.2.4 Tensão resistente na superfície crítica C' em elementos estruturais ou trechos sem armadura de punção

Em sapatas flexíveis, esta é uma das verificações imprescindíveis, pois ela analisa a fissuração da diagonal comprimida. Essa fissuração se relaciona ao τ_{sd} e τ_{Rd1} , de modo que para que não ocorra punção esses dois parâmetros devem atender a condição:

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd1} \quad (4.21)$$

Bastos (2016), aponta que no caso de sapatas de fundação, τ_{Rd1} é:

$$\tau_{Rd1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \sqrt[3]{100\rho f_{ck}} \frac{2d}{a^*} \leq 0,5f_{cd2} \quad (4.22)$$

Com,

f_{cd2} – Resistência de cálculo do concreto à compressão para regiões não fissuradas;

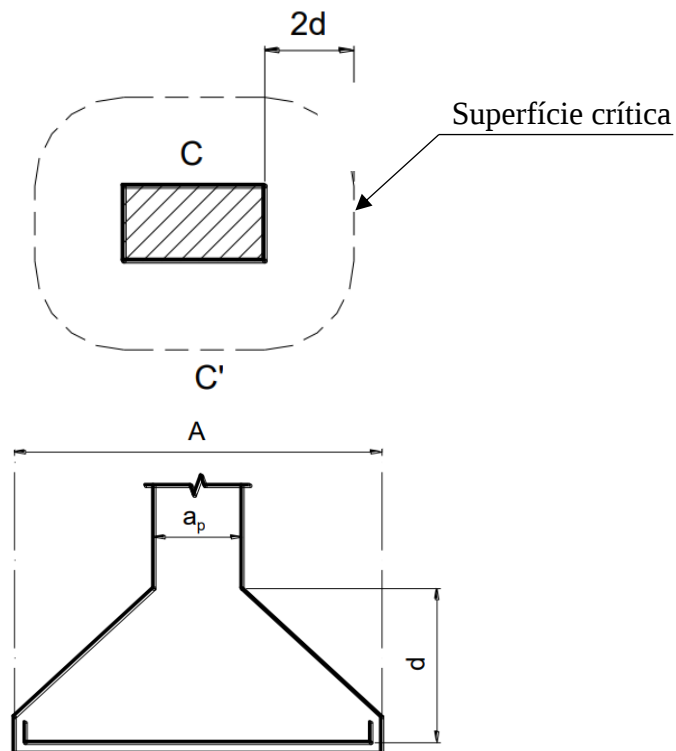
$f_{cd2} = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd}$, com f_{ck} em MPa;

$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$;

ρ_x e ρ_y – Taxas de armadura nas duas direções ortogonais.

Conforme a Figura 3.17, o valor de a^* tem que ser menor ou igual a 2 vezes d ($a \leq 2d$).

Figura 3.17 Representação da distância a^* .



Fonte: Adaptado de Bastos, 2016.

A forma como se calcula a tensão de cisalhamento em que se tem momento fletor atuando é semelhante ao citado anteriormente nos demais tópicos, entretanto:

$$u^* = 2a_p + 2b_p + 2\pi a^* \quad (4.23)$$

Dessa forma,

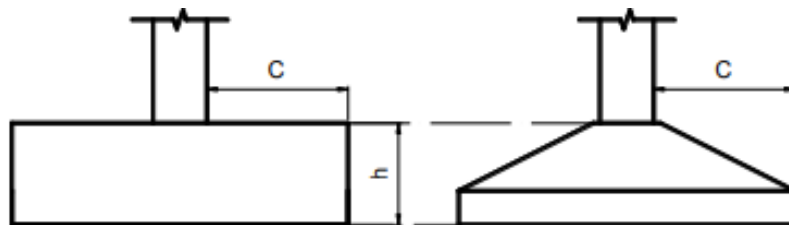
$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{\mu^* \cdot d} + \frac{K \cdot M_{sd}}{W_p \cdot d} \quad (4.24)$$

3.3.3 Método de cálculo

3.3.3.1 CEB – 70

Este é um método proposto pelo Comitê Europeu Internacional de Concreto, traduzido pelo Santos (1984). O CEB – 70, também conhecido como método da flexão, é utilizado quando as sapatas apresentarem características semelhantes ao que é representado na Figura 3.18.

Figura 3.18 Balanço c na sapata.

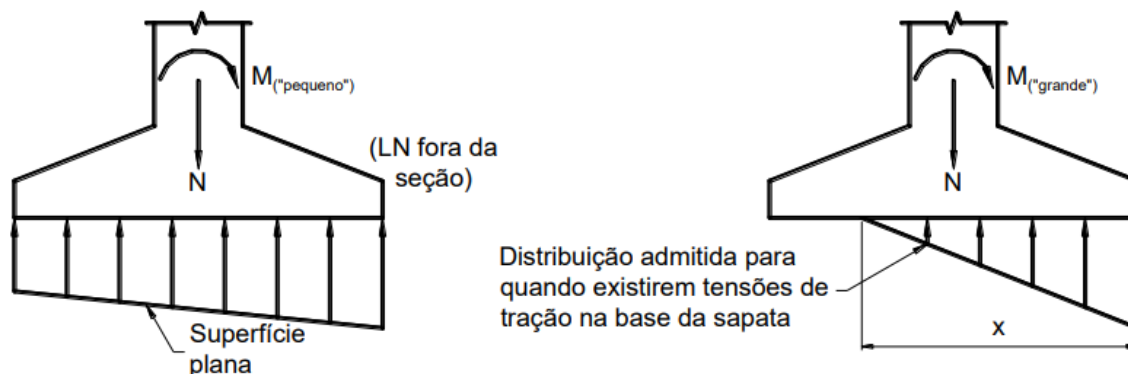


Fonte: Bastos, 2016.

Se $c < \frac{h}{2}$ em qualquer direção, admite-se que o elemento será um bloco de fundação e se $c \geq 2h$ significa que se trata de uma viga. Essas considerações são importantes, pois à medida em que elas não são obedecidas o método passa a não ser aplicável para o caso de sapatas isoladas.

Para esse caso, o método admite que o solo se comporte como elástico e que a estabilidade é assegurada pelas forças elásticas que ele transmite à sapata por meio da superfície de apoio. Sendo assim, considera-se que a distribuição das tensões na base da sapata é plana (Figura 3.19).

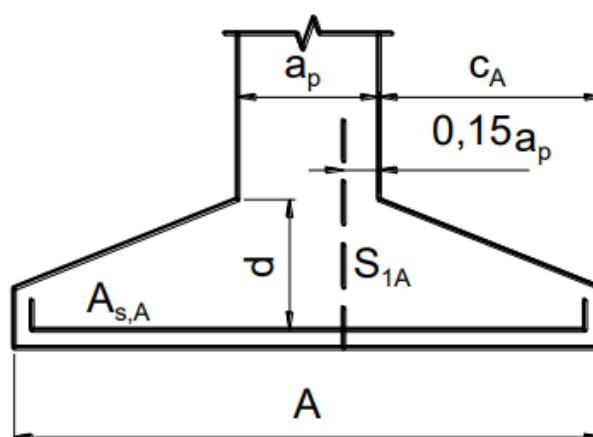
Figura 3.19 Distribuição das tensões na base da sapata.



Fonte: Bastos, 2016.

Os momentos são calculados para cada direção em relação a uma seção de referência (S) plana, sendo esta seção perpendicular à superfície de apoio e situada internamente ao pilar distanciada a $0,15a_p$, onde a_p é a dimensão do pilar (Figura 3.20).

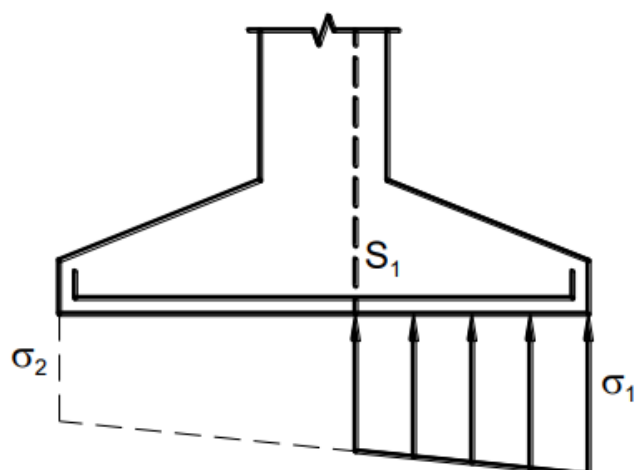
Figura 3.20 Seção de referência S1A, relativa à dimensão A da sapata.



Fonte: Bastos, 2016.

O momento fletor relativo à seção de referência S é calculado considerando a reação do solo que age na área da base da sapata, limitada pela seção S1 e a extremidade da sapata mais próxima de S1 (Figura 3.21). Bastos (2016) afirma que na avaliação dos momentos não devem ser considerados o peso da sapata e do solo acima dela, porque não causam flexão na sapata e salienta que se o momento resultar em valor negativo, deverá existir uma armadura negativa na parte superior da sapata.

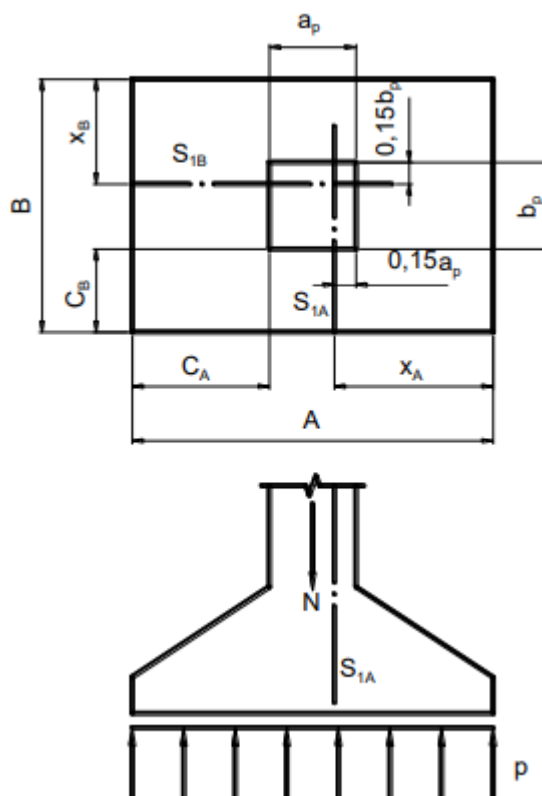
Figura 3.21 Diagrama para cálculo do momento fletor na seção de referência S_1 .



Fonte: Bastos, 2016.

Contudo, para que seja iniciado os cálculos é imprescindível que se entenda como estão posicionados e relacionados alguns parâmetros que serão discutidos a seguir, para isso a Figura 3.22 traz uma simplificação das notações cujo entendimento é necessário para obtenção dos momentos.

Figura 3.22 Notações e seções de referência.



Fonte: Bastos, 2016.

As distâncias x_A e x_B são:

$$x_A = c_A + 0,15a_p \quad (4.25)$$

$$x_B = c_B + 0,15b_p \quad (4.26)$$

Os momentos fletores relativos às seções de referência são calculados em função das dimensões A e B, da pressão que o solo exerce sobre a base da sapata e das distâncias x_A e x_B , sendo que os valores de p, x_A e x_B podem ser encontrados da seguinte forma:

$$M_{1A} = p \frac{x_A^2}{2} B \quad (4.27)$$

$$M_{1B} = p \frac{x_B^2}{2} A \quad (4.28)$$

O valor encontrado para esses momentos é utilizado para calcular a área de aço necessária em cada direção. Assim, tem-se:

$$A_s = \frac{M_d}{0,85d \cdot f_{yd}} \quad (4.29)$$

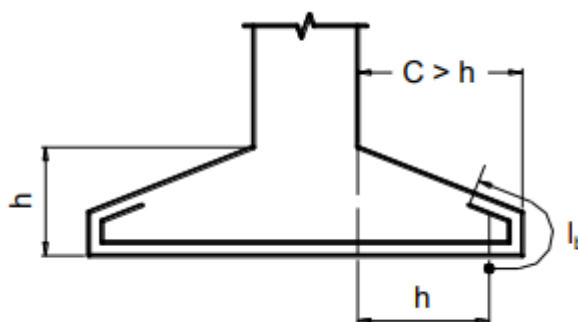
Onde,

d – Altura útil da seção de referência,

f_{yd} – resistência característica do aço.

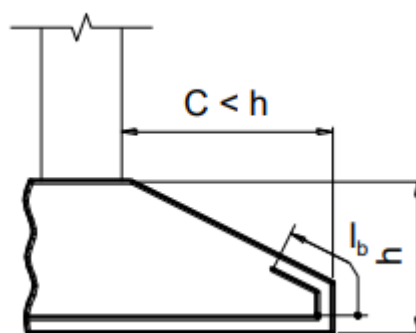
Ao tratar de ancoragem, o modelo de cálculo considera duas possibilidades para ancorar a armadura de flexão nas extremidades da sapata, são elas: quando $c > h$ e quando $c < h$, conforme representação nas Figura 3.23 e Figura 3.24.

Figura 3.23 Ancoragem da armadura quando $c > h$.



Fonte: Bastos, 2016.

Figura 3.24 Ancoragem da armadura quando $c < h$.



Fonte: Bastos, 2016.

Bastos (2016) comenta que quando acontece de c ser maior que h a armadura será ancorada a partir de uma seção distante h da face do pilar e deve se estender até as bordas da sapata. No entanto, quando ocorre o contrário, em que c é menor que h , a ancoragem deve acontecer na vizinhança imediata da barra e seu comprimento deve ser medido a partir da extremidade retilínea da barra.

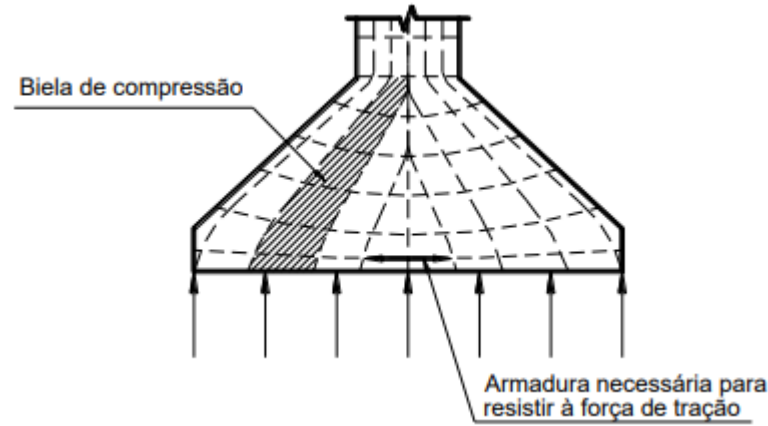
Nas Figuras 4.22 e 4.23 são apresentados os comprimentos de ancoragem necessários (l_b), que são dispostos de forma diferente para cada caso em virtude das condições mencionadas acima.

3.3.3.2 Método das bielas

O método de bielas e tirantes é amplamente utilizado na Europa e no Brasil por ser mais simples e intuitivo. Seu emprego é bastante útil, e recomendado, quando se tem carregamento centrado na estrutura, como é o caso dos edifícios. Nesse método os tirantes

representam as armaduras e as bielas representam as tensões resultantes de compressão no concreto armado (Figura 3.25).

Figura 3.25 Caminhamento da carga do pilar em direção à base da sapata.



Fonte: Bastos, 2016.

Proposto por Lebel (1936), o modelo de bielas e tirantes se aplica às sapatas corridas e isoladas, tendo como limite a seguinte Eq. 4.30.

$$d \geq \frac{A - a_p}{4} \quad (4.30)$$

De acordo com a Eq. 4.1, item 3.2.1, que diz respeito à classificação da sapata conforme sua altura h , é possível notar que o limite proposto por Lebel corresponde à sapata flexível, uma vez existe uma faixa de valores para d que, se adotados, resultarão na sapata flexível (BASTOS, 2016).

Após a análise dos valores de d , uma vez constatado que o valor atende ao requisito imposto pela equação, dá-se início, portanto, ao cálculo das forças de tração na base da sapata. Essas forças, também conhecidas como tirantes (T_y e T_x), são calculadas nas duas direções da fundação e são encontradas em conformidade com a equação 4.31 e 4.32.

$$T_y = \frac{N_k}{8} \cdot \frac{(B - b_p)}{d} \quad (4.31)$$

$$T_x = \frac{N_k}{8} \cdot \frac{(A - a_p)}{d} \quad (4.32)$$

Conforme o método, a área de aço para armaduras de flexão será calculada da seguinte forma:

$$A_{s,A} = \frac{T_x}{f_{yd}} \quad (4.33)$$

$$A_{s,B} = \frac{T_y}{f_{yd}} \quad (4.34)$$

Sendo,

f_{yd} – resistência característica do aço.

4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada estará embasada em levantamento bibliográfico, interpretação de modelos de cálculo e desenvolvimento de planilha numérica que será utilizada como ferramenta para a elaboração do trabalho.

Inicialmente, o projeto constitui-se em uma revisão bibliográfica com base em trabalhos apresentados por BASTOS (2016), TEIXEIRA e GODOY (1998), entre outras referências que tratam dos princípios de dimensionamento estrutural de sapatas isoladas.

Por fim, as ideias e modelos de cálculo consultados no trabalho servirão de base para a elaboração de uma planilha em Excel. A planilha será validada por meio do emprego de diferentes exemplos, que retratem um amplo espectro de aplicação prática, e da comparação dos seus resultados com o *software* SAPFORTE v20.

4.1 ESTRUTURAÇÃO DA PLANILHA

A planilha é dividida em quatro guias, sendo elas: geometria, punção, bielas e tirantes e CEB – 70. A guia de geometria, que se refere aos parâmetros de entrada, engloba desde dimensões dos pilares, cargas, dimensionamento da sapata até a definição de dados relacionados ao concreto e aço.

A guia de punção, por sua vez, se atém às verificações relacionadas ao puncionamento. No entanto, é válido ressaltar que essa verificação só é feita quando se tem sapatas flexíveis, desse modo, considerando análises feitas no contorno C e C', essa guia da planilha calcula as tensões cisalhantes, verifica a fissuração da diagonal e ruptura por esmagamento da biela.

Por último, são utilizados modelos de cálculo CEB – 70 e bielas e tirantes para determinação das armaduras necessárias da fundação, além disso na guia das bielas há uma representação dessas armaduras de uma forma simples.

4.1.1 Geometria dos pilares e cargas

Ao abrir a planilha, na guia “Geometria”, o usuário deverá inserir os dados de entrada na tabela cujo nome é “Parâmetros de entrada” (Figura 4.1), esses dados consistem em informações do solo como tensão admissível, quantidade de pilares que possuem o mesmo tipo de sapata em comum e suas respectivas dimensões (h_x e h_y), bem como as cargas que atuam sobre a estrutura, sendo elas momento fletor (M_x e M_y) e carga vertical (N_k).

Figura 4.1 Planilha eletrônica - dados de entrada.

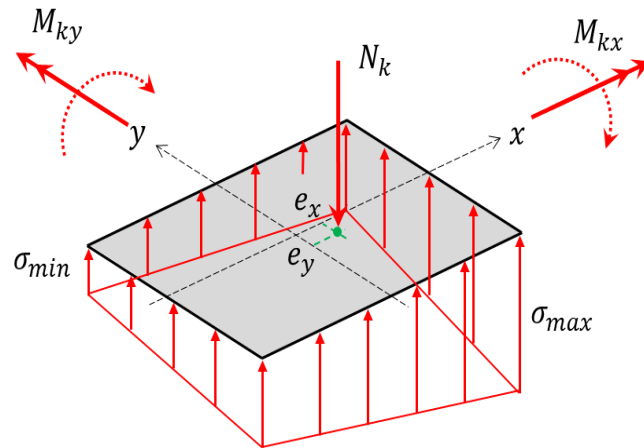
PARÂMETROS DE ENTRADA							
PILAR	GEOMETRIA DO PILAR		CARGAS				FATOR MAJORADOR
Nº	h_x (cm)	h_y (cm)	N_k (kN)	M_{kx} (kNm)	M_{ky} (kNm)	σ_{adm} (kPa)	w
1	35	45	1200	0	0	239	5,0%
2	30	80	1250	0	0	239	5,0%
3	40	77	1303	0	200	239	5,0%
4	35	50	1100	800	0	239	5,0%
5	30	45	2005	200	550	239	5,0%

Fonte: Autor, 2023.

Visando auxiliar o usuário, implementou-se imagens ao lado de algumas tabelas dessa guia “Geometria” com o intuito de garantir o melhor entendimento acerca dos dados que serão inseridos em cada etapa. Sendo assim, no que diz respeito às cargas, tem-se a seguinte a

representação (Figura 4.2):

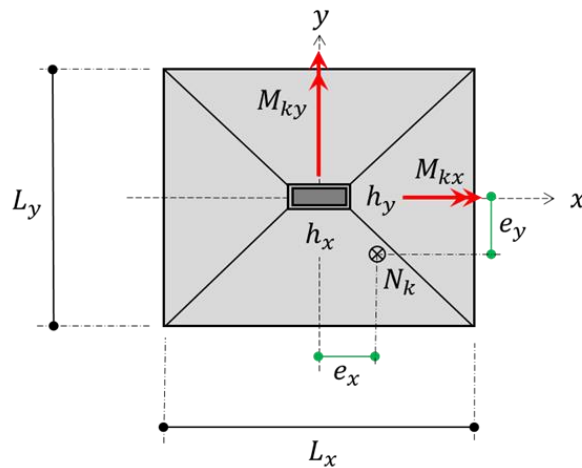
Figura 4.2 Representação das cargas para auxiliar o usuário.



Fonte: Autor, 2023.

Todos esses dados são necessários para que se possa estimar a geometria da sapata, como as dimensões horizontais da mesa nas duas direções (h'_x e h'_y), dimensões da base da sapata (L_x e L_y), bem como o cálculo de sua área (A_{sap}), conforme visualização da Figura 4.3.

Figura 4.3 Representação das dimensões e das mesas das sapatas.



Fonte: Autor, 2023.

Dentro da planilha, as estimativas calculadas serão apresentadas de acordo com o que é apresentado na Figura 4.4. Nela pode ser observada, além dos fatores já mencionados acima, as alturas da sapata nas duas direções.

Figura 4.4 Planilha eletrônica - estimativas iniciais.

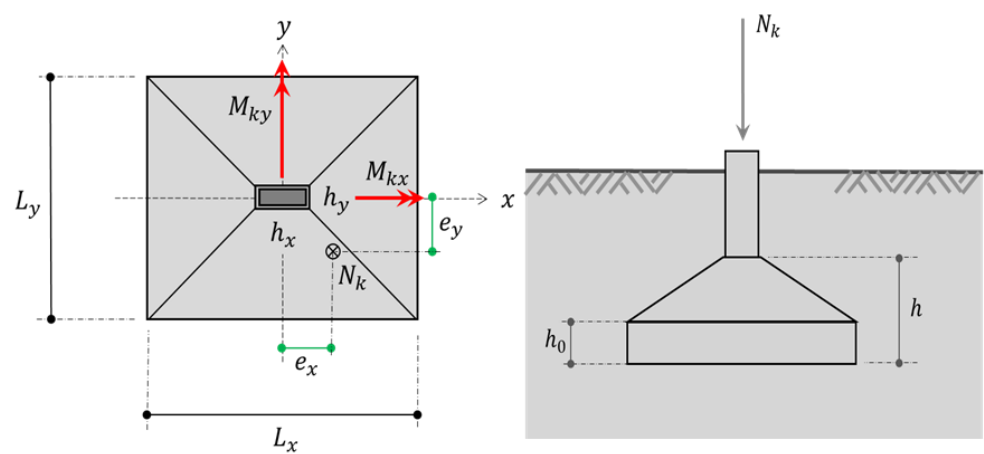
ESTIMATIVAS INICIAIS							
PILAR	DIMENSÕES DA MESA DA SAPATA		DIMENSÕES ESTIMADAS			ALTURA DA SAPATA NAS DUAS DIREÇÕES	
Nº	h'x (cm)	h'y (cm)	Lx (cm)	Ly (cm)	A _{sap} (m²)	hx (cm)	hy (cm)
1	40	50	225,0	235,0	5,27	65	65
2	35	85	210,0	260,0	5,49	60	60
3	45	82	220,0	257,0	5,72	60	60
4	40	55	210,0	225,0	4,83	60	60
5	35	50	290,0	305,0	8,81	85	85

Fonte: Autor, 2023.

4.1.2 Dimensionamento e verificação estrutural da sapata

Uma vez dado início às estimativas iniciais, a planilha fará o cálculo dos parâmetros finais da fundação, sendo eles: excentricidades (e_x e e_y), módulo elástico à flexão (W_x e W_y), altura da sapata (h) e do rodapé (h_0), o volume de concreto necessário para execução da fundação, o peso total do elemento (W) e, por último, a % que representa o acréscimo devido ao seu peso próprio (W/N_k). Abaixo, Figura 4.5, são esquematizadas algumas variáveis para que o usuário possa compreender a forma como elas se apresentam na sapata e a Figura 4.6 apresenta como se dá a disposição dos dados dentro da planilha.

Figura 4.5 Representação esquemática do NCI e excentricidades geradas pelos momentos fletores.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 4.6 Planilha eletrônica - parâmetros geométricos e estruturais finais.

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E ESTRUTURAIS FINAIS												
PILAR	DIMENSÕES FINAIS ADOTADAS		ÁREA	ALTURA FINAL	ALTURA DO RODAPÉ	MÓDULO ELÁSTICO À FLEXÃO		EXCENTRICIDADES		VOLUME DE CONCRETO	PESO	ACRÉSCIMO DEVIDO AO PESO PRÓPRIO
Nº	L _x (cm)	L _y (cm)	A _{sap} (m²)	h (cm)	h ₀ (cm)	W _x (cm³)	W _y (cm³)	e _x (cm)	e _y (cm)	V (m³)	W (kN)	W/N _k
1	225,0	235	5,29	65	20	2070937,5	1982812,5	0,00	0,00	2,03	50,87	4,2%
2	210,0	260	5,46	60	20	2366000,0	1911000,0	0,00	0,00	2,03	50,74	4,1%
3	220,0	255	5,61	60	20	2384250,0	2057000,0	14,62	0,00	2,11	52,78	4,1%
4	210,0	225	4,73	60	20	1771875,0	1653750,0	0,00	69,26	1,74	43,51	4,0%
5	290,0	305	8,85	85	30	4496208,3	4275083,3	26,13	9,50	4,54	113,38	5,7%

Fonte: Autor, 2023.

A parte de verificação estrutural é feita com base na análise das tensões na base da sapata ($\sigma_{\max}$ e $\sigma_{\min}$) e na análise do quanto às cargas estão dentro do Núcleo Central de Inércia (NCI).

Nesse sentido, os resultados encontrados através da verificação do NCI são relevantes pois identificam se a fundação perderá contato com o solo. Enquanto, por outro lado, a verificação das tensões mínimas identifica se haverá colapso ou não da fundação. Assim, a planilha dispõe de uma tabela que apresenta explicitamente a análise final desses parâmetros (Figura 4.7).

Figura 4.7 Planilha eletrônica - verificação do NCI e tensões na base da sapata.

VERIFICAÇÃO DO NCI E TENSÕES NA BASE					
PILAR	NCI	RESULTADO	$\sigma_{\max}$ (kPa)	$\sigma_{\min}$ (kPa)	RESULTADO
1	0,00	OK	238,3	238,3	OK
2	0,00	OK	240,4	240,4	COLAPSO DA FUNDAÇÃO
3	0,40	OK	341,1	146,6	COLAPSO DA FUNDAÇÃO
4	1,85	CARGAS FORA DO NCI	695,9	-207,1	ALTERE AS DIMENSÕES DA SAPATA!
5	0,73	OK	411,2	64,9	COLAPSO DA FUNDAÇÃO

Fonte: Autor, 2023.

É válido mencionar que o cálculo das tensões é realizado considerando que as cargas estão dentro do NCI, quando acontece de as cargas estarem fora a metodologia de cálculo passa a ser outra.

No entanto, a planilha ainda não realiza a verificação das tensões na base da sapata para os casos em que se têm cargas fora no Núcleo Central de Inércia. Em virtude disso, é apresentado ao usuário um texto informativo indicando o aumento das dimensões da sapata para que seja possível realizar o cálculo, conforme pode ser visualizado para o Pilar 4 (P4) na

Figura 4.7 acima.

No caso em que as cargas estão dentro do NCI, o resultado apresentado será “OK”, em seguida, é verificada a possibilidade de colapso da fundação em detrimento das tensões na base da sapata. Dessa maneira, caso a condição tenha apresentado como resultado “COLAPSO DA FUNDAÇÃO” o usuário deverá retornar aos parâmetros geométricos da fundação para alterar as dimensões da sapata objetivando, portanto, o atendimento à condição.

4.1.3 Concreto e aço

Nesta parte será necessário inserir alguns dados relacionados ao concreto e ao aço, como classe de agressividade do ambiente, a resistência característica do concreto (f_{ck}), o diâmetro das barras de aço ($\emptyset$) que se pretende utilizar e o cobrimento das armaduras (c) (Figura 4.8).

Figura 4.8 Planilha eletrônica - seção para inserção de dados do concreto e do aço.

CONCRETO E AÇO						
PILAR	Classe de agressividade	Fundação f_{ck} (MPa)	$\emptyset_{sapata}$ (mm)	Cobrimento (cm)	AÇO	$\emptyset_{pilar}$ (mm)
1	II	25	10,0	3,0	CA-50	10
2	IV	25	10,0	5,0	CA-50	10
3	IV	25	10,0	5,0	CA-60	12,5
4	I	25	10,0	3,0	CA-50	16
5	III	25	10,0	4,0	CA-50	12,5

Fonte: Autor, 2023.

Alguns dados são pré-definidos dentro da planilha, como é o caso do cobrimento, da bitola e do f_{ck} . e aço. Na NBR 6118/2023, é pontuado que o cobrimento varia conforme a classe de agressividade do ambiente, desse modo, ao definir a classe de agressividade o usuário define automaticamente o cobrimento. Contudo, caso opte pela alteração desse dado poderá fazê-lo sem restrição alguma.

No que se refere ao diâmetro da barra de aço, poderão ser escolhidos diâmetros comerciais de 10 mm a 25 mm. Sendo, portanto, 10 mm o mínimo. Já em se tratando f_{ck} são disponibilizadas classes de 20 MP a 50 MPa. A coluna de aço permite à liberdade ao projetista de escolher entre os que são comercializados no mercado, que são: CA-25, CA-50, e CA-60.

4.1.4 Verificação ao puncionamento

Nessa guia, é dado início ao cálculo de três pontos importantes: tensão de cisalhamento, diagonal comprimida e fissuração da diagonal. No primeiro, serão calculados a força solicitante de cálculo (F_{sd}), a altura útil média (d_{med}), perímetro do contorno C' (u_0) e a tensão cisalhante solicitante (τ_{sd}) nesse mesmo contorno C' .

Na segunda parte, que se refere à diagonal comprimida, a planilha faz o cálculo do f_{cd} do concreto de acordo com o que é normatizado pela NBR 6118/2023, em seguida determina a tensão resistente de cálculo (τ_{Rd2}). O resultado da tensão resistente é comparado com o valor da tensão cisalhante solicitante, de modo que essa comparação pode resultar em “OK” ou “RUPTURA POR ESMAGAMENTO DO CONCRETO”, dessa forma, entende-se que a análise da diagonal comprimida consiste na compreensão acerca do esmagamento da biela de concreto.

Por último, será feita a verificação da fissuração da diagonal, para isso, são calculados fatores como: taxa de armaduras (ρ), tensão resistente de cálculo (τ_{Rd1}). De posse desses dados, a planilha fará a verificação para ver se ocorrerá fissuração da diagonal.

4.1.5 Dimensionamento das armaduras

Por fim, a última parte do dimensionamento será o detalhamento e dimensionamento das armaduras para a sapata. O método que a planilha usa para fazer esse dimensionamento é o CEB – 70 e o modelo de bielas e tirantes. Desse forma, conforme visualização da

Figura 4.9, nesta seção serão determinadas as quantidades de barras tanto na direção A (N_a) quanto B (N_b), o espaçamento entre essas barras (S_A e S_B), e a área de aço em ambas direções ($A_{s,a}$ e $A_{s,b}$), além dos tirantes em cada direção ($\tau_{y,b}$ e $\tau_{y,a}$) que representam as forças que atuam nas direções da sapata e que são essenciais para determinação das armaduras citadas acima e, ainda, os comprimentos de ancoragem para o pilar e a sapata.

Figura 4.9 Planilha eletrônica - determinação das armaduras.

PILAR	DETERMINAÇÃO DAS ARMADURAS							
Nº	$T_{y,b}$ (kN)	$A_{s,b}$ (cm²)	N_b	S_b (cm)	$T_{y,a}$ (kN)	$A_{s,a}$ (cm²)	N_a	S_a (cm)
1	480,34	15,47	20	11,00	480,34	15,47	20	12,00
2	520,83	16,77	22	9,00	520,83	16,77	22	12,00
3	542,92	17,48	23	9,00	536,88	17,29	23	11,00
4	442,87	14,26	19	11,00	442,87	14,26	19	12,00
5	797,91	25,69	33	9,00	797,91	25,69	33	9,00

Fonte: Autor, 2023.

A última Tabela, apresentada na Figura 4.10, consiste na representação dessas armaduras nas duas direções, para o caso de bielas e tirantes.

Figura 4.10 Representação simplificada das armaduras nas duas direções (método de bielas e tirantes).

PILAR	REPRESENTAÇÃO DAS ARMADURAS			
	DIREÇÃO A (direção principal)		DIREÇÃO B (direção secundária)	
	DESCRIÇÃO		DESCRIÇÃO	
1	17 229 17	20 N1 Ø 10 C/ 12 C=263	14 219 14	20 N2 Ø 10 C/ 11 C=247
2	15 250 15	22 N1 Ø 10 C/ 12 C=280	10 200 10	22 N2 Ø 10 C/ 9 C=220
3	15 245 15	23 N1 Ø 10 C/ 11 C=275	10 210 10	23 N2 Ø 10 C/ 9 C=230
4	17 219 17	19 N1 Ø 10 C/ 12 C=253	14 204 14	19 N2 Ø 10 C/ 11 C=232

Fonte: Autor, 2023.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram escolhidos 5 pilares com dimensões de seção transversal e esforços hipotéticos para compor a base de dados de teste da planilha desenvolvida. Para essa validação, considerou-se casos em que há somente o carregamento simétrico e casos em que há influência dos momentos fletores (Tabela 5-1).

Tabela 5-1 Dados de entrada na planilha eletrônica.

Dados de entrada da planilha						
Pilar	Dimensões		Cargas			Fator maj.
	h_y (cm)	h_x (cm)	N_k (kN)	M_{kx} (kNm)	M_{ky} (kNm)	W (%)
P1	20	30	1200	0	0	5
P2	30	80	1250	0	0	5
P3	40	77	1303	0	200	5
P4	35	50	1100	800	0	5
P5	30	45	2005	200	550	5

Fonte: Autor, 2023.

Os resultados obtidos por meio da planilha eletrônica foram comparados com os resultados do SAPFORTE v20. Este *software* é disponibilizado pela TQS e desenvolvido pelo Engenheiro Civil João Pedro Aparecido cujo roteiro de cálculo foi concebido por meio da

apostila do Bastos (2016), além disso, para determinação das armaduras o *software* utiliza o modelo de cálculo do CEB-70. Sendo assim, a comparação dos resultados foi feita por meio da seguinte ordem: dimensionamento geométrico, cálculo estrutural e determinação das armaduras.

5.1 DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO

A Tabela 5-2 apresenta a comparação entre os lados da base da sapata (L_x e L_y) apresentadas no projeto do *software* e os obtidos por meio da planilha.

Tabela 5-2 Dimensões da sapata encontradas pelo *software* e pela planilha eletrônica.

Pilar	Dimensões da sapata (cm)			
	Planilha Eletrônica		SAPFORTE	
	L_x	L_y	L_x	L_y
P1	225	235	225	235
P2	210	260	210	260
P3	220	255	220	257
P4	210	225	215	230
P5	290	305	290	305

Fonte: Autor, 2023.

Observa-se pouca variação dos resultados obtidos, no entanto nota-se que há uma diferença entre as dimensões dos pilares P3 e P4. O caso do P3 é justificado por meio da metodologia de cálculo empregada dentro da planilha. Ao dimensionar L_x utiliza-se como variável o valor da altura da mesa da sapata que é a dimensão de cada pilar acrescida de mais 5 cm. Dessa forma, os cálculos são realizados utilizando valores de 45 cm e 82 cm para h'_x e h'_y , respectivamente.

Em contrapartida, o SAPFORTE v20 utiliza as próprias dimensões dos pilares, 40 cm e 77 cm, para fornecer o cálculo das dimensões, resultando em 220 cm para L_x e 257 cm para L_y .

Outra divergência observada foi em relação à altura h e h_0 da sapata, conforme visualizado na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 Valores encontrados para h e h_0 .

Planilha Eletrônica			SAPFORTE	
Pilar	h (cm)	h_0 (cm)	h (cm)	h_0 (cm)
P1	70	25	70	25
P2	60	20	60	20
P3	60	20	60	20
P4	60	20	60	20
P5	85	30	90	30

Fonte: Autor, 2023.

A diferença entre os valores de h e h_0 se dá pelo fato de que a planilha arredonda o valor para o múltiplo de 5 mais próximo do valor encontrado, por exemplo se o resultado de h for 61,33 cm a planilha irá arredondar para 60 cm, já o programa arredonda para o múltiplo imediatamente superior que, neste caso em específico, seria 65 cm.

5.2 PARÂMETROS ESTRUTURAIS

O Núcleo Central de Inércia (NCI), que diz respeito à perda de contato com o solo, faz parte de uma das verificações propostas e incrementadas na rotina de cálculo da planilha, contudo o SAPFORTE v20 não faz o mesmo procedimento. Dessa forma, não possibilita ao projetista a compreensão acerca do posicionamento das cargas em relação ao NCI, por esse motivo não houve forma de validar este resultado. Entretanto, os valores encontrados no Excel são apresentados na Tabela 5-4 a seguir:

Tabela 5-4 valores das excentricidades e NCI.

Planilha Eletrônica					
Pilar	P1	P2	P3	P4	P5
e_x (cm)	0,0	0,0	14,62	0,0	26,13
e_y (cm)	0,0	0,0	0,0	69,26	9,50
NCI	0,0	0,0	0,40	1,85	0,73

Fonte: Autor, 2023.

Observando os resultados, é notório que o pilar P4 é o único que possui as cargas fora do Núcleo Central de Inércia uma vez que apresenta como resultado um valor acima de 1. Esse

tipo de comportamento tende a acontecer quando as cargas gravitacionais são relativamente menores em relação ao momento significando, portanto, que as cargas que teoricamente deveriam estar comprimindo a base da sapata, estão fazendo a fundação se levantar.

Consultando a Tabela 5-1 e Tabela 5-4 é possível constatar que o P4 é submetido a um momento de 800 kNm na direção x o que, por consequência, conduziu a uma excentricidade considerável na direção y.

Semelhante ao NCI, as verificações das tensões máximas e mínimas na base da sapata também não são rotinas de cálculo dentro do SAPFORTE v20 inviabilizando qualquer hipótese de comparação. Contudo, elas são importantes no dimensionamento para verificar se haverá colapso da fundação, assim sendo, a Tabela 5-5 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5-5 Tensões máximas e mínimas na base da sapata.

Pilar	$\sigma_{\max}$ (kPa)	$\sigma_{\min}$ (kPa)
P1	238,3	238,3
P2	240,4	240,4
P3	341,1	146,6
P4	-	-
P5	411,2	64,9

Fonte: Autor, 2023.

A verificação da Tabela 5-5 é feita comparando os resultados de tensão máxima com o valor adotado para tensão admissível. Nesse sentido, é importante mencionar que o valor adotado para tensão admissível foi de 2,44 kg/cm² (239 kPa) em ambos os casos.

Analisando os resultados obtidos para as tensões, observa-se que as tensões máximas são todas superior à tensão admissível, dessa forma fica compreendido que haverá colapso da fundação em quase todos os casos uma vez que o σ_{adm} inserido para o solo foi de 239 kPa. Para que não ocorra o colapso é necessário que as tensões máximas não ultrapassem o valor correspondente à tensão admissível, como é o caso, por exemplo, da fundação que recebe o P1 cuja tensão máxima foi de 238,3 kPa.

Nota-se ainda que o P4, por sua vez, não apresenta resultado algum pois as cargas que atuam sobre ele estão fora do NCI e, neste caso, a planilha não faz a verificação porque necessita que seja implementada dentro da sua rotina de cálculo outra metodologia.

Outro ponto importante a ser verificado é se os balanços são iguais para que seja possível proporcionar armaduras semelhantes nas duas direções da sapata. Assim, considerando $C_A = C_B$,

tem-se os valores encontrados pelos programas (Tabela 5-6):

Tabela 5-6 Balanços nas duas direções (ca e cb).

Pilar	Balanços (cm)	
	Planilha Eletrônica	SAPFORTE
P1	102,5	102,5
P2	90	90
P3	89	90
P4	88	90
P5	130	130

Fonte: Autor, 2023.

Avaliando os resultados da Tabela 5-6, vê-se que tanto a planilha do Excel quanto o *software* seguem a mesma trajetória de cálculo visto que os balanços são semelhantemente iguais para ambos os casos. Sendo assim, espera-se que as armaduras encontradas ao final sejam semelhantes visto que a consideração sobre os balanços serem iguais se apoia neste objetivo.

5.3 PUNCIONAMENTO

Tanto a planilha quanto o programa, ao fazer o dimensionamento, consideram que as sapatas são do tipo rígidas. Dentro do método de cálculo, é feita a verificação da altura em ambas as direções selecionando, ao final, o maior valor entre elas para ser a altura final da sapata (h).

Dessa forma, fica assegurado que as sapatas serão classificadas como rígidas e não como flexíveis. Nesse sentido, por serem rígidas, é dispensada a verificação ao puncionamento e dá-se início a verificação da compressão da biela.

Essa verificação se apoia na comparação entre a tensão cisalhante solicitante e a tensão resistente, de modo que a tensão resistente deve ser maior ou igual a solicitante. Se a tensão resistente for menor indica que ocorrerá o esmagamento da biela (concreto). Para determinar a tensão solicitante (τ_{sd}) é preciso definir e calcular alguns parâmetros antes, sendo eles altura útil, força gravitacional com seu valor de cálculo e o perímetro do pilar, todos são apresentados na Tabela 5-7.

O cálculo da altura útil (d), por sua vez, é feito por meio da média entre os valores de h nas duas direções da sapata.

Tabela 5-7 Parâmetros para cálculo da tensão cisalhante solicitante.

Pilar	Planilha Eletrônica			SAPFORTE		
	F_{Sd} (kN)	d (cm)	u_0 (cm)	F_{Sd} (kN)	d (cm)	u_0 (cm)
P1	1680	64	100	1680	67	100
P2	1750	56	220	1750	57	220
P3	1824,2	56	234	1824,2	57	234
P4	1540	54	170	1540	57	170
P5	2807	82	150	2807	87	150

Os únicos valores que se apresentam de forma diferente na Tabela 5-7, são os que têm relação direta com as dimensões estimadas para sapata e que também estão sujeitos aos arredondamentos, neste caso os valores distintos em questão se referem ao parâmetro d (altura útil). Como consequência, espera-se que ocorra essa mesma diferenciação nos valores para tensão resistente e tensão cisalhante, uma vez que elas dependem diretamente desse parâmetro.

É importante salientar que durante o cálculo do τ_{Sd} na planilha do Excel observou-se que o momento influencia poucos nos resultados da tensão solicitante para os exemplos analisados, no entanto, novos testes podem ser feitos posteriormente para verificar essa influência. Em virtude disso, na Tabela 5-8 o τ_{Sd} utilizado será o que considera somente as cargas gravitacionais. Dessa maneira, de posse dos valores apresentados abaixo (Tabela 5-8) é possível compreender se ocorrerá esmagamento do concreto ou não.

Tabela 5-8 Determinação das tensões τ_{Sd} e τ_{Rd2} .

Pilar	Planilha Eletrônica		SAPFORTE	
	τ_{Sd} (MPa)	τ_{Rd2} (MPa)	τ_{Sd} (MPa)	τ_{Rd2} (MPa)
P1	2,6	4,3	2,5	4,3
P2	1,4	4,3	1,4	4,3
P3	1,4	4,3	1,4	4,3
P4	1,7	4,3	1,6	4,3
P5	2,3	4,3	2,2	4,3

Fonte: Autor, 2023.

Como as tensões resistentes são superiores às cisalhantes solicitantes, em ambos os

casos, não há possibilidade de ocorrer o esmagamento da biela.

A planilha, por ser mais dinâmica, permite que o usuário consiga alterar a altura h da sapata. Com essa liberdade, ele pode escolher um valor menor que o estimado, o que classificará a sapata como flexível. Então, em uma das etapas, optou-se por fazer essa alteração para que fosse feita a verificação ao puncionamento (Tabela 5-9) que consiste na avaliação da fissuração da diagonal. Assim sendo, mudando o valor de h , disposto na Tabela 5-3, para 65 cm foi possível obter:

Tabela 5-9 Verificação ao puncionamento na sapata do P5.

Pilar	τ_{sd} (MPa)	τ_{Rd1} (MPa)
P5	2,27	0,52

Fonte: Autor, 2023.

Constata-se, portanto, que a sapata que recebe o P5 irá puncionar, uma vez que o τ_{Rd1} é superior ao τ_{sd} .

5.4 ARMADURAS

A Tabela 5-10 e Tabela 5-11 compara os resultados obtidos na validação do cálculo estrutural, no qual observa-se semelhança entre as áreas de aço calculadas.

Tabela 5-10 Comparação das áreas de aço encontradas por meio de bielas e tirantes e pelo SAPFORTE v20.

BIELAS E TIRANTES					
Pilar	Planilha Eletrônica			SAPFORTE	
	$A_{s,a}$ (cm ²)	$A_{s,b}$ (cm ²)	$\varnothing$ (mm)	$A_{s,a}$ (cm ²)	$A_{s,b}$ (cm ²)
P1	15,39	15,39	10	17,35	17,62
P2	16,17	16,17	10	17,45	18,55
P3	16,75	16,93	12,5	18,29	19,05
P4	14,33	14,33	12,5	15,86	16,43
P5	25,46	25,46	12,5	28,25	28,74

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 5-11 Comparação das áreas de aço encontradas por meio do CEB -70 e pelo SAPFORTE V20.

CEB – 70					
Pilar	Planilha Eletrônica			SAPFORTE	
	$A_{s,a}$ (cm ²)	$A_{s,b}$ (cm ²)	$\varnothing$ (mm)	$A_{s,a}$ (cm ²)	$A_{s,b}$ (cm ²)
P1	16,65	17,17	10	17,35	17,62
P2	16,62	17,98	10	17,45	18,55
P3	16,96	18,33	12,5	18,29	19,05
P4	14,45	15,09	12,5	15,86	16,43
P5	28,65	26,60	12,5	28,25	28,74

Fonte: Autor, 2023.

É possível verificar as diferenças entre áreas de aço determinadas, com valores maiores obtidos nos cálculos do *software* SAPFORTE v20. Esse comportamento pode ser justificado por meio da relação entre a altura útil e a área de aço, uma vez que quanto maior for essa altura menor será a armadura necessária para compor a base da sapata.

Além disso, é notório que o método do CEB -70 é o que mais se aproxima dos valores estimados pelo *software*, isso porque o programa utiliza dentro da sua rotina de cálculo a mesma metodologia para determinação das armaduras.

5.5 DETALHAMENTO DAS SAPATAS

No Anexo I serão representadas as sapatas dimensionadas pelo próprio SAPFORTE V20, bem como as dimensionadas pela planilha. Desse modo, o objetivo é analisar e comparar como se deu o detalhamento das armaduras de cada sapata.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das observações e resultados obtidos nota-se que a proposta que a planilha eletrônica trouxe é muito eficiente, uma vez que os resultados gerados por ela, em sua maioria, são semelhantes ao que o *software* encontrou. Assim, por meio dela é possível realizar cálculos em tempo hábil, se comparado com os cálculos que os alunos fazem em sala de aula manualmente.

É válido ressaltar que a planilha apresenta, ainda, alguns fatores limitantes como é o caso de não conseguir gerar o detalhamento das sapatas e verificar as tensões máximas e mínimas em sapatas com cargas fora do NCI, contudo essa é uma limitação que pode ser contornada à medida em que forem sendo feitas implementações futuras.

Por fim, compreende-se a sua importância, sobretudo, para cenário acadêmico onde os recursos para obtenção de *softwares* são escassos. Assim sendo, por ter sido desenvolvida dentro do Excel o seu alcance será muito maior e será mais fácil de ser acessada e utilizada, uma vez que alunos de engenharia já possuem contato com a ferramenta da Microsoft.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, P. J. R.; Garcia, J. R. **Engenharia De Fundações**. Rio De Janeiro: Ltc, 2020.

Arcos Engenharia. **Entenda As Diferenças Entre Fundações Rasas E Fundações Profundas**. Disponível Em: <https://Arcos.Eng.Br/Entenda-As-Diferencasentre-Fundacoes-Rasas-E-Fundacoes-Profundas/>. Acesso: Em: 03 Jun. 2023.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (Abnt). **Projeto De Estruturas De Concreto**. Nbr 6118:2023. Rio De Janeiro, Abnt, 2023.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **Nbr 6122: Projeto E Execução De Fundações**. 2019. 32 P. Disponível Em: Chrome-Extension://Efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://Docente.Ifrn.Edu.Br/Valtencirgomes/ Disciplinas/Construcao-De-Edificios/Nbr-06122-1996-Projeto-E-Execucao-De-Fundacoes. Acesso Em: 15 Jun. 2023.

Bastos, Paulo Sérgio Dos Santos. **Sapatas De Fundação**. Bauru, 2016. Notas De Aula Do Curso De Estruturas De Concreto Iii Da Faculdade De Engenharia Da Unesp.

Broms, C. E., **Concrete Flat Slabs And Footings: Design Method For Punching And Detailing For Ductility**. Phd Thesis. Department Of Civil And Architectural Engineering, Division Of Structural Design And Bridges, Royal Institute Of Technology, Stockholm, Sweden, 2005, 114pp.

Campos, João Carlos De. **Elementos De Fundações Em Concreto**. São Paulo: Oficina De Textos, 2015. 479 P.

Chust, Roberto; Miranda, Libânio. **Cálculo E Detalhamento De Estruturas Usuais De Concreto Armado**. 2ª. Ed. São Paulo: Pini Ltda, 2013. 617 P. V. 2.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **Recommendations particulières au calcul et à l'exécution des semelles de fondation**. Bulletin d'Information n.73. Paris, 1970.

Gomes, Diego Silva. **Software Para Pré-Dimensionamento De Sapatas Isoladas**. 2021. 72 F. Tcc (Graduação) - Curso De Engenharia Civil, Ufpb, Pombal, 2021. Cap. 1. Disponível Em: <http://Dspace.Sti.Ufcg.Edu.Br:8080/Jspui/Bitstream/Riufcg/26325/3/Diego%20silva%20gomes%20-%20tcc%20engenharia%20civil%202021.Pdf>. Acesso Em: 10 Jun. 2023.

Guandalini S, Burdet, O. L. Muttoni A. (2009). **Symmetrical Punching Tests On Slabs Without Transverse Reinforcement**. Aci Structural Journal.

Hachich, W.; Falconi, F.F.; Saes, J.L.; Frota, R.G.Q.; Carvalho, C.S.; Niyama, S. **Fundações – Teoria E Prática**. São Paulo, Ed. Pini, Abms/Abef, 2ª. Ed., 2000, 751p.

Mccormac, J.C. ; Nelson, J.K. **Design Of Reinforced Concrete – Aci 318-05 Code Edition**. 7ª Ed., John Wiley & Sons, 2006, 721p.

Moura, G. R. De; Junior, W. S. S. **Transformações E Tendências Na História Da Engenharia Civil: Do Trabalho Manual À Sustentabilidade**. 2013.

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

Silva Filho, O. S.; Cezarino, W.; Ratto, J. **Planejamento Agregado Da Produção: Modelagem E Solução Via Planilha Excel & Solver**. Revista Produção Online, V. 9, N. 3, P. 572-599, 2009. Doi: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.V9i3.173> .

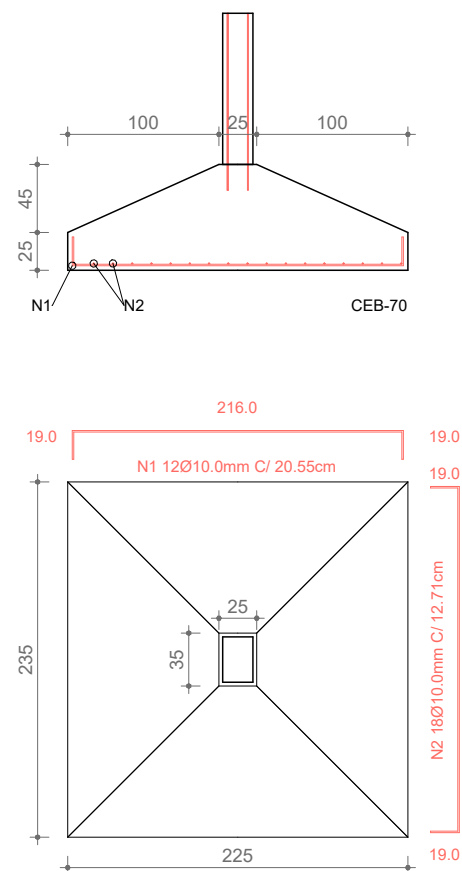
Souza, H. M.; Ramos, C.; Santos, R. R.; Rocha, R. S.; Silva, T. A.; Araujo, P. J. L. **Utilização De Sapata Na Construção Civil**. Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - Unit - Sergipe, [S. L.], V. 2, N. 1, P. 21–26, 2014. Disponível Em: <https://periodicos.set.edu.br/Cadernoexatas/Article/View/874>. Acesso Em: 26 Jun. 2023.

Teixeira, Alberto Henriques; Godoy, Nelson Silveira De. Análise, **Projeto E Execução De Fundações Rasas**. In: Fundações: Teoria E Prática. 2. Ed. São Paulo - Sp: Pini Ltda, 1998. Cap. 7. P. 227-264.

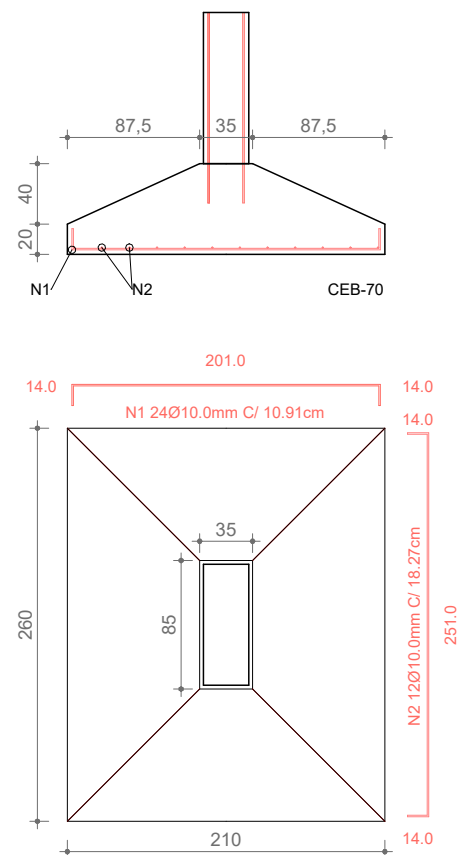
Voitille, Nadine. **Fundações Rasas, Superficiais Ou Diretas**. Disponível Em: <https://www.cliquearquitetura.com.br/artigo/fundacoes-rasas,-superficiais-oudiretas.html>. Acesso: Em: 10 Jun. 2023.

FREITAS, L. W. **Análise estrutural de um edifício em concreto armado e proposta de um novo projeto estrutural – estudo de caso**. 2016. 103 f. Trabalho de conclusão de curso (Especialização) – Centro Universitário do Sul de Minas – Unis/MG, Varginha, 2016.

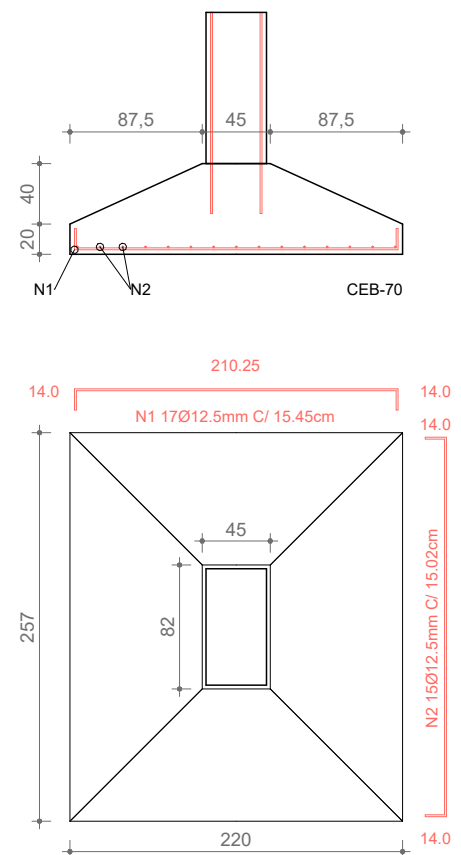
ANEXO



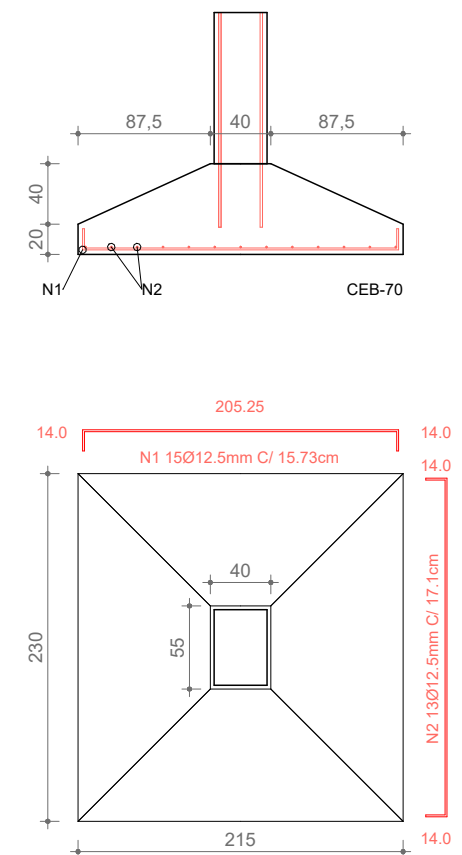
P1 - SAPFORTE
ESCALA 1 : 50



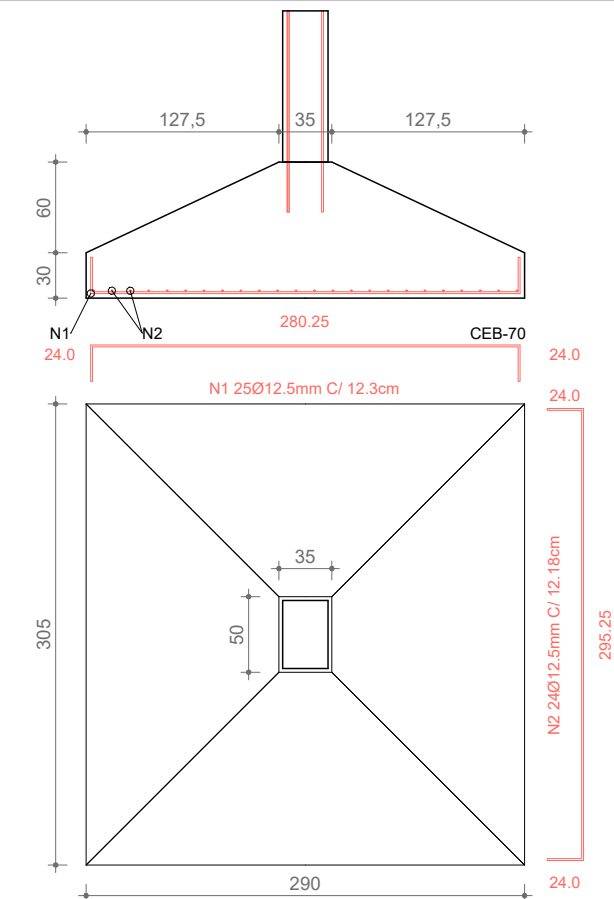
P2 - SAPFORTE
ESCALA 1 : 50



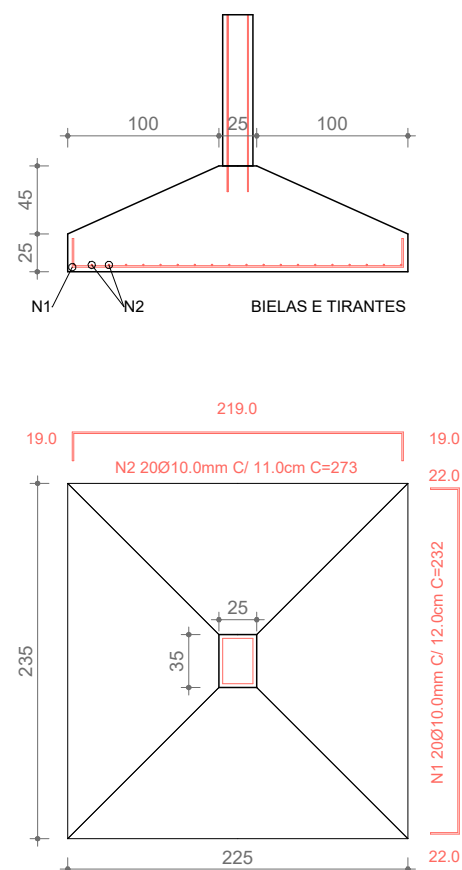
P3 - SAPFORTE
ESCALA 1 : 50



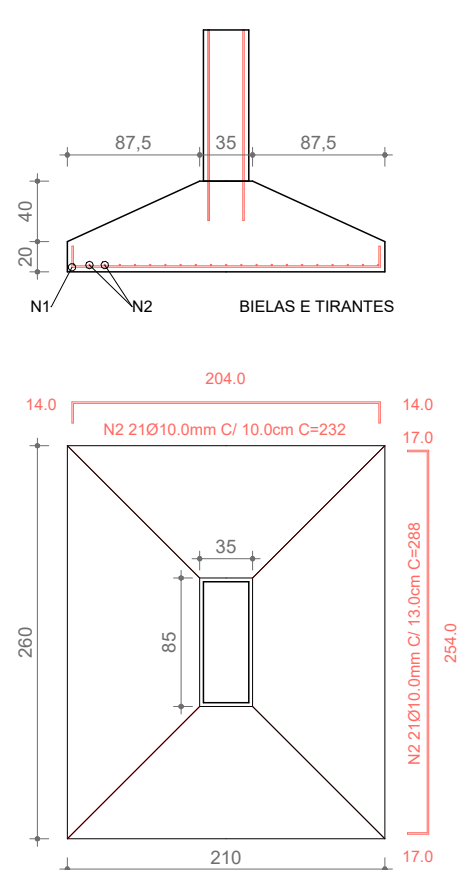
P4 - SAPFORTE
ESCALA 1 : 50



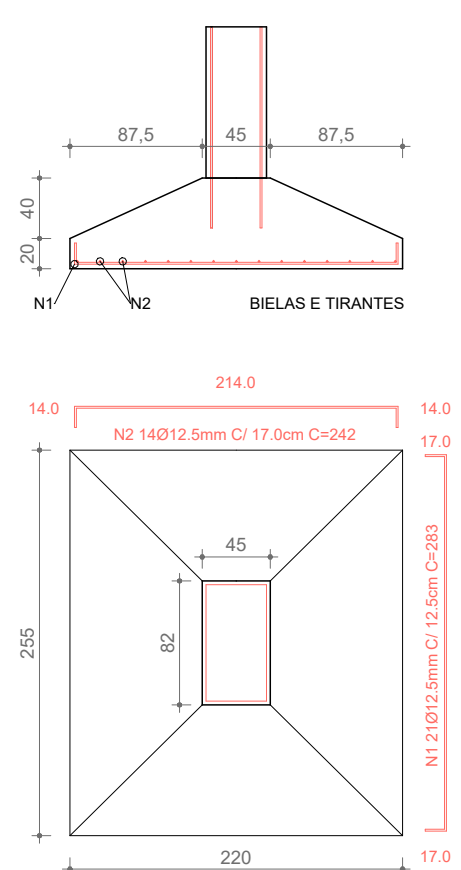
P5 - SAPFORTE
ESCALA 1 : 50



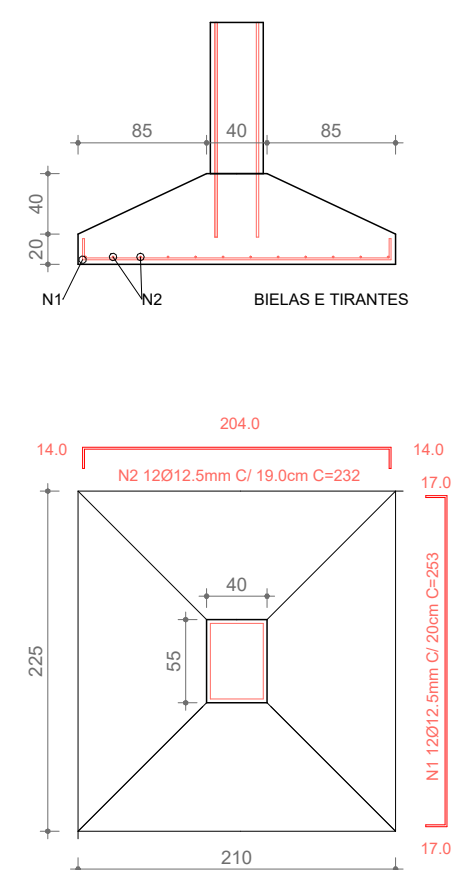
P1 - PLANILHA
ESCALA 1 : 50



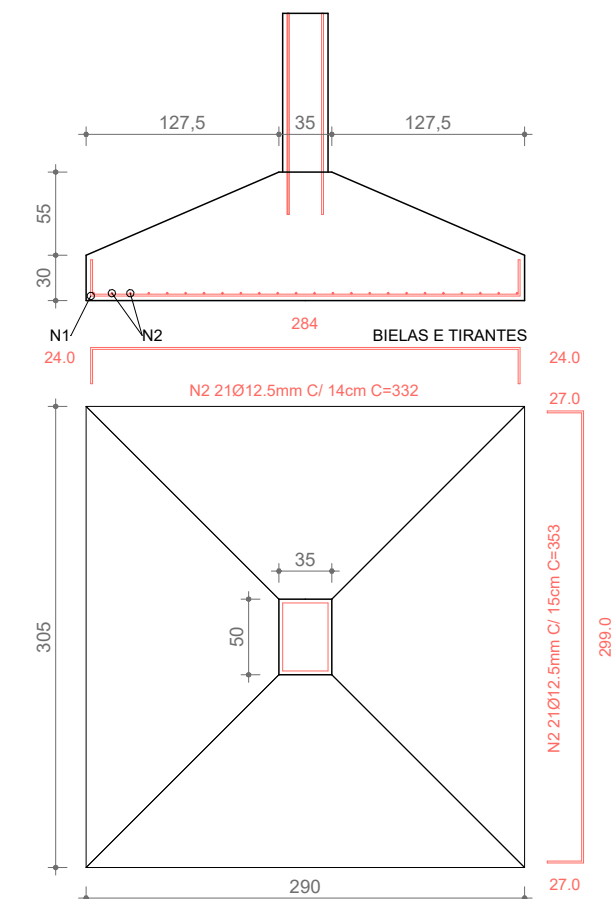
P2 - PLANILHA
ESCALA 1 : 50



P3 - PLANILHA
ESCALA 1 : 50



P4 - PLANILHA
ESCALA 1 : 50



P5 - PLANILHA
ESCALA 1 : 50