



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RENATO SOUSA BARROS

**APLICAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS
SUPERFICIAIS RÍGIDAS**

MOSSORÓ

2022

RENATO SOUSA BARROS

**APLICAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS
SUPERFICIAIS RÍGIDAS**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: John Eloi Bezerra, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2022

© 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.

B277a Barros, Renato Sousa.
Aplicação computacional para o dimensionamento
de sapatas superficiais rígidas / Renato Sousa
Barros. - 2022.
82 f. : il.

Orientador: John Eloi Bezerra.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2022.

1. Fundação. 2. Dimensionamento. 3. Excel. 4.
Solver. I. Bezerra, John Eloi, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

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.

RENATO SOUSA BARROS

**APLICAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS
SUPERFICIAIS RÍGIDAS**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: 28 / 11 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

John Eloi Bezerra, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

João Paulo Matos Xavier, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Ary Franck Baia Cordeiro, Dr. Engenheiro Civil (ROADS Engenharia)
Membro Examinador

Dedico este trabalho para meu pai, Francisco de Assis da Silva Barros, muito obrigado. (In Memoriam).

Dedico este trabalho a minha mãe, Luzia Maria Moura Sousa Barros, que sempre esteve comigo apoiando e dando forças para sempre continuar indo atrás dos meus objetivos, muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço imensamente aos meus pais, Luzia Maria Moura Sousa Barros e Francisco de Assis da Silva Barros (in memoriam) e minha irmã Annyka Maria Leal Cordeiro, que me aconselharam, estiveram ao meu lado, me educaram, me incentivaram a ir atrás dos meus objetivos, por mais que árduos forem, desde sempre. Obrigado por todo apoio na minha decisão de iniciar uma graduação em outro estado e por toda ajuda nas horas que mais precisei.

Agradeço em especial aos meus avós Messias Pedro Pacheco (in memoriam) e Marina Bezerra da Silva Pacheco e Pedro Bezerra de Sousa e Maria do Socorro Moura Sousa (in memoriam), que mesmo separados geograficamente, sempre estiveram juntos para me dar amor e força para que eu não desistisse da árdua jornada da graduação longe da família.

Agradeço aos meus tios João da Silva Moura e Maria Helena da Silva Moura e primos Jeison João da Silva Moura e Jucelia Maria da Silva Moura Piauilino que foram fator primordial para que minha graduação seja iniciada e concluída com sucesso, obrigado por sempre estarem ao meu lado e por todo apoio demonstrado nos momentos mais difíceis, afinal não foram poucos.

Agradeço fortemente aos meus amigos Andrey Dantas Pinheiro, Carol Sousa e Sabrina Rodrigues de Sousa, que sempre estiveram presentes desde o começo da graduação, nos momentos difíceis para me ouvir, dar conselhos, incentivar e acreditar no meu potencial. Agradeço imensamente aos amigos que adquiri ao decorrer da graduação que levarei para o resto da vida, Effenson Cayro Mendes Deodato, Francisco Charles Carvalho da Cruz, Luan Araújo Bezerra, Raul Lopes Rodrigues, João Vitor Ferreira Nunes, Kleide Dayana Oliveira Mendes, Luana Carla Rodrigues de Sá e Vanderbio Duarte Rodrigues Segundo que estiveram sempre à disposição para compartilharmos conhecimentos e ajuda nas horas que sempre precisei.

Agradeço ao Orientador, Professor Dr. John Eloi Bezerra por ter depositado confiança em mim e ter aceitado esse desafio de desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso e por me orientar nos estágios desenvolvidos ao decorrer do curso, que foram de essencial conhecimento para o meu desenvolvimento profissional.

A banca Examinadora composta pelo Prof. Dr. João Paulo Matos Xavier e o engenheiro civil Ary Franck Baia Cordeiro, agradeço imensamente pela disponibilidade de estarem presentes nessa etapa tão importante.

Faça seu melhor, na condição que você tem,
enquanto você não tem condições melhores,
para fazer melhor ainda.

Mário Sérgio Cortella.

RESUMO

As fundações são os elementos estruturais responsáveis por receber e direcionar ao solo de modo eficiente todas as cargas da edificação, o peso próprio, as sobrecargas, as cargas acidentais, as cargas oriundas de vento etc. Estes elementos podem ser concebidos de diferentes maneiras de acordo com as características da edificação, da composição do solo que as suportam e ainda da magnitude das cargas a que são submetidas.

A fundação tipo sapata é recomendada para solos que tenham relativa capacidade de suportar carga superficial, sem necessitar, contudo, de grande área de contato com o solo para absorver as tensões das cargas da construção. Sua execução é simples e pode ser realizada em praticamente qualquer tipo de obras.

Assim, as dimensões das sapatas superficiais influenciam diretamente para os cálculos de capacidade de cargas e para tensão admissível em que o solo suporta para as cargas aplicadas, ou seja, um superdimensionamento pode ocasionar gastos excessivos por parte de quem está executando sua edificação.

Nessa dissertação iremos demonstrar a aplicação computacional via o *Software Microsoft Excel* por meio do suplemento *Solver*, o dimensionamento de sapatas superficiais rígidas através de métodos teóricos catalogados em materiais bibliográficos, como os métodos de Terzaghi (1943) e de Vésic (1975), respectivamente. E a estimativa de recalque via método de Schmertmann et al. (1978), a fim de se obter o melhor dimensionamento, buscando a menor área efetiva da sapata em estudo, conforme os procedimentos contidos na NBR 6118:2014 - “*Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*” e NBR 6122:2019 – “*Projeto e execução de fundações*”, consequentemente, tendo um menor custo para a confecção dessas sapatas.

Palavras-chave: Fundações. Terzaghi. Vésic. Dimensionamento. Excel. Solver.

ABSTRACT

Foundations are the structural elements responsible for efficiently receiving and directing to the ground all building loads, self-weight, overloads, accidental loads, wind loads, etc. These elements can be conceived in different ways according to the characteristics of the building, the composition of the soil that support them and also the magnitude of the loads to which they are subjected.

The shoe-type foundation is recommended for soils that have a relative capacity to withstand surface loads, without requiring, however, a large area of contact with the soil to absorb the stresses of construction loads. Its execution is simple and can be carried out in practically any type of work.

Thus, the dimensions of the surface footings directly influence the load capacity calculations and the permissible stress that the soil supports for the applied loads, that is, an oversizing can cause excessive expenses on the part of those who are executing their building.

In this dissertation we will demonstrate the computational application via the Microsoft Excel Software through the Solver supplement, the design of rigid surface shoes through theoretical methods cataloged in bibliographic materials, such as the methods of Terzaghi (1943) and Vésic (1975), respectively, and the settlement estimate via the method of Schmertmann et al. (1978), in order to obtain the best design, seeking the smallest effective area of the footing under study, according to the procedures contained in NBR 6118: 2014 - "Design of concrete structures - Procedure" and NBR 6122: 2019 - "Design and execution of foundations", consequently, having a lower cost for the manufacture of these shoes.

Keywords: Foundations. Terzaghi. Vesic. Sizing. Excel. Solver.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sapata de fundação e a condição geométrica para a fundação superficial.	24
Figura 2 – Sapata e blocos de concreto	25
Figura 3 – Tipos de Sapatas.....	26
Figura 4 – Dimensões da sapata quando sua rigidez	27
Figura 5 – a) Ruptura Geral; b) Tensão-Recalque.....	28
Figura 6 – a) Ruptura Local; b) Tensão-Recalque.	29
Figura 7 – a) Ruptura por puncionamento; b) Tensão-Recalque.....	29
Figura 8 – Influência do lençol freático na capacidade de carga: (a) caso 1 e (b) caso 2	42
Figura 9 – Zona de distribuição de tensões	45
Figura 10 – Fator de influência iz.....	47
Figura 11 – Caminhamento da carga do pilar em direção à base da sapata	49
Figura 12 – Método das bielas para sapata corrida	50
Figura 13 – Método das bielas para sapata rígida isolada	51
Figura 14 – Método das bielas para sapata rígida isolada	51
Figura 15 – Janela de parâmetros do Solver para Microsoft Excel	55
Figura 16 – Menu inicial planilha eletrônica.....	57
Figura 18 – Dados de entrada	58
Figura 19 – Carregamento do pilar para método via Vesic	59
Figura 20 – Fatores de inclinação da carga e terreno via Vésic	59
Figura 23 – Restrições para o suplemento Solver	59
Figura 24 – Estudo do solo	60
Figura 29 – Planilha externa – Prof. Dr. John Eloi Bezerra	66
Figura 30 – Dados de entrada para S01 pós dimensionamento – Via Terzaghi.....	70
Figura 31 – Dados de entrada S01 pós dimensionamento – Via Vesic.....	70
Figura 32 – Dados de entrada para S02 pós dimensionamento – Via Terzaghi.....	71
Figura 33 – Dados de entrada S02 pós dimensionamento – Via Vesic.....	71
Figura 34 – Memorial de cálculo S01 – Via Terzaghi	72
Figura 35 – Memorial de cálculo S01 – Via Vesic.....	73
Figura 36 – Memorial de cálculo S02 – Via Terzaghi	74
Figura 37 – Memorial de cálculo sapata 02 – Via Vesic.....	75
Figura 38 – Resumo dimensionamento S01 – Via Terzaghi	76
Figura 39 – Resumo Dimensionamento S01 – Via Vesic	76

Figura 40 – Resumo Dimensionamento S02 – Via Terzaghi	76
Figura 41 – Resumo Dimensionamento S02 – Via Vesic	76

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tensão de Ruptura para S01.....	65
Gráfico 2 – Tensão de Ruptura para S02.....	65
Gráfico 3 – Recalque via Schmertmann para S01 – Via Terzaghi.....	79
Gráfico 4 – Recalque via Schmertmann para S01 – Via Vesic	79
Gráfico 5 – Recalque via Schmertmann para S02 – Via Terzaghi.....	80
Gráfico 6 – Recalque via Schmertmann para S02 – Via Vesic	80

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Condição de Rigidez da Sapata	27
Equação 2 – Tensão Exercida na base da fundação superficial	30
Equação 3 – Equação geral de ruptura de carga	30
Equação 4 – N_q – Terzaghi (1943).....	31
Equação 5 – N_c – Terzaghi (1943).....	31
Equação 6 – N_γ – Terzaghi (1943).....	31
Equação 7 – K_{py} – Rankine	31
Equação 8 – c' – Terzaghi.....	32
Equação 9 – ϕ' – Terzaghi (1943).....	33
Equação 10 – Equação geral de ruptura de carga adaptada.....	34
Equação 11 – Equação geral de ruptura de carga adaptada Hansen (1970).....	35
Equação 12 – N_q – Prandtl (1921)	35
Equação 13 – N_c – Reinsnner (1924).....	35
Equação 14 – N_γ – Vésic (1963)	35
Equação 15 – d_c	38
Equação 16 – d_q	38
Equação 17 – d_γ	38
Equação 18 – k (Correção fator de profundidade)	38
Equação 19 – Índices m	38
Equação 20 – Excentricidade e_x	39
Equação 21 – Excentricidade e_y	39
Equação 22 – Menor dimensão efetiva da sapatada – B'	39
Equação 23 – Maior dimensão efetiva da sapatada – L'	39
Equação 24 – i_c	40
Equação 25 – i_q	40
Equação 26 – i_γ	40
Equação 27 – g_c	41
Equação 28 – g_q	41
Equação 29 – g_γ	41
Equação 30 – b_c	41
Equação 31 – b_q	41
Equação 32 – b_γ	42

Equação 33 – Caso 1 Nível lençol freático.....	42
Equação 34 – Caso 2 Nível do lençol freático.....	43
Equação 35 – Tensão Admissível σ_{adm}	43
Equação 36 – Critério de balanços iguais.....	44
Equação 37 – Zona 1 de distribuição de tensões.....	45
Equação 38 – Zona 5 de distribuição de tensões.....	46
Equação 39 – Embutimento da sapata.....	47
Equação 40 – Efeito do tempo para recalque em sapatas.....	47
Equação 41 – I_z , máx.....	48
Equação 42 – Recalque Schmertmann.....	48
Equação 43 – I_z para sapatas retangulares.....	48
Equação 44 – I_z para sapatas quadradas.....	49
Equação 45 – I_z para sapatas corridas.....	49
Equação 46 – Critérios de altura útil para sapata rígida corrida.....	50
Equação 47 – Forças de tração para sapata corrida.....	50
Equação 48 – Área de aço necessária para combater T	51
Equação 49 – Critérios de altura útil para sapata rígida isolada.....	52
Equação 50 – Forças de tração na direção x para sapata isolada.....	52
Equação 51 – Forças de tração na direção y para sapata isolada.....	52
Equação 52 – Área de aço necessária para combater T_x	52
Equação 53 – Área de aço necessária para combater T_y	53
Equação 54 – Número de barras na direção x	53
Equação 55 – Número de barras na direção y	53
Equação 56 – Espaçamento das barras na direção x	53
Equação 57 – Espaçamento das barras na direção y	54
Equação 58 – Comprimento da barra na direção x	54
Equação 59 – Comprimento da barra na direção y	54
Equação 60 – Altura da base da sapata.....	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das sapatas isoladas e corridas quanto sua forma.....	26
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de capacidade de carga Terzaghi (1943) – Ruptura Geral.....	32
Tabela 2 – Fatores de capacidade de carga Terzaghi (1943) – Ruptura Local.....	33
Tabela 3 – Fatores de forma – Terzaghi (1943)	34
Tabela 4 – Fatores de capacidade de Carga, Vesic (1975) – Ruptura Geral	36
Tabela 5 – Fatores de capacidade de Carga, Vesic (1975) – Ruptura por puncionamento	37
Tabela 6 – Fatores de forma	37
Tabela 7 – Áreas efetivas conforme geometria da sapata	40
Tabela 8 – Dados Pilares	61
Tabela 9 – Comparação dados.....	64
Tabela 10 – Área de aço	77
Tabela 11 – Cálculos recalque via Schmertmann S01 – via Terzaghi	77
Tabela 12 – Cálculos recalque via Schmertmann S01 – via Vesic	77
Tabela 13 – Cálculos recalque via Schmertmann S02 – Via Terzaghi	78
Tabela 14 – Cálculos recalque via Schmertmann S02 – Via Vesic.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Dr	Doutor;
Prof	Professor;
NBR	Norma Brasileira ;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
tg	Tangente;
cos	Cosseno;
cotg	Cotangente;
C. G.	Centro de gravidade;
log	Logaritmo;
ID	Identificação;
NSPT	Índice de Resistência à Penetração do Solo;
kN	Kilonewton;
m	Metro;
cm	Centímetro;
VBA	Visual Basic Application.

LISTA DE SÍMBOLOS

B: Menor dimensão da sapata;
D: Profundidade até a base da sapata;
L: Maior dimensão da sapata;
 $\emptyset$: Diâmetro
h: Altura da sapata;
 b_p : Menor Dimensão do pilar;
 σ_{rup} : Tensão de ruptura;
FS: Fator de segurança;
 σ_{adm} : Tensão admissível;
q: Tensão efetiva na cota de apoio;
 γ_s : Peso específico do solo;
c: Coesão do solo;
 N_c, N_q e N_γ : Fatores de capacidade de carga;
 π : Pi;
tg: Tangente;
cos: Cosseno;
cotg: Cotangente;
 ϕ : Ângulo de atrito interno;
 k_{py} : Coeficiente de empuxo passivo;
 S_c, S_q e S_γ : Fatores de forma da sapata;
 d_c, d_q e d_γ : Fatores de profundidade da sapata;
 i_c, i_q e i_γ : Fatores de inclinação do carregamento;
 g_c, g_q e g_γ : Fatores de inclinação do terreno;
 b_c, b_q e b_γ : Fatores de inclinação da fundação;
k: Correção do fator de profundidade;
 e_x : Excentricidade no eixo x;
 e_y : Excentricidade no eixo y;
 A_f : Área efetiva da fundação em contato com o solo;
 M_x : Momento no eixo x;
 M_y : Momento no eixo y;

B' : Menor dimensão efetiva da sapata;
 L' : Maior dimensão efetiva da sapata;
 β : Inclinação da superfície do terreno adjacente;
 η : Inclinação da base da fundação;
 γ' : Peso específico do solo, corrigido pelo nível de água;
 $\gamma_{\text{água}}$: Peso específico da água;
 D_w : Profundidade do lençol freático;
 b_p : Menor dimensão do pilar;
 l_p : Maior dimensão do pilar;
 $\sigma_{\text{máxima}}$: Tensão máxima de ruptura no bordo;
 $\sigma_{\text{mínima}}$: Tensão mínima de ruptura no bordo;
 σ : Tensão distribuída na sapata;
 σ^* : Tensão líquida distribuída pela sapata ao solo;
 t : Tempo;
 σ_v : Tensão à cota do $I_{z,\text{máx}}$;
 I_z : Fator de influência na deformação para meia-altura da camada i ;
 ΔZ : Espessura da camada i ;
 E_s : Módulo de deformabilidade para camada i ;
 d : Altura útil da sapata
 b : Dimensão da fundação em uma direção;
 b_0 : Dimensão do pilar em uma direção;
 P : Carga aplicada na fundação;
 T : Força de tração;
 A_s : Área de aço;
 f_{yk} : Valor característico da resistência de escoamento do aço;
 f_{ck} : Resistência característica do concreto à compressão;
 a : Dimensão da sapata em uma determinada direção;
 a_0 : Dimensão do pilar em uma determinada direção;
 T_x : Força de tração no eixo x ;
 T_y : Força de tração no eixo y ;
 A_{sx} : Área de aço na direção do eixo x ;
 A_{sy} : Área de aço na direção do eixo y ;

n_{barra_x} : Número de barras de aço na direção x;

n_{barra_y} : Número de barras de aço na direção y;

Esp_x : Espaçamento das barras na direção x;

Esp_y : Espaçamento das barras na direção y;

Cobrimento: Cobrimento da sapata;

Comp_x : Comprimento da barra na direção x;

Comp_y : Comprimento da barra na direção y;

h_0 : Altura da base da sapata;

σ_{med} : Tensão média de ruptura;

$\sigma_{\text{máx_lim}}$: Tensão máxima limite de ruptura;

ρ : Recalque;

ρ_{limite} : Recalque limite;

c_1 : Correção do recalque;

c_2 : Efeito do tempo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
2 OBJETIVOS	23
2.1 GERAL	23
2.2 ESPECÍFICOS	23
3 REFERENCIAL TEÓRICO	24
3.1 FUNDAÇÕES	24
3.1.1 Tipos de fundação.....	24
3.1.2 Tipos de fundações superficiais.....	25
3.1.3 Tipos de sapatas.....	25
3.1.4 Formas das sapatas isoladas e corridas	26
3.2 MODOS DE RUPTURA.....	27
3.2.1 Ruptura geral.....	28
3.2.2 Ruptura local	28
3.2.3 Ruptura por punção.....	29
3.3 TEORIA DE CAPACIDADE DE CARGA	29
3.3.1 Teoria de Terzaghi	30
3.3.2 Teoria de Vésic.....	34
3.4 INFLUÊNCIA DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO	42
3.5 TENSÃO ADMISSÍVEL DE RUPTURA DE CARGA.....	43
3.6 PARÂMETROS PARA O DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS ISOLADAS	44
3.6.1 Critérios dos balanços iguais	44
3.6.2 Tensões de bordo da fundação	44
3.6.3 Recalques via método de Schmertmann.....	46
3.6.4 Detalhamento sapata – Via Método de Bielas.....	49
3.7 SUPLEMENTO SOLVER PARA MICROSOFT EXCEL.....	55
4 METODOLOGIA.....	57
4.1 APRESENTAÇÃO DA PLANILHA ELETRÔNICA.....	57
4.1.1 Dados de entrada	57
4.1.2 Restrições para suplemento Solver	59
4.1.3 Aplicação	60
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62

5.1 RESULTADOS PARA CAPACIDADE DE CARGA DE TERZAGHI	62
5.1.1 Sapata 01	62
5.1.2 Sapata 02	62
5.2 RESULTADOS PARA CAPACIDADE DE CARGA DE VESIC	63
5.2.1 Sapata 01	63
5.2.2 Sapata 02	63
5.3 RESULTADOS	64
5.3 PLANILHA EXTERNA DE DETALHAMENTO VIA AUTOCAD	66
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
REFERÊNCIAS	68
APÊNCIDE A	70
APÊNDICE B.....	77
APÊNDICE C	79
APÊNDICE D	81

1 INTRODUÇÃO

Na construção civil no Brasil uma das áreas de destaque, é a estrutural, sendo muito lembrada por lajes, vigas e pilares, entretanto, segundo (VELLOSO & LOPES, 2011), uma parte de extrema importância que está diretamente associada a área estrutural, é a da Geotecnia, que para realizar uma edificação de qualidade deve-se investir no sistema de fundações, que dão todo o suporte ao sistema estrutural.

Essa área difere, em partes, em relação à estrutural, pois o solo é o fator que o engenheiro não tem o controle e o total conhecimento, já que depende de diversos parâmetros do solo que irá suportar as cargas transmitidas pelas fundações. À vista disso, a área da sapata superficial é um elemento de grande impacto na capacidade de carga e em relação ao recalque sobre o solo em que será executada.

Conforme supracitado, uma parcela dos engenheiros de fundações, acabam não dando a devida importância para o estudo do solo, como consequência, o limitado conhecimento geotécnico torna difícil dimensionar uma fundação eficiente e pode ter um superdimensionamento das sapatas superficiais rígidas a fim de visar a segurança, assim, tendo um gasto excessivo com materiais, mão de obra e recursos financeiros ou pior, tendo um subdimensionamento da fundação e assim gerando sua ruína, gerando danos consideráveis ou até irreversíveis.

Isto posto, aliado ao avanço da tecnologia ao decorrer dos anos, aplicações computacionais, com o objetivo de facilitar a vida do engenheiro no cálculo manual, tem sido cada vez mais constante ao nosso cotidiano, com conceitos e definições sobre fundações superficiais abordando dentre outros métodos de capacidade de carga Terzaghi (1943) e Vésic (1975), recalque via método de Schmertmann et al. (1978) e detalhamento estrutural mediante métodos das bielas, neste trabalho será realizado um estudo a ser dimensionada uma planilha eletrônica via programa *Microsoft Excel* com o auxílio do seu suplemento *Solver* e a ferramenta de geração de macros (códigos ou scripts de programas), com o usuário da planilha inserindo as informações de entrada, tais como: dimensões do pilar, cargas aplicadas, tipo de solo em que a sapata irá transmitir as cargas da edificação, nível do lençol freático, caso contenha, e tipo de ruptura da sapata superficial, assim, tendo como resultado, pós cálculos fazendo o uso do suplemento *Solver*, o memorial de cálculo e retornando com a sapata superficial rígida com o melhor dimensionamento possível aliando métodos teóricos à realidade, otimizando a área da sapata em contato com solo para transmitir as cargas advindas da superestrutura, assim reduzindo o consumo de concreto na fundação.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Dimensionar sapatas superficiais rígidas, visando obter a melhor área efetiva possível para distribuição de cargas para o solo advindas da superestrutura, diante das formulações bibliográficas empíricas, por meio de uma planilha eletrônica via Software Excel com o uso do suplemento solver.

2.2 ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma planilha para dimensionamento geotécnico;
- Aplicar métodos resultantes de materiais bibliográficos em uma planilha eletrônica;
- Comparar o dimensionamento das sapatas superficiais rígidas pelos métodos de capacidade de cargas de Terzaghi (1943) e Vésic (1975);
- Gerar economia de mão de obra, materiais e financeira para execução das sapatas superficiais rígidas dimensionadas através da Planilha eletrônica.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica com conceitos e definições sobre fundações superficiais rígidas, métodos de capacidade de carga, recalque em sapatas superficiais e o suplemento *Solver*.

3.1 FUNDAÇÕES

Fundação ou subestrutura segundo BASTOS, (2019), é a parte estrutural composta por elementos estruturais, normalmente executas abaixo do nível final do terreno e são responsáveis por transmitir ao solo todas as ações que atuam na edificação.

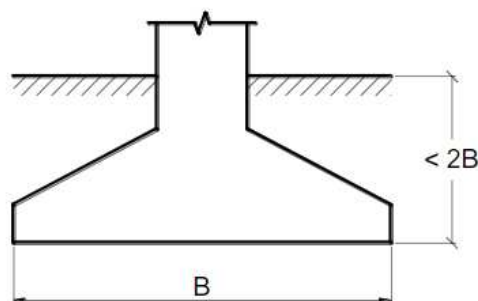
De forma abrangente, a definição de fundação é o conjunto dos trabalhos necessários para assentar solidamente uma construção: começar as fundações de um edifício conforme, (DICIONÁRIO ONLINE DE PORTUGUÊS, 2022).

3.1.1 Tipos de fundação

NOGUCHI, (2012) aponta que existem dois tipos básicos de fundações: a fundação superficial e profunda, respectivamente, que além da profundidade, outra distinção entre elas é a forma é distribuídas as cargas no solo.

O foco dessa dissertação será a primeira supramencionada, em fundação tipo sapata superficial, ou seja, de acordo com a NBR 6122 ABNT, (2019), quando a menor dimensão em planta (B) da fundação é duas vezes maior em relação a dimensão de profundidade (H), é considerada fundação superficial, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Sapata de fundação e a condição geométrica para a fundação superficial.



B = menor dimensão da sapata em planta.

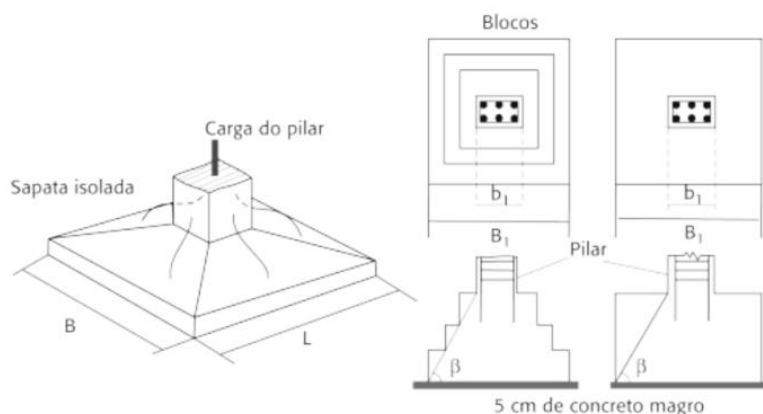
Fonte: (BASTOS, 2019).

3.1.2 Tipos de fundações superficiais

Na visão de (HACHICH et al., 1998), as fundações podem ser divididas em três principais tipos, blocos de fundação, sapatas de fundação e fundação em radier. Reiterando que, a visão dessa dissertação é sapatas superficiais.

Pois, no ponto de vista de Joppert, (2007) é a mais utilizada, desde que seja viável, não precisando de equipamentos especiais, de mão de obra especializada para a construção de edificações de pequeno porte.

Figura 2 – Sapata e blocos de concreto



Fonte: (CAMPOS, 2015).

3.1.3 Tipos de sapatas

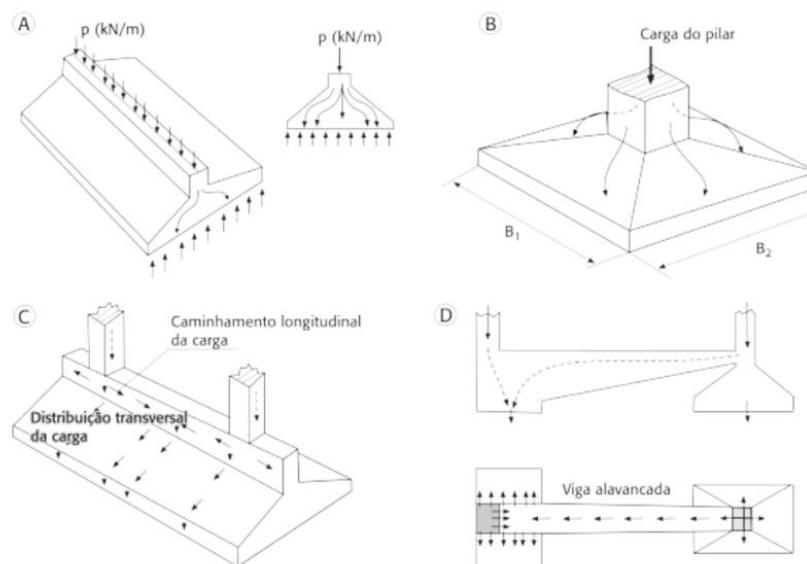
O item 3.38 da NBR 6122 (ABNT, 2019 p. 8), define sapata como “elemento de fundação rasa, de concreto armado, dimensionado de modo que as tensões de tração nele resultantes sejam resistidas pelo emprego de armadura especialmente disposta para esse fim.”.

Para (CAMPOS, 2015 p.194) fala que “[...] podem ser classificadas quanto ao tipo de carga que transferem ao solo” como apresenta a figura 3, tais como:

- Isolada: Distribui as cargas nas duas direções e a carga é concentrada em um único pilar;
- Corrida: Distribui a carga em apenas uma direção e a carga é distribuída linearmente para fundação, tendo como exemplo uma parede;
- Associada: Existem interferências entre duas sapatas isoladas, é necessário as cargas sejam transferidas através de uma viga de apoio que as associam, sendo que conforme a NBR 6122 (ABNT, 2019 p. 8), define que “[...] a sapata comum a mais do que dois pilares, quando não alinhados e desde que representem menos de 70% das cargas da estrutura;

- d. Alavancada: Quando é necessário realizar uma sapata de divisa, é utilizada uma viga-alavanca para centrar a carga do pilar com a área da sapata.

Figura 3 – Tipos de Sapatas



Fonte: (CAMPOS, 2015).

Para o dimensionamento da planilha eletrônica, será para sapatas superficiais isoladas e corridas.

3.1.4 Formas das sapatas isoladas e corridas

Ainda de acordo com Campos, (2015), em razão do menor consumo de concreto é comumente, em geral, usado certos formatos geométricos para esses tipos de sapatas em específico. E para um melhor entendimento deve-se adotar dimensões das sapatas como, a menor dimensão é denominada por (B) e a maior dimensão é denominada por (L), como apresenta o Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação das sapatas isoladas e corridas quanto sua forma

Forma	Dimensões
Quadrada	$B = L$
Retangular	$(L > B)$ e $(L \leq 3B)$
Corrida	$L \leq 3B$
Circular	$B = \varnothing$ (Diâmetro)

Fonte: Adaptado de (CAMPOS, 2015).

3.1.5 Sapatas Rígidas

“A classificação das sapatas relativamente à rigidez é muito importante, porque direciona a forma como a distribuição de tensões na interface base da sapata/solo deve ser considerada, bem como o procedimento ou método adotado no dimensionamento estrutural.” (BASTOS, 2019, p 9.)

Na visão de Martinho, (2017) essas sapatas apresentam dispõe uma distribuição de tensões no solo uniformemente, com isso, o cálculo de diagramas de pressões reproduz mais aproximadamente e de forma simples o diagrama que se reproduz no terreno da fundação.

Logo, o item 22.6.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica quando a sapata superficial satisfaz a seguinte condição da Equação 1, será considerada rígida:

Equação 1 – Condição de Rigidez da Sapata

$$h \geq \frac{(B - b_p)}{3} \quad (1)$$

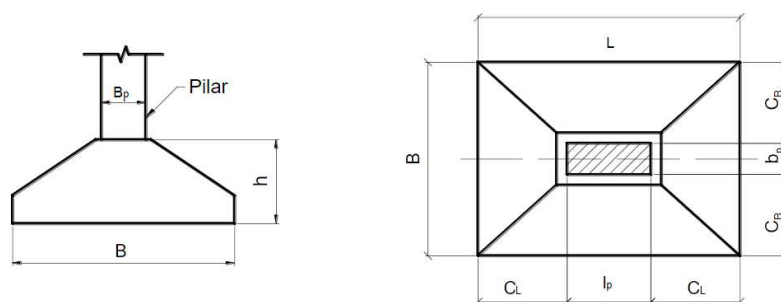
Onde:

h: Altura da sapata, [m];

B: Menor dimensão da fundação, [m];

b_p: Menor dimensão do pilar, [m].

Figura 4 – Dimensões da sapata quando sua rigidez



Fonte: Adaptado, (BASTOS, 2019)

3.2 MODOS DE RUPTURA

Do ponto de vista de Cintra; Aoki; Albiero, (2011) apontam que a capacidade de carga é a tensão que provoca ruptura do maciço em que a fundação sapata superficial está apoiada ou introduzida.

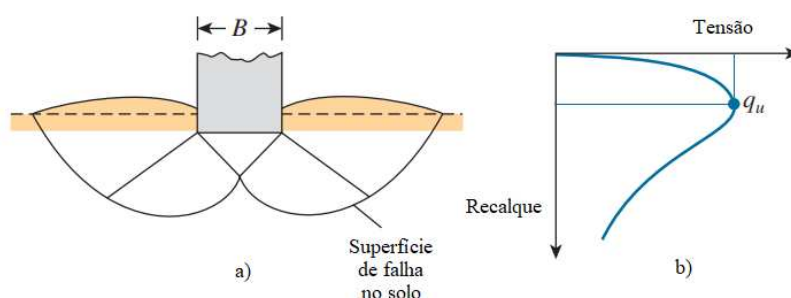
A sapata em que está submetida a cargas advindas da superestrutura, ela está sujeita a três tipo de modos de ruptura, TERZAGHI, (1943) detalha os de ruptura geral e ruptura local e VESIC, (1975), ruptura por puncionamento.

3.2.1 Ruptura geral

“Neste tipo de ruptura ocorre a formação de uma cunha, com movimento vertical para baixo e que empurra lateralmente duas outras cunhas que tendem a levantar o solo adjacente à fundação” (SOUZA, 2018).

Conforme exemplifica a Figura 5, a ruptura geral é identificada como bruta e intensa e observando o gráfico de tensão-recalque Figura 4b, pode-se notar que é bem definido a ruptura geral, ou seja, obtém-se um pico de carga máxima e logo em seguida o seu alívio.

Figura 5 – a) Ruptura Geral; b) Tensão-Recalque.



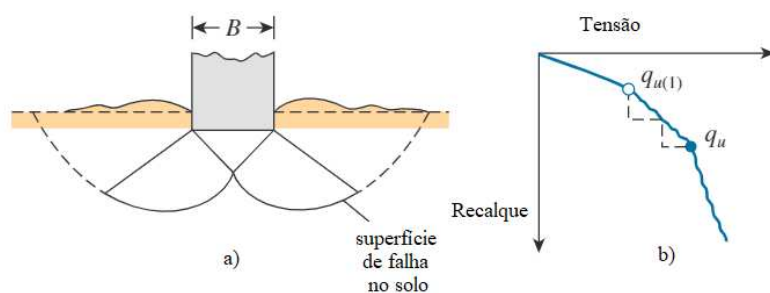
Fonte: Adaptado, (DAS; SIVAKUGAN, 2019).

3.2.2 Ruptura local

Do ponto de vista de Sena, (2016), mostra que a superfície de deslizamento não emerge para a superfície, portanto, não ocasionando rupturas brutas para sapatas superficiais, que por sua vez seguirá embutida no solo, assim sendo, atingindo as camadas das camadas mais profundas do terreno.

Portanto, como caracteriza a Figura 6b o gráfico de tensão-recalque, diferentemente da ruptura geral, não apresenta um pico de cargas para sua ruptura, a curva tensão-recalque é definida como suave.

Figura 6 – a) Ruptura Local; b) Tensão-Recalque.

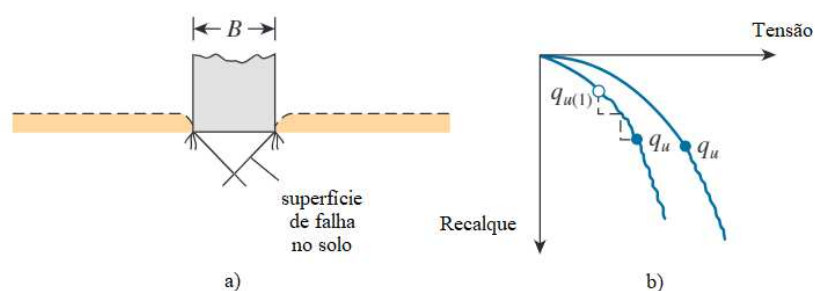


Fonte: Adaptado, (DAS; SIVAKUGAN, 2019).

3.2.3 Ruptura por punçãoamento

Na visão de Vésic (1975) notou-se que esse modo de ruptura só pode ser analisado medindo os níveis de recalques, pois a sapata superficial propende a afundar de forma intensa devido à alta compressibilidade do solo em que está absorvendo as cargas. Como pode-se notar na Figura 6.

Figura 7 – a) Ruptura por punçãoamento; b) Tensão-Recalque.



Fonte: Adaptado, (DAS; SIVAKUGAN, 2019).

3.3 TEORIA DE CAPACIDADE DE CARGA

Os métodos teóricos estimados para estimar a tensão admissível do solo que é aplicado na engenharia geotécnica, por meio da aplicação do método de capacidade de carga por Terzaghi e Vésic para observar a tensão de ruptura do solo em que a sapata superficial rígida estará dando a sua sustentação.

Na visão de Figueiredo, (2018) essas equações teóricas tendem a ser conservadoras em relação a sua aplicação por parâmetros do solo, posteriormente além do resultado obtido, a partir da tensão de ruptura do solo (σ_{rup}).

Assim, é a tensão que gera a ruína do solo devido a deformação de ruptura do solo. (BERBERIAN, 1943).

Segundo Bowles, (1996) caracteriza que é utilizado o fator de segurança (FS), para evitar que a fundação sofra falha de cisalhamento na sua base. Para que assim seja obtida a tensão admissível do solo (σ_{adm}), que por sua vez é a que produz somente recalques em que a estrutura é capaz de suportar, (BERBERIAN, 1943).

Segundo Joppert JR, (2007) e NBR 6122 (ABNT, 2019), recomenda-se, em geral para esse tipo de fundação superficial, adotar o fator de segurança (FS) = 3.

3.3.1 Teoria de Terzaghi

Terzaghi, (1943) conceitua que é considerado três hipóteses essenciais:

- Refere-se a uma sapata superficial corrida, assim, tornando a análise para um caso em duas dimensões;
- A profundidade da base da sapata (D) precisa ser inferior a menor dimensão (B), ou seja, desprezando a resistência para o cisalhamento do terreno acima. Também é considerada uma sobrecarga (q) descrita na Equação 2, do qual para obter seu resultado é a multiplicação do peso específico do solo em estudo (γ_s) e sua respectiva profundidade da base da sapata.
- O maciço abaixo do solo em estudo deve ser rígido, que inicialmente é descrito no caso ruptura geral.

Equação 2 – Tensão Exercida na base da fundação superficial

$$q = D \cdot \gamma_s \quad (2)$$

Onde:

q: Tensão efetiva na cota de apoio [kN/m²];

γ_s : Peso específico do solo [kN/m³].

A capacidade de carga de ruptura do solo do modelo de Terzaghi representa que sua equação é subdividida em três termos, dos quais são, coesão do solo (c), sobrecarga (q) e peso específico (γ_s), respectivamente, (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011), como representa a equação 3 a seguir:

Equação 3 – Equação geral de ruptura de carga

$$\sigma_{rup} = c \cdot N_c + q \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot B \cdot N_\gamma \quad (3)$$

Onde:

σ_{rup} : Tensão de Ruptura [kN/m²];

c: Coesão do solo [kN/m²];

q: Tensão efetiva na cota de apoio [kN/m²];

γ_s : Peso específico do solo [kN/m³];

B: Menor dimensão da sapata [m];

N_c , N_q e N_γ : Fatores de capacidade de carga.

Esses fatores de capacidade de carga (N_c , N_q e N_γ), dependem do ângulo de atrito interno para os solos, como caracteriza (NOGUCHI, 2012), nas seguintes equações e na Tabela:

Equação 4 – N_q – Terzaghi (1943)

$$N_q = \frac{e^{2 \cdot \left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \cdot \tan(\phi)}}{2 \cdot \cos^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)} \quad (4)$$

Equação 5 – N_c – Terzaghi (1943)

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot(\phi) \quad (5)$$

Para o fator N_γ para essa formulação foi obtido via Kumbhojkar (apud DAS; SIVAKUGAN, 2019).

Equação 6 – N_γ – Terzaghi (1943)

$$N_\gamma = \frac{\tan(\phi)}{2} \cdot \left(\frac{K_{py}}{\cos^2(\phi)} - 1 \right) \quad (6)$$

Equação 7 – K_{py} – Rankine

$$K_{py} = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (7)$$

Onde:

ϕ : Ângulo de atrito interno no solo

K_{py} : Coeficiente de empuxo passivo

Tabela 1 – Fatores de capacidade de carga Terzaghi (1943) – Ruptura Geral

ϕ	N_c	N_q	N_γ	ϕ	N_c	N_q	N_γ
0	5,70	1,00	0,00	26	27,09	14,21	9,84
1	6,00	1,10	0,01	27	29,24	15,90	11,60
2	6,30	1,22	0,04	28	31,61	17,81	13,70
3	6,62	1,35	0,06	29	34,24	19,98	16,18
4	6,97	1,49	0,10	30	37,16	22,46	19,13
5	7,34	1,64	0,14	31	40,41	25,28	22,65
6	7,73	1,81	0,20	32	44,04	28,52	26,87
7	8,15	2,00	0,27	33	48,09	32,23	31,94
8	8,60	2,21	0,35	34	52,64	36,50	38,04
9	9,09	2,44	0,44	35	57,75	41,44	45,41
10	9,61	2,69	0,56	36	63,53	47,16	54,36
11	10,16	2,98	0,69	37	70,01	53,80	65,27
12	10,76	3,29	0,85	38	77,50	61,55	78,61
13	11,41	6,63	1,04	39	85,97	70,61	95,03
14	12,11	4,02	1,26	40	95,66	81,27	115,31
15	12,86	4,45	1,52	41	106,81	93,85	140,51
16	13,68	4,92	1,82	42	119,67	108,75	171,99
17	14,60	5,45	2,18	43	134,58	126,50	211,56
18	15,12	6,04	2,59	44	151,95	147,74	261,60
19	16,57	6,70	3,07	45	172,28	173,28	325,34
20	17,69	7,44	3,64	46	196,22	204,19	407,11
21	18,92	8,26	4,31	47	224,55	241,80	512,84
22	20,27	9,19	5,09	48	258,28	287,85	650,87
23	21,75	10,23	6,00	49	298,71	344,63	831,99
24	23,36	11,40	7,08	50	347,50	415,14	1.072,80
25	25,13	12,72	8,34				

Fonte: Adaptado, (DAS; SIVAKUGAN, 2019).

Moreira, (2020) conceitua que para solos argilosos moles e arenosos fofos o modo de ruptura deve ser atualizado de ruptura geral para ruptura local, assim, o termo coesão do solo (c) da Equação (2) passa a ser 2/3 da coesão total (c'), portanto a tabela 2 a seguir expõe os novos valores para ruptura local para (N'_c , N'_q e N'_γ).

Equação 8 – c' – Terzaghi

$$c' = \frac{2}{3} \cdot c \quad (8)$$

Equação 9 – ϕ' – Terzaghi (1943)

$$\phi' = \arctg\left(\frac{2}{3} \cdot tg(\phi)\right) \quad (9)$$

Tabela 2 – Fatores de capacidade de carga Terzaghi (1943) – Ruptura Local

ϕ'	N'_c	N'_q	N'_γ	ϕ'	N'_c	N'_q	N'_γ
0	5,70	1,00	0,00	26	15,53	6,05	2,59
1	5,90	1,07	0,005	27	16,03	6,54	2,88
2	6,10	1,14	0,02	28	17,13	7,07	3,29
3	6,30	1,22	0,04	29	18,03	7,66	3,76
4	6,51	1,30	0,055	30	18,99	8,31	4,39
5	6,74	1,39	0,074	31	20,03	9,03	4,83
6	6,70	1,49	0,10	32	21,16	9,82	5,51
7	7,22	1,59	0,128	33	22,39	10,69	6,32
8	7,47	1,70	0,16	34	23,72	11,67	7,22
9	7,74	1,82	0,20	35	25,18	12,75	8,35
10	8,02	1,94	0,24	36	26,77	13,97	9,61
11	8,32	2,08	0,30	37	28,51	15,32	10,90
12	8,63	2,22	0,35	38	30,43	16,85	12,75
13	8,96	2,38	0,42	39	32,53	18,56	14,71
14	9,31	2,55	0,48	40	34,87	20,50	17,22
15	9,67	2,73	0,57	41	37,45	22,70	19,75
16	10,06	2,92	0,67	42	40,33	25,21	22,50
17	10,47	3,13	0,76	43	43,54	28,06	26,25
18	10,90	3,36	0,88	44	47,13	31,34	30,40
19	11,36	3,61	1,03	45	51,17	35,11	26,00
20	11,85	3,88	1,12	46	55,73	39,48	41,70
21	12,37	4,17	1,35	47	60,91	44,54	49,30
22	12,92	4,48	1,55	48	66,80	50,46	59,25
23	13,51	4,82	1,74	49	73,55	57,41	71,45
24	14,14	5,20	1,97	50	81,31	65,60	85,75
25	14,80	5,60	2,25				

Fonte: Adaptado, (NOGUCHI, 2012).

O princípio da formulação de Terzaghi, (1943), foi utilizada para sapata corrida e para que a equação seja adaptada novas formas geométricas para sapatas, deve-se inserir os fatores de efeito de forma, que por sua vez, depende de três termos que são, S_c , S_q e S_γ , respectivamente, para sapatas retangulares, circulares e quadradas. (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011).

Portanto, inserindo os termos supracitados na equação geral para ruptura de carga de Terzaghi ficará conforme mostra a Equação 10:

Equação 10 – Equação geral de ruptura de carga adaptada

$$\sigma_{rup} = c \cdot N_c \cdot S_c + q \cdot N_q \cdot S_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \quad (10)$$

A tabela a seguir mostra os valores dos fatores de forma:

Tabela 3 – Fatores de forma – Terzaghi (1943)

Forma da sapata	Fatores de forma		
	S_c	S_q	S_γ
Corrida (lado B)	1,00	1,00	1,00
Quadrada (B = L)	1,30	1,00	0,80
Circular (B = Diâmetro)	1,30	1,00	0,60
Retangular (B < L)	1,10	1,00	0,90

Fonte: Adaptado, (BOWLES, 1996).

3.3.2 Teoria de Vésic

Segundo Cintra; Aoki; Albiero, (2011), Aleksander S. Vesic (1975) foi um dos notáveis pesquisadores a respeito de assuntos que aborda capacidade de carga em fundações.

Outro pesquisador que se destacou nessa área foi Hansen (1970) que contribuiu para o aperfeiçoamento da equação de ruptura geral adaptada de Terzaghi (1943) (Equação 10), incluindo, além dos fatores primordialmente definidos, fatores de profundidade (d) e inclinação das cargas (i), fatores de inclinação solo (g) e por último a inclinação da base da fundação (b) (taludes e base). (MOREIRA, 2020).

Isto posto, segundo Bowles, (1996), Vésic por sua vez, tomou como base a equação de ruptura geral adaptada de Hansen, mantendo os fatores N_c e N_q e alterando para sua formulação os fatores de forma da sapata referenciada por (De Beer), inclinação, solo, base da fundação e o fator de capacidade de carga N_γ , como mostra as equações a seguir:

Equação 11 – Equação geral de ruptura de carga adaptada Hansen (1970)

$$\sigma_{rup} = cN_cS_c d_c i_c g_c b_c + qN_qS_q d_q i_q g_q b_q + \frac{1}{2}\gamma_s B N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma \quad (11)$$

Onde:

σ_{rup} : Tensão de Ruptura [kN/m²];

c: Coesão do solo [kN/m³];

N_c , N_q e N_γ : Fatores de capacidade de carga;

S_c , S_q e S_γ : Fatores de forma;

d_c , d_q e d_γ : Fatores de profundidade da fundação;

i_c , i_q e i_γ : Fatores de inclinação do carregamento;

g_c , g_q e g_γ : Fatores de inclinação do terreno superficial;

b_c , b_q e b_γ : Fatores de inclinação da fundação;

q: Tensão efetiva na cota de apoio [kN/m²];

γ_s : Peso específico do solo [kN/m³];

B: Menor dimensão da fundação (Diâmetro para sapatas circulares) [m].

Equação 12 – N_q – Prandtl (1921)

$$N_q = e^{(\pi) \cdot tg(\phi)} \cdot \tan^2 \cdot \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (12)$$

Equação 13 – N_c – Reinsnner (1924)

$$N_c = \cot g(\phi) \cdot (N_q - 1) \quad (13)$$

Equação 14 – N_γ – Vésic (1963)

$$N_\gamma = 2,0 \cdot (N_q + 1) \cdot tg\phi \quad (14)$$

Para, Das; Sivakugan, (2019), calculou os fatores de capacidade de carga para os N_c , N_q e N_γ adaptados para teoria de Vésic, como expõe a Tabela 4:

Tabela 4 – Fatores de capacidade de Carga, Vesic (1975) – Ruptura Geral

ϕ	Nc	Nq	Ng	ϕ	Nc	Nq	Ng
0	5,14	1,00	0,00	26	22,25	11,85	12,54
1	5,38	1,09	0,07	27	23,94	13,20	14,47
2	5,63	1,20	0,15	28	25,80	14,72	16,72
3	5,90	1,31	0,24	29	27,86	16,44	19,34
4	6,19	1,43	0,34	30	30,14	18,40	22,40
5	6,49	1,57	0,45	31	32,67	20,63	25,99
6	6,81	1,72	0,57	32	35,49	23,18	30,21
7	7,16	1,88	0,71	33	38,64	26,09	35,19
8	7,53	2,06	0,86	34	42,16	29,44	41,06
9	7,92	2,25	1,03	35	46,12	33,30	48,03
10	8,34	2,47	1,22	36	50,59	37,75	56,31
11	8,80	2,71	1,44	37	55,63	42,92	66,19
12	9,28	2,97	1,69	38	61,35	48,93	78,02
13	9,81	3,26	1,97	39	67,87	55,96	92,25
14	10,37	3,59	2,29	40	75,31	64,20	109,41
15	10,98	3,94	2,65	41	83,86	73,90	130,21
16	11,63	4,34	3,06	42	93,71	85,37	155,54
17	12,34	4,77	3,53	43	105,11	99,01	186,53
18	13,10	5,26	4,07	44	118,37	115,31	224,63
19	13,93	5,80	4,68	45	133,87	134,87	271,75
20	14,83	6,40	5,39	46	152,10	158,50	330,34
21	15,81	7,07	6,20	47	173,64	187,21	403,65
22	16,88	7,82	7,13	48	199,26	222,30	496,00
23	18,05	8,66	8,20	49	229,92	265,50	613,14
24	19,32	9,60	9,44	50	266,88	319,06	762,86
25	20,72	10,66	10,88				

Essa teoria foi desenvolvida para ruptura generalizada, portanto para solos rígidos. Para que ela seja adaptada para ruptura por punção em casos de que o solo é denominado areia fofa e argila mole, costuma-se definir uma minoração tanto na coesão do solo, quanto para o ângulo de atrito interno do solo assim como mostra as equações (8) e (9), supramencionadas. (FOPPA, 2016).

Assim, a tabela 5 a seguir apresenta os fatores de capacidade de carga para teoria de Vésic para ruptura por punção.

Tabela 5 – Fatores de capacidade de Carga, Vesic (1975) – Ruptura por puncionamento

ϕ'	Nc	Nq	N γ	ϕ'	Nc	Nq	N γ
0	5,14	1,00	0,00	26	12,59	4,93	3,70
1	5,30	1,06	0,05	27	13,10	5,26	4,07
2	5,46	1,13	0,10	28	13,65	5,61	4,47
3	5,63	1,20	0,15	29	14,23	5,99	4,91
4	5,81	1,27	0,21	30	14,83	6,40	5,39
5	5,99	1,35	0,27	31	15,48	6,84	5,91
6	6,19	1,43	0,34	32	16,16	7,31	6,49
7	6,39	1,52	0,41	33	16,88	7,82	7,13
8	6,59	1,62	0,49	34	17,65	8,37	7,83
9	6,81	1,72	0,57	35	18,46	8,96	8,60
10	7,04	1,82	0,66	36	19,32	9,60	9,44
11	7,28	1,94	0,76	37	20,24	10,30	10,37
12	7,53	2,06	0,86	38	21,22	11,04	11,40
13	7,79	2,19	0,97	39	22,25	11,85	12,54
14	8,06	2,32	1,09	40	23,36	12,73	13,79
15	8,34	2,47	1,22	41	24,54	13,69	15,18
16	8,64	2,63	1,37	42	25,80	14,72	16,72
17	8,96	2,80	1,52	43	27,15	15,84	18,42
18	9,28	2,97	1,69	44	28,59	17,07	20,31
19	9,63	3,16	1,87	45	30,14	18,40	22,40
20	9,99	3,37	2,07	46	31,80	19,85	24,73
21	10,37	3,59	2,29	47	33,58	21,44	27,33
22	10,77	3,82	2,52	48	35,49	23,18	30,21
23	11,19	4,07	2,78	49	37,55	25,08	33,44
24	11,63	4,34	3,06	50	39,77	27,16	37,04
25	12,10	4,62	3,37				

Os fatores de forma (S_c , S_q e S_γ) são adaptados por De Beer, (1970) para determinadas geometrias das fundações superficiais, como caracteriza na tabela 6, (SENA, 2016).

Tabela 6 – Fatores de forma

Forma da sapata	Fatores de forma		
	S_c	S_q	S_γ
Corrida	1,0	1,0	1,0
Quadrada e circular	$1 + \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$	$1 + \text{tg}(\phi)$	0,6
Retangular	$1 + \left(\frac{B}{L}\right) \cdot \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$	$1 + \left(\frac{B}{L}\right) \cdot \text{tg}(\phi)$	$1 - 0,4 \cdot \left(\frac{B}{L}\right)$

Fonte: (SENA, 2016).

Para os índices de profundidade (d_c , d_q e d_γ), Vesic propôs as seguintes equações:

Equação 15 – d_c

$$d_c = 0,4 \cdot k \quad \phi = 0 \quad (15.1)$$

$$d_c = 1 + 0,4 \cdot k \quad \phi \neq 0 \quad (15.2)$$

Equação 16 – d_q

$$d_q = 1 + 2 \cdot \operatorname{tg}(\phi) \cdot (1 - \operatorname{sen}(\phi))^2 \cdot k \quad (16)$$

Equação 17 – d_γ

$$d_\gamma = 1,00 \quad (17)$$

Equação 18 – k (Correção fator de profundidade)

$$k = \frac{D}{B} \quad \text{para: } \frac{D}{B} \leq 1 \quad (18.1)$$

$$k = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{D}{B} \right) \quad \text{para: } \frac{D}{B} > 1 \quad (18.2)$$

Onde:

D : Profundidade até a cota da base da fundação [m];

B : Menor dimensão da fundação (Diâmetro para sapatas circulares) [m];

k : Correção fator de profundidade [radianos].

Para os fatores de inclinação (i) o pesquisador expressou primordialmente os índices (m) as como mostra as seguintes equações.

Equação 19 – Índices m

$$m = m_b = \frac{2 + \frac{B}{L}}{1 + \frac{B}{L}} \quad \text{se: } \frac{H}{B} \quad (19.1)$$

$$m = m_l = \frac{2 + B}{1 + \left(\frac{L}{B}\right)} \quad \text{se: } \frac{H}{L} \quad (19.2)$$

Ainda para o fator de inclinação das cargas, deve considerar a nova distribuição de tensões de acordo com a sua excentricidade tanto para o eixo x (e_x), quanto para o eixo y (e_y), desse modo, calcula-se a área efetiva da sapata em contato com solo (A_f), pois a carga não pode ser aplicada no centro de gravidade (C. G.), desse modo, as tensões aplicadas são diferentes referentes a base da fundação, (JÚNIOR, 2020).

Equação 20 – Excentricidade e_x

$$e_x = \frac{My}{V} \quad (20)$$

Equação 21 – Excentricidade e_y

$$e_y = \frac{Mx}{V} \quad (21)$$

Onde:

e_x : Excentricidade no eixo x, [m];

e_y : Excentricidade no eixo y, [m];

M_x : Momento no eixo x, [kN · m];

M_y : Momento no eixo y, [kN · m].

Equação 22 – Menor dimensão efetiva da sapatada – B'

$$B' = B - 2 \cdot e_x \quad (22)$$

Equação 23 – Maior dimensão efetiva da sapatada – L'

$$L' = L - 2 \cdot e_y \quad (23)$$

Onde:

B : Menor dimensão da fundação, [m];

L : Maior dimensão da fundação, [m];

B' : Menor dimensão efetiva da fundação, [m];

L' : Maior dimensão efetiva da fundação, [m].

Tabela 7 – Áreas efetivas conforme geometria da sapata

Forma da sapata	Área efetiva (A_f)
Corrida	B
Retangular	$B' \cdot L'$
Quadrada	$B' \cdot B'$
Circular	$\frac{\pi \cdot B'^2}{4}$

Fonte: Autoral (2022).

Onde:

 A_f : Área efetiva da fundação, [m²].Equação 24 – i_c

$$i'_c = A \cdot \frac{m \cdot F_H}{A_f \cdot c \cdot N_c} \quad \text{para: } \phi = 0 \quad (24)$$

$$i'_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} \quad \text{para: } \phi > 0 \quad (24.1)$$

Equação 25 – i_q

$$i_q = \left(1 - \frac{F_H}{V + A_f \cdot c \cdot \cot(\phi)} \right)^m \quad (25)$$

Equação 26 – i_v

$$i_v = \left(1 - \frac{F_H}{V + A_f \cdot c \cdot \cot(\phi)} \right)^{m+1} \quad (26)$$

Onde:

A: Área da sapata, [m²]; A_f : Área efetiva da sapata, [m²]; F_H : Força horizontal, [kN];

V: Força vertical, [kN];

c: Coesão do solo, $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$; ϕ : Ângulo de atrito interno, [graus].

Para os fatores de inclinação do terreno superficial (g_c, g_q e g_v), considera-se o ângulo de atrito interno do solo (ϕ) e da inclinação da superfície do terreno adjacente (β) para realização dos cálculos, como mostra as equações (27.1), (27.2), (28) e (29):

Equação 27 – g_c

$$g'_c = \frac{\beta^\circ}{147^\circ} \quad \text{para: } \phi = 0 \quad (27.1)$$

$$g'_c = 1 - \frac{\beta^\circ}{147^\circ} \quad \text{para: } \phi > 0 \quad (27.2)$$

Equação 28 – g_q

$$g_q = (1 - tg(\beta))^2 \quad (28)$$

Equação 29 – g_v

$$g_v = (1 - tg(\beta))^2 \quad (29)$$

Onde:

β : Inclinação da superfície do terreno adjacente, [graus].

Para os índices de inclinação da base (b_c, b_q e b_v), leva-se em consideração a inclinação da base da fundação (η) e do ângulo de atrito interno do solo, para critérios de cálculos, assim como expõe as equações a seguir:

Equação 30 – b_c

$$b'_c = \frac{\eta^\circ}{147^\circ} \quad \text{para: } \phi = 0 \quad (30.1)$$

$$b'_c = 1 - \frac{\eta^\circ}{147^\circ} \quad \text{para: } \phi > 0 \quad (30.2)$$

Equação 31 – b_q

$$b_q = (1 - \eta \cdot tg(\beta)) \quad (31)$$

Equação 32 – b_γ

$$b_\gamma = (1 - \eta \cdot \operatorname{tg}(\beta)) \quad (32)$$

Onde:

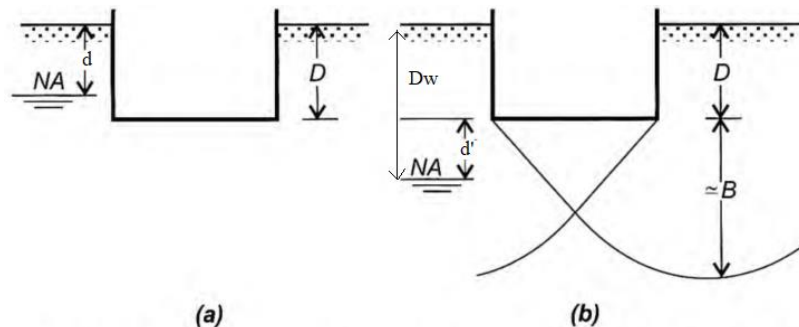
η : Inclinação da base da fundação, [graus].

3.4 INFLUÊNCIA DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO

De acordo com Cintra; Aoki; Albiero, (2011), ao analisar as expressões das teorias de capacidade de carga a ruptura, nota-se que, ao encontro de água no solo, o valor do peso específico do solo (γ_s) é afetado, assim dependendo do caso em análise, consequentemente esse valor será alterado.

Essa influência é somente considerada para capacidade de carga drenada, ou seja, é avaliado dois casos, como evidencia a Figura 8 a seguir:

Figura 8 – Influência do lençol freático na capacidade de carga: (a) caso 1 e (b) caso 2



Fonte: Adaptado, (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011).

No caso (a), o nível do lençol freático encontra-se acima da cota da base da fundação assim, é expressada a seguinte equação:

Equação 33 – Caso 1 Nível lençol freático

$$\gamma' = \gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_{\text{água}} \quad (33)$$

Já para o caso (b), o nível do lençol freático encontra-se abaixo da cota da base fundação, porém, está localizado na zona de limite da superfície de ruptura, desse modo é expressada a seguinte equação:

Equação 34 – Caso 2 Nível do lençol freático

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_{\text{água}} \cdot \left[1 - \left(\frac{D_w - D}{B} \right) \right] \quad (34)$$

Onde:

γ' : Peso específico do solo, corrigido pelo nível de água, $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right]$;

γ : Peso específico do solo saturado, $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right]$;

$\gamma_{\text{água}}$: Peso específico da água, $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right]$

D_w : Profundidade do lençol freático, [m];

D : Profundidade da base da sapata, [m];

B : Menor dimensão da sapata, [m].

3.5 TENSÃO ADMISSÍVEL DE RUPTURA DE CARGA

Tensão admissível (σ_{adm}) é definida como, “máxima tensão que, aplicada ao terreno pela fundação rasa ou pela base de tubulão, atende, com fatores de segurança predeterminados, aos estados limites últimos (ruptura) e de serviço (recalque, vibrações etc.)” (ABNT, 2019, p. 8).

Como caracteriza Bowles, (1996), uma vez que a capacidade de carga a ruptura da fundação foi calculada, é necessário determinar a tensão admissível, que é a carga por unidade de área que a fundação aplica no solo, é imprescindível delimitar um fator de segurança (FS) adequado para majorar a segurança do dimensionamento da fundação, assim como define a equação (34) a seguir:

Equação 35 – Tensão Admissível (σ_{adm})

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{rup}}{FS} \quad (35)$$

Onde:

σ_{adm} : Tensão admissível, $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$;

σ_{rup} : Tensão de ruptura, $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$;

FS: Fator de segurança;

Em vista disso, segundo o item 6.2.1.1 da NBR 6122 (ABNT, 2019) consta que, para fundações superficiais para métodos teóricos o fator de segurança global (FS) é 3.

3.6 PARÂMETROS PARA O DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS ISOLADAS

3.6.1 Critérios dos balanços iguais

Segundo Velloso; Lopes, (2011), para o dimensionamento de uma fundação superficial deve-se ser adotado os seguintes critérios:

- a. O centro de gravidade da fundação deve estar no mesmo centro de gravidade do pilar em que as cargas serão transmitidas;
- b. A sapata não poderá ter uma dimensão menor do que 60 centímetros;
- c. A relação entre B e L, deverá ser menor ou igual a 2,5

Para obtenção de momentos fletores solicitantes e armaduras de flexão não muito diferentes nas duas direções da sapata, procura-se determinar as dimensões da fundação de modo que os balanços sejam iguais ou semelhantes, (BASTOS, 2019).

Equação 36 – Critério de balanços iguais

$$L - B = l_p - b_p \quad (36)$$

Onde:

B: Menor dimensão da sapata, [m];

L: Maior dimensão da sapata, [m];

b_p : Menor dimensão do pilar, [m];

l_p : Maior dimensão do pilar, [m].

3.6.2 Tensões de bordo da fundação

“Uma fundação é solicitada por carga excêntricas quando estiver submetida a qualquer composição de forças que incluam ou gerem momentos de fundação.” (ABNT, 2019, p 23).

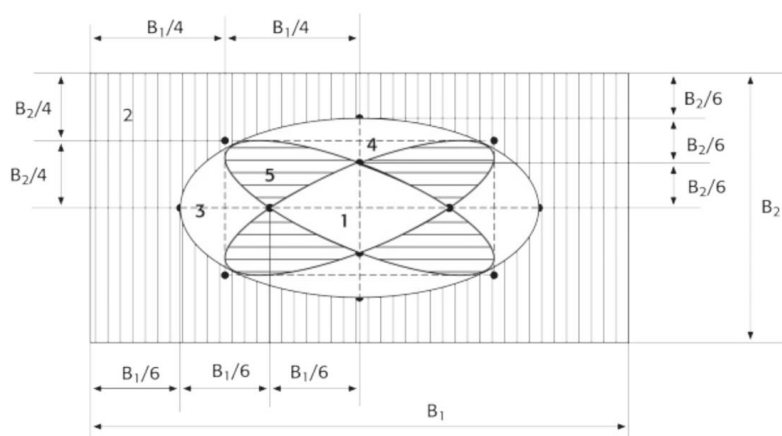
A distribuição de tensões de bordo é um dos fatores mais importantes a respeito o que envolve a interface base-solo. Vários estudos de campo e analíticos constataram que a pressão passada para o solo não é absolutamente distribuída uniformemente dependendo das seguintes condições (BASTOS, 2019):

- a. Existência de excentricidade do carregamento aplicado;
- b. Intensidade de possíveis momentos fletores aplicados;

- c. Rigidez da fundação.
- d. O valor de tensão máxima de borda é limitado ao valor da tensão admissível do solo (σ_{adm}),

A fim de determinar as tensões de bordas da sapata, primeiramente tem-se que analisar em qual zona de excentricidade a fundação irá incidir na modalidade submetida a uma carga vertical e a dois momentos, conforme mostra a Figura 8 a seguir.

Figura 9 – Zona de distribuição de tensões



Fonte: (CAMPOS, 2015).

Para critério de aplicação para o cotidiano a respeito de edificações com pequenas cargas, aplica-se, em geral, as zonas 1 e 5 para distribuição de tensões, ou seja, a aplicação da ação está dentro do núcleo central de inércia, com as seguintes condições.

Equação 37 – Zona 1 de distribuição de tensões

$$e = \frac{B}{6} \quad (37.1)$$

$$\sigma_{m\acute{a}xima} = \frac{V}{A} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot e_x}{L} \right) \quad (37.2)$$

$$\sigma_{m\acute{i}nima} = \frac{V}{A} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot e_y}{B} \right) \quad (37.3)$$

Equação 38 – Zona 5 de distribuição de tensões

$$\sigma_{m\acute{a}xima} = \frac{V}{B \cdot L} \cdot \alpha \cdot [12 - 3,9 \cdot (6 \cdot \alpha - 1) \cdot (1 - 2 \cdot \alpha) \cdot (2,3 - 2 \cdot \alpha)] \quad (38.1)$$

$$\alpha = \frac{e_x}{L} + \frac{e_y}{B} \quad (38.2)$$

Conforme ABNT, (2019), quando forem levadas em importância as combinações entre diversos tipos de carregamentos, inclusive a ação do vento, deve-se majorar a tensão máxima de bordo em 15%, porém com essa majoração não ultrapassando valor de tensão admissível (σ_{adm}).

3.6.3 Recalques via método de Schmertmann

Segundo Sena, (2016) recalque é o deslocamento para baixo em que a fundação sofre, devido aplicações de cargas advindas da superestrutura, por meio do adensamento do solo, em que ela está sobre.

A previsão de recalques é um dos aspectos da geotecnia mais difíceis de serem abordados, pois, por mais apurados sejam os métodos de cálculos aplicados, devem ser encarados como uma estimativa (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011).

Schmertmann, (1970) caracterizou através de simulações e análises teóricas, que a máxima deformação do solo, para sapata quadrada, acontece aproximadamente em $z = B/2$, assim a partir dessa profundidade, as deformações vão diminuindo gradativamente até serem desconsideradas em $z = 2B$.

O pesquisador propôs duas correções para o método, o embutimento da fundação e o efeito do tempo, respectivamente. Para o embutimento da sapata exige a correção do recalque (c_1), variando de 0,5 para 1, em virtude da redução do recalque em até 50%, considerando um maior embutimento da fundação no solo, como mostra a Equação 39. Já para o efeito do tempo (c_2), uma parcela de recalque aumenta conforme o tempo se passa, portanto, esse fator é caracterizado conforme mostra a Equação 40.

Equação 39 – Embutimento da sapata

$$c_1 = 1 - 0,5 \cdot \left(\frac{q}{\sigma^*} \right) \geq 0,5 \quad (39.1)$$

$$\sigma^* = \sigma - q \quad (39.2)$$

Onde:

q : Tensão efetiva na cota de apoio, $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$;

σ : Tensão distribuída na Sapata, $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$;

σ^* : Tensão líquida distribuída pela sapata ao solo, $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right]$.

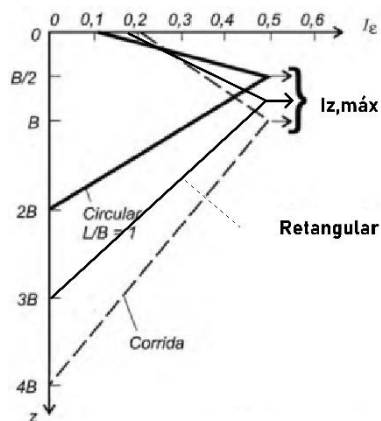
Equação 40 – Efeito do tempo para recalque em sapatas

$$c_2 = 1 + 0,2 \cdot \log \left(\frac{t}{0,1} \right) \quad (40)$$

Onde:

t : Tempo, [anos].

Figura 10 – Fator de influência i_z



Fonte: Adaptado (SCHMERTMANN, 1970)

Onde:

Equação 41 – $I_{z,máx}$

$$I_{z,máx} = 0,5 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{\sigma^*}{\sigma_v}} \quad (41)$$

Onde:

σ_v : Tensão à cota do $I_{z,máx}$, $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right]$.

Posto isso, temos a seguinte equação geral para recalque em solos via método de Schmertmann (1970):

Equação 42 – Recalque Schmertmann

$$w = c_1 + c_2 \cdot \sigma^* \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_z}{E_s} \cdot \Delta Z \right)_i \quad (42)$$

Onde:

I_z : Fator de influência na deformação para meia-altura da camada i ;

ΔZ : Espessura camada i ;

E_s : Módulo de deformabilidade para camada i ;

De acordo com Cintra; Aoki; Albiero, (2011), deve-se definir o valor de I_z com equações para sapatas com geometrias distintas.

Para o caso de sapatas retangulares temos as seguintes equações

Equação 43 – I_z para sapatas retangulares

$$I_z = \frac{4}{3} \cdot \frac{z}{B} \cdot (I_{z,max} - 0,15) + 0,15 \quad \text{para } z \leq \frac{3}{4} \cdot B \quad (43.1)$$

$$I_z = \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{4}{9} \cdot \frac{z}{B} \right) \cdot I_{z,máx} \quad \text{para } \frac{3}{4} \cdot B < z \leq 3B \quad (43.2)$$

Equação 44 – I_z para sapatas quadradas

$$I_z = 0,1 + 2,0 \cdot (I_{z,m\acute{a}x} - 0,1) \cdot \frac{z}{B} \quad \text{para } z \leq \frac{B}{2} \quad (44.1)$$

$$I_z = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot I_{z,m\acute{a}x} \cdot \left(2 - \frac{z}{B}\right) \quad \text{para } \frac{B}{2} < z \leq 2B \quad (44.2)$$

Equação 45 – I_z para sapatas corridas

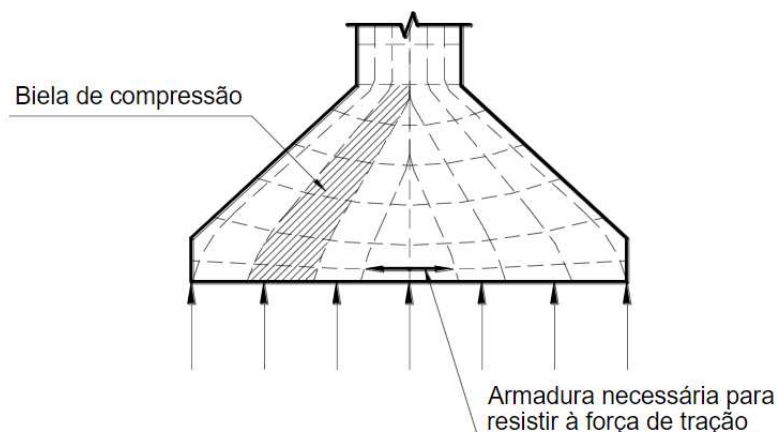
$$I_z = 0,2 + (I_{z,m\acute{a}x} - 0,2) \cdot \frac{z}{B} \quad \text{para } z \leq B \quad (45.1)$$

$$I_z = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot I_{z,m\acute{a}x} \cdot \left(4 - \frac{z}{b}\right) \quad \text{para } B < z \leq 4B \quad (45.2)$$

3.6.4 Detalhamento sapata – Via Método de Bielas

Esse método foi proposto pelo pesquisador Lebellet (1936, apud Bastos, 2019), onde as cargas provenientes da superestrutura são levadas à base da sapata por meio de bielas de concreto comprimido, que por consequência, induzem tração na base da fundação, dessa maneira, resistidas pelas armaduras.

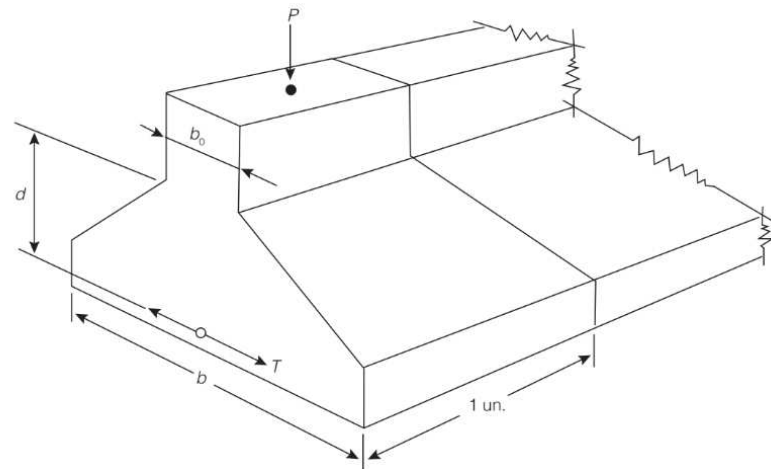
Figura 11 – Caminhamento da carga do pilar em direção à base da sapata



Fonte: (BASTOS, 2019).

Na visão de Alonso, (2019) para sapata isolada rígida adota-se a condição de altura útil da fundação, aplicando as Equações a seguir:

Figura 12 – Método das bielas para sapata corrida



Fonte: (ALONSO, 2019).

Equação 46 – Critérios de altura útil para sapata rígida corrida

$$d \geq \begin{cases} \frac{b - b_0}{4} & (46.1) \\ 1,44 \cdot \sqrt{\frac{P}{\left(0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{1,96}\right)}} & (46.2) \end{cases}$$

Onde:

d: Altura útil da sapata rígida, [m];

b: Dimensão da fundação em uma direção, [m];

b₀: Dimensão do pilar em uma direção, [m].

P: Carga aplicada na fundação, [kN].

Para o cálculo da força de tração na base da sapata, foi definida a seguinte as seguintes Equações (46), (48) e 49):

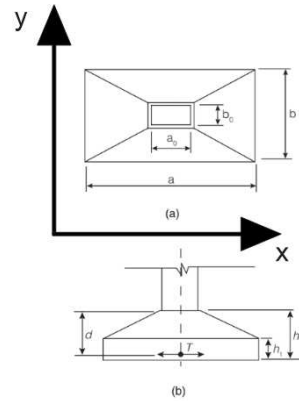
Equação 47 – Forças de tração para sapata corrida

$$T = \frac{P \cdot (b - b_0)}{8 \cdot d} \quad (47)$$

Onde:

T: Força de tração, [kN];

Figura 13 – Método das bielas para sapata rígida isolada



Fonte: Adaptado, (ALONSO, 2019).

Foi definida para os cálculos de área de aço para combater a força de tração para as sapatas corridas e isoladas pelas seguintes Equações (47), (51) e (52).

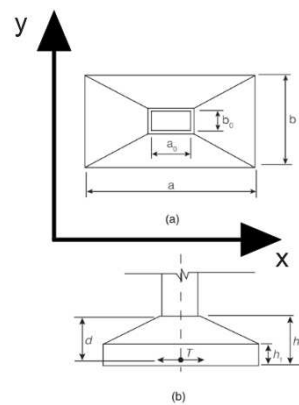
Equação 48 – Área de aço necessária para combater T

$$A_s = \frac{1,61 \cdot T}{f_{yk}} \quad (48)$$

Onde:

f_{yk} : Valor característico da resistência de escoamento do aço [MPa].

Figura 14 – Método das bielas para sapata rígida isolada



Fonte: Adaptado, (ALONSO, 2019).

Equação 49 – Critérios de altura útil para sapata rígida isolada

$$d \geq \begin{cases} \frac{a - a_0}{4} & (49.1) \\ \frac{b - b_0}{4} & (49.2) \\ 1,44 \cdot \sqrt{\frac{P}{\left(0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{1,96}\right)}} & (49.3) \end{cases}$$

Onde:

f_{ck} : Resistência característica do concreto à compressão, [MPa].

a : Dimensão da fundação em uma direção, [m];

b : Dimensão da fundação em uma direção, [m];

a_0 : Dimensão do pilar em uma direção, [m];

b_0 : Dimensão do pilar em uma direção, [m].

P : Carga aplicada na fundação, [kN].

Equação 50 – Forças de tração na direção x para sapata isolada

$$T_x = \frac{P \cdot (a - a_0)}{8 \cdot d} \quad (50)$$

Onde:

T_x : Força de tração no eixo x, [kN].

Equação 51 – Forças de tração na direção y para sapata isolada

$$T_y = \frac{P \cdot (b - b_0)}{8 \cdot d} \quad (51)$$

T_y : Força de tração no eixo y, [kN].

Equação 52 – Área de aço necessária para combater T_x

$$A_{sx} = \frac{1,61 \cdot T_x}{f_{yk}} \quad (52)$$

Onde:

A_{sx} : Área de aço na direção do eixo x, [cm²].

Equação 53 – Área de aço necessária para combater T_y

$$A_{sy} = \frac{1,61 \cdot T_y}{f_{yk}} \quad (53)$$

Onde:

A_{sy} : Área de aço na direção do eixo y, [cm²].

Pode-se calcular no número de barras, tomando como base a Tabela 8 no apêndice, que contém a área de aço para determinados diâmetros de aço, (BASTOS, 2019).

Equação 54 – Número de barras na direção x

$$n_{barra_x} = \left(\frac{A_{sx}}{A_{aço}} \right) + 1 \quad (54)$$

Onde:

n_{barra_x} : Número de barras na direção x;

$A_{aço}$: Área de aço, [cm²].

Equação 55 – Número de barras na direção y

$$n_{barra_y} = \left(\frac{A_{sy}}{A_{aço}} \right) + 1 \quad (55)$$

Onde:

n_{barra_y} : Número de barras na direção y.

As equações adotadas para o espaçamento das armaduras são demonstradas nas Equações (55) e (56). Vale salientar que, segundo o item 20.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014 p. 169), fala que, “As barras da armadura principal de flexão, devem apresentar espaçamento no máximo a $2 \cdot h$ ou 20 cm, prevalecendo o menor desses dois valores na região dos maiores momentos fletores”.

Equação 56 – Espaçamento das barras na direção x

$$Esp_x = \left(\frac{L - 2 \cdot comprimento}{n_{barra_x}} \right) \cdot 100 \quad (56)$$

Onde:

Esp_x : Espaçamento das barras na direção x, [cm];

cobrimento: Cobrimento da sapata, [m].

Equação 57 – Espaçamento das barras na direção y

$$Esp_y = \left(\frac{B - 2 \cdot \text{cobrimento}}{n_{barra_y}} \right) \cdot 100 \quad (57)$$

Onde:

Esp_y : Espaçamento das barras na direção y, [cm];

De acordo com a NBR (ABNT, 2014 p. 35) as armaduras “[...] devem ser ancoradas de forma que as forças a que estejam submetidas sejam integralmente transmitidos ao concreto, seja por meio de aderência ou de dispositivos mecânicos ou por combinação de ambos”.

Portanto, para o critério de comprimento das armaduras foram adotadas as seguintes equações:

Equação 58 – Comprimento da barra na direção x

$$Comp_x = [(B - 2 \cdot \text{cobrimento}) + 2 \cdot (h_0 - \text{cobrimento})] \cdot 100 \quad (58)$$

Onde:

$Comp_x$: Comprimento da barra na direção x, [cm].

h_0 : Altura da base da sapata, [m].

Equação 59 – Comprimento da barra na direção y

$$Comp_y = [(L - 2 \cdot \text{cobrimento}) + 2 \cdot (h_0 - \text{cobrimento})] \cdot 100 \quad (59)$$

Onde:

$Comp_y$: Comprimento da barra na direção y, [cm];

Equação 60 – Altura da base da sapata

$$h_0 \geq \begin{cases} 0,2 \text{ metro} \\ \frac{h}{4} \end{cases} \quad (\text{adotar o maior entre os dois}) \quad (60)$$

Onde:

h: Altura da sapata, [m]

3.7 SUPLEMENTO SOLVER PARA MICROSOFT EXCEL

“O Excel é um *software* muito popular que possui uma interface intuitiva e recursos matemáticos poderosos, fato que justifica e fomenta sua ampla utilização no desenvolvimento de projetos de engenharia.”, (NOGUEIRA, 2017, p. 12).

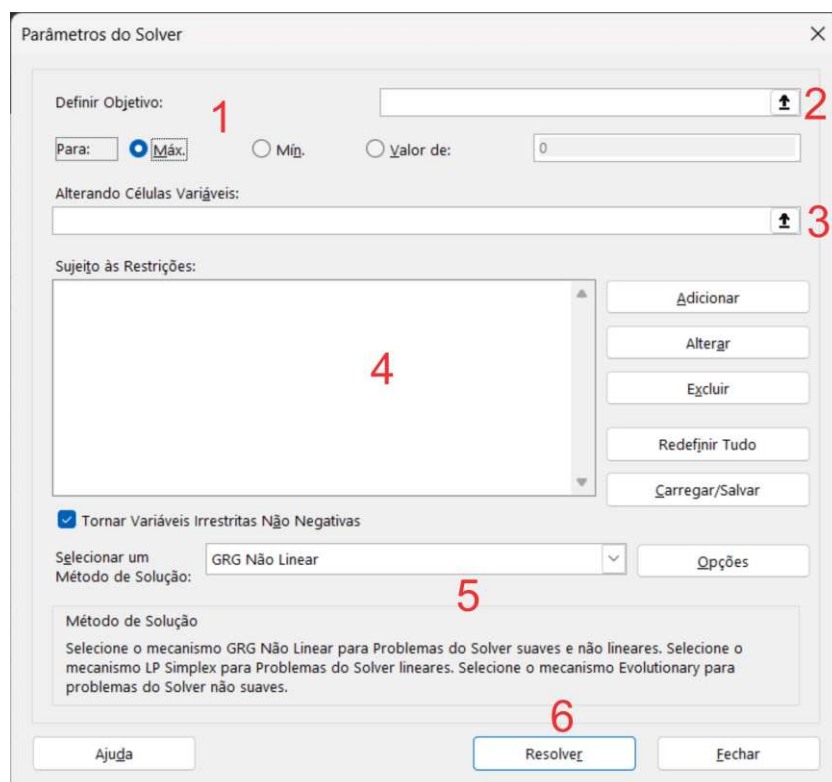
Diante disso, de acordo com, Sistemas Frontline, (2022) o Solver permite que o usuário determine um objetivo que necessita de uma série de restrição ou limites, para que com isso, o Solver realize cálculos para que seja encontrada uma otimização definida que melhor combina com tal objetivo.

Dessarte, o suplemento Solver para o Microsoft Excel trabalha com três tipos de otimizações:

- GRG não linear;
- LP Simplex;
- Evolutionary.

O método de otimização utilizado será o GRG não linear.

Figura 15 – Janela de parâmetros do Solver para Microsoft Excel



Fonte: (Autorial, 2022)

Onde:

1. Opção de otimização desejada, que pode ser um valor mínimo, máximo ou um valor específico;
2. Célula em que se deseja obter o objetivo desejado pela otimização;
3. Célula ou intervalo de células que contenham as variáveis, ou seja, o usuário da planilha insere os valores que serão modificados. Portanto, não podendo ter fórmulas, apenas números.
4. Nesse campo, será inserido valores que o usuário deseja restringir, sendo que, depois da sua inserção o mesmo poderá ser alterado ou excluído. Essas restrições podem ser menores do que zero ou iguais a zero ou maiores do que zero ou um valor inteiro ou um valor binário, ou um valor diferente;
5. Escolha do método de otimização, podendo ser GRG não linear, LP Simplex e Evolutionary;
6. Tudo definido, pode-se realizar os cálculos de otimização.

4 METODOLOGIA

4.1 APRESENTAÇÃO DA PLANILHA ELETRÔNICA

Nessa seção será voltada para a demonstração da interface da planilha eletrônica do Microsoft Excel, que é subdivida em três partes, da qual o usuário escolhe qual será o método de dimensionamento, via método de capacidade de carga de Terzaghi ou capacidade de carga de Vésic e também para ter acesso ao banco de dados, como mostra a Figura 18.

Figura 16 – Menu inicial planilha eletrônica



Fonte: Autoral (2022).

Com o usuário clicando em uma das duas primeiras opções, a planilha irá para a entrada de dados e de dimensionamento da sapata superficial para sua respectiva opção. Como será explicado no tópico a seguir.

4.1.1 Dados de entrada

Inicialmente determina-se o nome da fundação que será dimensionada, para que em seguida o usuário preencha as subseções com informações pertinentes para desenvolvimento dos cálculos necessários para que a fundação seja dimensionada respeitando as restrições do suplemento Solver, que são forma geométrica da sapata, dados do solo, carregamento do pilar, geometria do pilar, dados de recalque, armações e concreto, fator de segurança e o modo de ruptura escolhido.

Figura 17 – Dados de entrada

Forma Geométrica da Sapata	
Largura da Sapata - Bs:	-
Comprimento da Sapata - Ls:	-
Profundidade - D:	-
Formato da Sapata:	Retangular
Altura Maior - Hs:	-
Altura da base - hs:	-

Dados do Solo	
Ângulo de atrito - ϕ_s :	0 °
Coesão do Solo - Cs:	-
Peso Específico - γ_s :	-
Profundidade Lençol freático - Dw:	-
Peso Específico Sat - γ_{s_sat} :	-

Carregamento do Pilar	
Carga Vertical - V:	-
Carga Horizontal - H:	-
Carga Momento - Mx:	-
Carga Momento - My:	-

Geometria do Pilar	
Largura - bp:	-
Comprimento - lp:	-

Recalques:	
Coefficiente de Poisson - v:	-
Módulo de Elasticidade - E:	-
Tempo - t:	-
ρ_{limite} :	-
Considerar efeito do tempo para o recalque: ☐	FALSO

Armações e Concreto	
Cobrimento Concreto:	0,05 m
Fck - Concreto:	25 MPa
Fyk - Sapata:	500 MPa
Bitola:	10,0 mm

Fonte: Autoral (2022).

Como o dimensionamento da fundação para o método de Vésic requer mais parâmetros de entrada é necessário inserir os dados de carga horizontal, inclinação do carregamento e inclinação do terreno, caso tenham como mostra as figuras a seguir.

Figura 18 – Carregamento do pilar para método via Vesic

Carregamento do Pilar	
Carga Vertical - V:	-
Carga Horizontal - H:	-
Carga Momento - Mx:	-
Carga Momento - My:	-

Fonte: Autoral (2022).

Figura 19 – Fatores de inclinação da carga e terreno via Vésic

Inclinação da Base e do Terreno	
Inclinação da base da fundação: α	0°
Inclinação superfície do terreno adjacente: β	0°

Fonte: Autoral (2022).

Há uma diferença entre os modos de ruptura entre os métodos de Terzaghi e Vésic, pois como foi referenciado, o modelo do primeiro pesquisador mencionado é de ruptura geral e localizada, já para Vésic o que difere é que em vez de ser ruptura localizada, é dada a ruptura por punção.

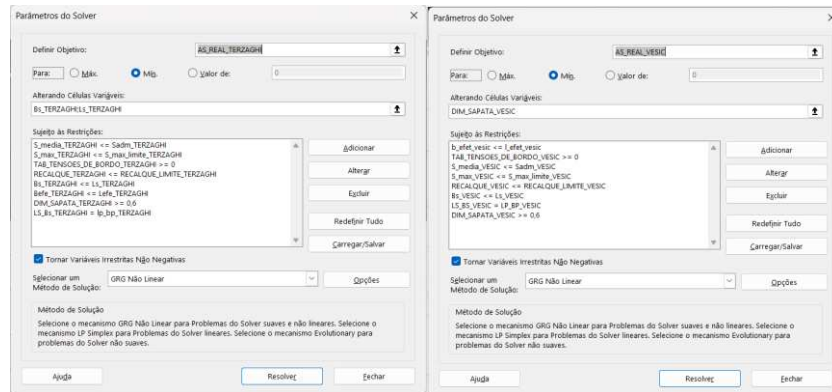
4.1.2 Restrições para suplemento Solver

Para que o dimensionamento da fundação seja efetuado visando a maior eficiência, é necessário respeitar critérios e restrições a fim de minimizar ao máximo possível a quantidade de materiais que precisará para confecção da sapata superficial e a economia financeira, isso sem perder a segurança necessária para que a fundação não sofra com recalques diferenciais, assim evitando possíveis patologias decorrentes do seu mau dimensionamento.

Sendo assim, para o suplemento Solver será utilizado as mesmas restrições para ambos os métodos de capacidade de carga, tendo a célula de objetivo a área da fundação, alternado as dimensões da fundação em dimensionamento com as seguintes restrições:

- Menor dimensão efetiva (B_{efe}) $\leq$ Maior dimensão efetiva (L_{efe});
- Tensões de bordo ≥ 0 ;
- Tensão média (σ_{med}) $\leq$ Tensão admissível (σ_{adm});
- Tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) $\leq$ Tensão máxima limite ($\sigma_{m\acute{a}x_{lim}}$);
- Recalque (ρ) $\leq$ Recalque limite (ρ_{limite});
- Menor dimensão (B) $\leq$ Maior dimensão (L);
- Criérios de balanços iguais (Ls_{Bs}) = (Lp_{Bp});
- Dimensões das fundação $\geq 0,6$ metros.

Figura 20 – Restrições para o suplemento Solver



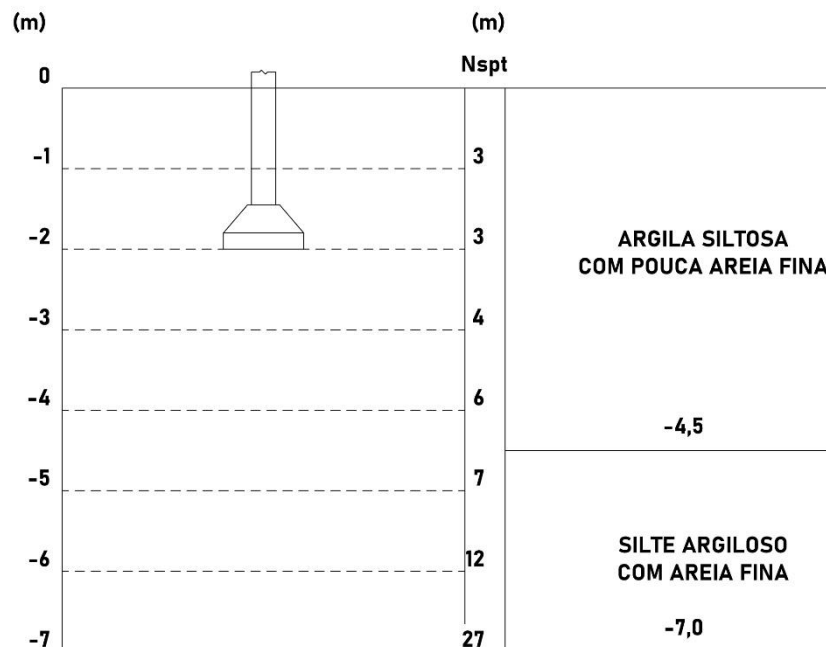
Fonte: Autoral (2022).

4.1.3 Aplicação

A aplicação será realizada para duas sapatas com suas características individuais a fim de que seja avaliada as teorias de capacidade de carga de Terzaghi e Vesic no módulo de ruptura geral.

Assim, antes da aplicação para dimensionamento das sapatas, foi realizado uma sondagem do solo fictício com o intuito de captação das características do solo em que irá suportar as cargas das fundações.

Figura 21 – Estudo do solo



Autoral (2022).

Dessa forma, as sapatas serão assentadas com suas bases na cota de profundidade de 2,0 metros, ou seja, no solo contendo argila siltosa pouco arenosa, com o ângulo de atrito de 24° ,

coesão de 24 kN/m², peso específico de 19 kN/m³ e não contendo influência do lençol freático na espessura de camada inferior a cota de base da fundação, portando um solo seco.

Dados expostos a respeito do solo, é necessário que se tenha os dados de geometria dos pilares e magnitudes das cargas como mostra a tabela 8.

Tabela 8 – Dados Pilares

ID	Dimensões	V	M_x	M_y
Pilar	(cm x cm)	(kN)	(kN · m)	(kN · m)
1	30x30	975	0	0
2	30x60	1350	100	50

Fonte: Autoral (2022).

Será dimensionada duas situações para as sapatas, com carga centrada e pilar quadrado e carga com momentos e pilar retangular, respectivamente. Inicialmente usuário insere o pré-dimensionamento para sapata, quadrada com dimensões de 1,0 metro e retangular com as dimensões 1,0 metro e 2,0 metros, por essa ordem.

Então, com essas informações inseridas, deve-se inserir o recalque limite, que segundo Terzaghi (1943), um recalque de até 15 milímetros é aceitável para edificações de pequeno porte e também é informado na planilha se o usuário deseja que a ela calcule o efeito do tempo do recalque diferencial, no caso em estudo não seja aplicado esse efeito.

É fornecido as informações de armações e de concreto tais como, módulo de elasticidade com 25 MPa, cobrimento do concreto da sapata que, segundo a NBR 6122 (ABNT, 2019), é recomendado 4 centímetros para esse tipo de fundação, Fck do concreto de 25 MPa, Fyk com 500 MPa e bitola para o aço com 12,50 milímetros. Como referenciado, o fator de segurança para esse tipo de fundação é adotado 3,0.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pós o processo de cálculos tomando como base as restrições adotadas pelo usuário via Suplemento Solver para as duas sapatas conforme as respectivas teorias de capacidade de carga, foram obtidos os seguintes resultados.

Por fim o suplemento realizou as iterações necessárias até conseguir encontrar as menores dimensões possíveis das sapatas em estudo.

5.1 RESULTADOS PARA CAPACIDADE DE CARGA DE TERZAGHI

Foram realizados os cálculos e iterações e foram atendidas todas restrições adotadas pelas normas para ambas as sapatas.

5.1.1 Sapata 01

As dimensões da sapata 01 foram de 2,05 metros, tendo como a tensão exercida pelo solo na base da sapata de $38,8 \text{ kN/m}^2$, tensão de ruptura de $1150,8 \text{ kN/m}^2$, tensão admissível de $383,6 \text{ kN/m}^2$ e tensão efetiva na sapata de $232,3 \text{ kN/m}^2$.

Todas as tensões de bordo foram de $232,3 \text{ kN/m}^2$ e a tensão máxima limite, tomando o acréscimo de 15% da tensão admissível foi de $441,1 \text{ kN/m}^2$.

Para o recalque via Schmertmann obteve-se o recalque de 10 milímetros, índice de deformação específica máxima de 0,684 na cota 3,02 metros conforme mostra ver na tabela 11 e gráfico 3 nos apêndices B e C.

No dimensionamento teve como resultado uma área de aço de 13,72 centímetros quadrados para ambas direções, sendo assim, para a bitola de aço de 12,50 milímetros, teve um total de 12 barras com o espaçamento de 18,00 centímetros e comprimento de 235 centímetros.

5.1.2 Sapata 02

As dimensões da sapata foram de 2,37 metros e 2,74 metros, respectivamente, tendo como a tensão exercida pelo solo na base da sapata de 38 kN/m^2 , tensão de ruptura de $1090,4 \text{ kN/m}^2$, tensão admissível de $363,5 \text{ kN/m}^2$, levando em consideração as excentricidades de carga e_x e e_y com 0,04 metros e 0,07 metros, nessa ordem, com essa situação obteve-se a tensão efetiva na sapata de $227,2 \text{ kN/m}^2$.

Foi atendido a condição de critério de balanços iguais com a dimensão de 30 centímetros.

A tensão máxima e mínima de bordo foram, 261,5 kN/m² e 154,9 kN/m² respectivamente e tendo a tensão máxima limite, tomando como base o acréscimo de 15% da tensão admissível foi de 418 kN/m².

Para o recalque via Schmertmann obteve-se o recalque de 15 milímetros, índice de deformação específica máxima de 0,6540 na cota 3,77 metros conforme mostra ver na tabela 13 e gráfico 5 nos apêndices B e C.

No dimensionamento teve como resultado na direção x uma área de aço de 18,71 centímetros quadrados, para a bitola de aço de 12,50 milímetros, teve um total de 15 barras com o espaçamento de 18,00 centímetros e comprimento de 269,00 centímetros e na direção y obteve-se uma área de aço de 19,38 centímetros quadrados, para a bitola de aço de 12,50 milímetros, teve um total de 16 barras com o espaçamento de 14,00 centímetros e comprimento de 306,00 centímetros.

5.2 RESULTADOS PARA CAPACIDADE DE CARGA DE VESIC

5.2.1 Sapata 01

As dimensões da sapata 01 foram de 1,72 metros, tendo como a tensão exercida pelo solo na base da sapata de 38 kN/m², tensão de ruptura de 1368,4kN/m², tensão admissível de 456,1 kN/m² e tensão efetiva na sapata de 331,2 kN/m².

Todas as tensões de bordo foram de 331,2 kN/m² e a tensão máxima limite, tomando o acréscimo de 15% da tensão máxima admissível foi de 524,6 kN/m².

Para o recalque via Schmertmann obteve-se o recalque de 14 milímetros, índice de deformação específica máxima de 0,73 na cota 2,86 metros conforme mostra ver na tabela 12 e gráfico 4 nos apêndices B e C.

No dimensionamento teve como resultado uma área de aço de 15,70 centímetros quadrados para ambas direções, sendo assim, para a bitola de aço de 12,50 milímetros, teve um total de 13 barras com o espaçamento de 13,00 centímetros e comprimento de 204 centímetros.

5.2.2 Sapata 02

As dimensões da sapata foram de 2,37 metros e 2,74 metros, respectivamente, tendo como a tensão exercida pelo solo na base da sapata de 38,00 kN/m², tensão de ruptura de 1517,1 kN/m², tensão admissível de 505,7 kN/m², levando em consideração as excentricidades de carga ex e ey com 0,04 metros e 0,07 metros, nessa ordem, com essa situação obteve-se a tensão efetiva na sapata de 227,2 kN/m².

Foi atendido a condição de critério de balanços iguais com a dimensão de 30 centímetros.

A tensão máxima e mínima de bordo foram, 261,5 kN/m² e 154,9 kN/m² respectivamente e tendo a tensão máxima limite, tomando como base o acréscimo de 15% da tensão admissível foi de 581,5 kN/m².

Para o recalque via Schmertmann obteve-se o recalque de 15 milímetros, índice de deformação específica máxima de 0,65 na cota 3,77 metros conforme mostra ver na tabela 14 e gráfico 6 nos apêndices B e C.

No dimensionamento teve como resultado na direção x uma área de aço de 20,98 centímetros quadrados, para a bitola de aço de 12,50 milímetros, teve um total de 17 barras com o espaçamento de 16,00 centímetros e comprimento de 269,00 centímetros e na direção y obteve-se uma área de aço de 21,74 centímetros quadrados, para a bitola de aço de 12,50 milímetros, teve um total de 18 barras com o espaçamento de 13,00 centímetros e comprimento de 306,00 centímetros.

5.3 RESULTADOS

A seguir será avaliado em forma de tabela e gráficos os resultados para as sapatas em estudos.

Tabela 9 – Comparação dados

SAPATA	TEORIA	B (m)	L (m)	σ_{rup} (kN/m ²)	σ_{adm} (kN/m ²)	σ_{efe} (kN/m ²)	ρ_{lim} (mm)
1	TERZAGHI	2,05	2,05	1150,8	383,6	232,3	10
	VESIC	1,72	1,72	1368,4	331,2	331,2	14
2	TERZAGHI	2,37	2,74	1090,4	363,5	227,2	15
	VESIC	2,37	2,74	1517,1	505,7	227,2	15

Fonte: Autoral (2022).

Gráfico 1 – Tensão de Ruptura para S01



Fonte: Autoral, (2022).

Com a análise do gráfico 1, a tensão de ruptura para sapata 01 via Vésic foi 18,9% superior em relação a tensão de ruptura via Terzaghi.

Gráfico 2 – Tensão de Ruptura para S02



Fonte: Autoral, (2022).

Com a análise do gráfico 2, a tensão de ruptura para sapata 02 via Vésic foi 39,13% superior em relação a tensão de ruptura via Terzaghi.

Portanto, dados expostos a teoria de capacidade de carga de Terzaghi é mais conservadora em relação a de Terzaghi, devido aos parâmetros a mais que contém na equação de ruptura de carga de Vesic.

5.3 PLANILHA EXTERNA DE DETALHAMENTO VIA AUTOCAD

Com o usuário acionando o botão “DETALHAR CAD” na planilha elaborada, será aberta uma planilha auxiliar desenvolvida pelo Prof. Dr. John Eloi Bezerra, preenchida com os dados pertinentes para o detalhamento, que por meio do uso do VBA (*Visual Basic for Applications*), será desenhada no *software Autodesk AutoCAD*, a sapata dimensionada na planilha desenvolvida no trabalho em questão. Levando em consideração os dados da planilha originária é calculado o resumo de aço necessário para fundação, como podemos ver na figura a seguir.

Figura 22 – Planilha externa – Prof. Dr. John Eloi Bezerra

PLANILHA AUXILIAR PARA DETALHAMENTO DE SAPATAS
Prof John Eloi Bezerra - UFERSA - Eng. Civil

Desenho Parametrizado:
Nome da Sapata = S01

SAPATA

Largura, B = 236,6
Comprimento, L = 274,0
Altura total, H = 100,0
Altura base, h = 25,0

Largura Pilar, Bp = 30,0
Comprimento Pilar, Lp = 60,0
Resumo dimensões = (236,6/274/100/25) Esc 1:25

PILAR

Altura Pilar, hp = 50,0
Colarinho, col = 3,0
Espess. Regularização, reg = 5,0

ARMATURAS

Armação NL = 18 N1 Ø12,5 c/13 C=306
Armação NB = 17 N2 Ø12,5 c/16 C=269
Comprimento Dobra, d = 20,0
Recobrimento, r = 4,0

Resumo do Aço

	Posição	Repetição	Bitola (mm)	Esp. (cm)	Compr. (cm)	L total (m)	Peso (kg) + 10%	Vol (m³)
Direção L	1	18	12,5	13	306	55,08	60,6	
Direção B	2	17	12,5	16	269	45,73	50,3	
	Total =						110,9	3,56

☒ Inserir tabela de aço no detalhamento
☒ Visualizar sapata detalhada em CAD.

Fonte: (BEZERRA, 2022)

No anexo D, segue os detalhamentos para as 4 sapatas dimensionadas, com todas suas características detalhadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desse trabalho alcançou o êxito proposto pela justificativa, afinal obteve-se o resultado esperado para as metas propostas, pois foi aplicado teorias de capacidades de carga a ruptura com o fundamento de dois dos principais pesquisadores sobre o assunto, avaliando no nível de lençol freático e recalque para fundações rasas e utilizando definições normativas com o objetivo de dimensionamento e detalhamento geotécnico proposto.

Com base em análise dos resultados e discussão, notou-se que uma das principais vantagens do uso de tecnologias, é a velocidade que se pode aplicar metodologias de cálculos de diversas áreas da engenharia em comparação ao desenvolvimento manual e também para que se tenha uma melhor análise dos resultados obtidos pelo o desenvolvimento da planilha.

O estudo realizado permitiu a aplicação de uma série de cálculos envolvendo conceitos em bibliografias para o dimensionamento eficiente de sapatas superficiais rígidas, por meio do *Excel* que é um *software* presente no cotidiano dos engenheiros, somando a isso, foi utilizada a ferramenta Solver, que abrange um extremo poder de cálculo, assim otimizando a fundação ao máximo possível para que assim se obtenha as menores dimensões da fundação dimensionada, desse modo, trazendo economia de materiais, mão de obra e financeira para sua execução.

Portanto, a utilização dessa planilha serve tanto para o uso profissional do engenheiro de fundações, quanto para a aplicação do conhecimento acadêmico, por isso, vale salientar que é de extrema importância que o usuário que for utiliza-la tenha conhecimento necessário para que seja inserido corretamente os dados necessários para o dimensionamento das fundações superficiais rígidas.

Sugestões para futuros trabalhos de conclusão de curso, é a aplicação dessa metodologia com a utilização do suplemento Solver de novas metodologias de capacidade de carga para fundações rasas, tais como, Brinch-Hansen e Meyerhof.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.
- ABNT. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, Brasil, 2019.
- ALONSO, U. R. **Exercícios de Fundações**. 3ª Edição ed. [s.l: s.n.].
- BASTOS, PROF. DR. P. S. DOS S. **SAPATAS DE FUNDAÇÃO**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, jun. 2019.
- BERBERIAN, D. **Engenharia de Fundações**. 1º Edição ed. Brasília: [s.n.].
- BEZERRA, J. E. **DETALHAMENTO SAPATA VS 00**. Mossoró, RN, 2022.
- BOWLES, J. E. **Foundation analysis and design**. Fifth Edition ed. Singapore: McGraw-Hill, 1996.
- CAMPOS, J. C. DE. **Elementos de Fundações em Concreto**. 1º Edição ed. São Paulo: Oficina de textos, 2015.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações Diretas – Projeto Geotécnico**. 1º ed. São Paulo: [s.n.].
- DAS, B. M.; SIVAKUGAN, N. **Principles of Foundation Engineering**. 9th Edition ed. California : Cengage, 2019.
- DE BEER, E. E. EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE SHAPE FACTORS AND THE BEARING CAPACITY FACTORS OF SAND. v. 20, n. 4, p. 387–411, 1970.
- DICIONÁRIO ONLINE DE PORTUGUÊS. **Fundação**.
- FOPPA, D. **NOVO MÉTODO PARA CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS ASSENTES SOBRE CAMADA DE REFORÇO EM SOLO-CIMENTO**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- HACHICH, W. et al. **Fundações - Teoria e Prática**. 2º Edição ed. São Paulo: [s.n.].
- JOPPERT JR, I. **Fundações e contenções de edifícios**. 1º Edição ed. São Paulo: Editora PINI Ltda., 2007.
- JÚNIOR, P. R. F. **PROJETO DE FUNDAÇÕES POR SAPATAS RÍGIDAS DIMENSIONADAS POR SOFTWARE ESTRUTURAL VERIFICADO POR METODOLOGIA MANUAL**. Porto Alegre: Universidade Federal do Estado do Rio Grande do Sul, 2020.
- MARTINHO, F. M. DE C. **DIMENSIONAMENTO DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS E PROFUNDAS DE ACORDO COM OS EUROCÓDIGOS - APLICAÇÃO A UM CASO DE ESTUDO**. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017.

MOREIRA, E. B. **CAPACIDADE DE CARGA DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS ASSENTES SOBRE CAMADA FINITA DE SOLO CIMENTADO**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

NOGUCHI, L. T. **Análise da capacidade de carga de fundação por sapatas executadas na cidade de São Caetano do Sul/SP**. Campinas: Universidade estadual de Campinas, 2012.

NOGUEIRA, L. G. O. **FERRAMENTA EM AMBIENTE EXCEL PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE TRELIÇAS ESPACIAIS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**. Mossoró: Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2017.

SCHMERTMANN, J. H. Static cone to compute settlement over sand. **Journal Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 96, n. SM3, 1970.

SENA, L. **ESTUDO DE CASO SOBRE PROJETO DE FUNDAÇÕES POR SAPATAS E POR ESTACAS**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

SISTEMAS FRONTLINE, I. **Definir e resolver um problema usando o Solver**.

SOUZA, M. W. F. DE. **ESTUDO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO ADEQUADA COM A DIMENSÃO DE SAPATAS APOIADAS EM SUBSOLOS ARENOSOS**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. New York: [s.n.].

VELLOSO, D. DE A.; LOPES, F. DE R. **Fundações**. 2º ed. São Paulo: [s.n.]. v. 1

VESIC, A. S. **Bearing capacity of shallow foundations**. [s.l.] Department of civil Engineering, 1975.

APÊNCIDE A

APLICAÇÃO PARA SAPATAS 01 E 02

FOMULAÇÃO PARA CAPACIDADE DE CARGA DE TERZAGHI E VESIC

Figura 23 – Dados de entrada para S01 pós dimensionamento – Via Terzaghi

INÍCIO		NOME DA SAPATA = S01		OTIMIZAR	
Forma Geométrica da Sapata					
DETALHAR AUTOCAD	Largura da Sapata - B:	2,05 m		RESUMO	
	Comprimento da Sapata - L:	2,05 m			
	Profundidade - D:	2,00 m			
	Formato da Sapata:	Quadrada			
	Altura Maior - Hs:	1,00 m			
	Altura da base - Hb:	0,25 m			
Dados do Solo					
	Ângulo de atrito - ϕ :	24 °			
	Coesão do Solo - Cs:	20,0 kN/m²			
	Peso Específico - γ_s :	19,0 kN/m³			
	Profundidade Lençol freático - Dwf:	100,00 m			
	Peso Específico Sat - $\gamma_{s, sat}$:	19,0 kN/m³			
Carregamento do Pilar					
	Carga Vertical - V:	975,00 kN			
	Carga Horizontal - H:	0,00 kN			
	Carga Momento - Mx:	0,0 kN.m			
	Carga Momento - My:	0,0 kN.m			
Geometria do Pilar					
	Largura - bp:	0,30 m			
	Comprimento - lp:	0,30 m			
Recalques:					
	Coefficiente de Poisson - ν :	0,35			
	Módulo de Elasticidade - E:	25,00 MPa			
	Tempo - t:	5 anos			
	p _{limite} :	0,015 m			
	Considerar efeito do tempo para o recalque:	☐ FALSO			
Armações e Concreto					
	Cobrimento Concreto:	0,04 m			
	Fck - Concreto:	25 MPa			
	Fyk - Sapata:	500 MPa			
	Bitola:	12,5 mm			
Fatores de Segurança					
	FS Global:	3,0			
Modo de Ruptura da Fundação					
☒ Ruptura Geral ☐ Ruptura Local					

Figura 24 – Dados de entrada S01 pós dimensionamento – Via Vesic

INÍCIO		NOME = S01		OTIMIZAR	
Forma Geométrica da Sapata					
DETALHAR CAD	Largura da Sapata - B:	2,37 m		RESUMO	
	Comprimento da Sapata - L:	2,74 m			
	Profundidade - D:	2,00 m			
	Formato da Sapata:	Retangular			
	Área da sapata:	6,48 m²			
	Altura Maior - Hs:	1,00 m			
	Altura da base - Hb:	0,25 m			
Dados do Solo					
	Ângulo de atrito - ϕ :	24,00 °			
	Coesão do Solo - Cs:	20,0 kN/m²			
	Peso Específico - γ_s :	19,0 kN/m³			
	Profundidade Lençol freático - Dwf:	100,00 m			
	Peso Específico Sat - $\gamma_{s, sat}$:	19,0 kN/m³			
Inclinação da Base e do Terreno					
	Inclinação da base da fundação: α :	0 °			
	Inclinação superfície do terreno adjacente: β :	0 °			
Carregamento do Pilar					
	Carga Vertical - V:	1350,00 kN			
	Carga Horizontal - H:	0,00 kN			
	Carga Momento - Mx:	100,0 kN.m			
	Carga Momento - My:	50,0 kN.m			
Geometria do Pilar					
	Largura - bp:	0,30 m			
	Comprimento - lp:	0,60 m			
Recalques					
	Coefficiente de Poisson - ν :	0,35			
	Módulo de Elasticidade - E:	25,00 MPa			
	Tempo - t:	5 anos			
	p _{limite} :	0,015 m			
	Considerar efeito do tempo para o recalque:	☐ FALSO			
Armações e Concreto					
	Cobrimento Concreto:	0,04 m			
	Fck - Concreto:	25 MPa			
	Fyk - Sapata:	500 MPa			
	Bitola:	12,50 mm			
Fatores de Segurança					
	FS Global:	3,00			
Coefficiente m:					
Escolha:	☒ mb	☐ ml			
	Opção:	1	Valor:	1,54	
Modo de Ruptura da Fundação					
☒ Ruptura Geral ☐ Funcionamento					

Figura 25 – Dados de entrada para S02 pós dimensionamento – Via Terzaghi

INÍCIO		NOME DA SAPATA =	S02	OTIMIZAR	
DADOS DE ENTRADA	DETALHAR AUTOCAD	Forma Geométrica da Sapata			
		Largura da Sapata - Bs:	2,37 m		
		Comprimento da Sapata - Ls:	2,74 m		
		Profundidade - D:	2,00 m		
		Formato da Sapata:	Retangular		
			Altura Maior - Hs:	1,00 m	
			Altura da base - Hb:	0,25 m	
	Dados do Solo				
		Ângulo de atrito - ϕ_s :	24 °		
		Coesão do Solo - Cs:	20,0 kN/m ²		
		Peso Específico - γ_s :	19,0 kN/m ³		
		Profundidade Lençol freático - Dwf:	100,00 m		
		Peso Específico Sat - γ_{s_sat} :	19,0 kN/m ³		
	Carregamento do Pilar				
		Carga Vertical - V:	1350,00 kN		
	Carga Horizontal - H:	0,00 kN			
	Carga Momento - Mx:	100,0 kN.m			
	Carga Momento - My:	50,0 kN.m			
Geometria do Pilar					
	Largura - bp:	0,30 m			
	Comprimento - lp:	0,60 m			
Recalques:					
	Coefficiente de Poisson - ν :	0,35			
	Módulo de Elasticidade - E:	25,00 MPa			
	Tempo - t:	5 anos			
	p_limite :	0,015 m			
	Considerar efeito do tempo para o recalque: ☐	FALSO			
Armações e Concreto					
	Cobrimento Concreto:	0,04 m			
	Fck - Concreto:	25 MPa			
	Fyk - Sapata:	500 MPa			
	Bitola:	12,5 mm			
Fatores de Segurança					
	FS Global:	3,0			
Modo de Ruptura da Fundação					
☒ Ruptura Geral ☐ Ruptura Local					

Figura 26 – Dados de entrada S02 pós dimensionamento – Via Vesic

INÍCIO		NOME =	S01	OTIMIZAR	
DADOS DE ENTRADA	DETALHAR CAD	Forma Geométrica da Sapata			
		Largura da Sapata - Bs:	2,37 m		
		Comprimento da Sapata - Ls:	2,74 m		
		Profundidade - D:	2,00 m		
		Formato da Sapata:	Retangular		
			Área da sapata:	6,48 m ²	
			Altura Maior - Hs:	1,00 m	
			Altura da base - Hb:	0,25 m	
	Dados do Solo				
		Ângulo de atrito - ϕ_s :	24,00 °		
		Coesão do Solo - Cs:	20,0 kN/m ²		
		Peso Específico - γ_s :	19,00 kN/m ³		
		Profundidade Lençol freático - Dwf:	100,00 m		
		Peso Específico Sat - γ_{s_sat} :	19,00 kN/m ³		
	Inclinação da Base e do Terreno				
	Inclinação da base da fundação - α :	0 °			
	Inclinação superfície do terreno adjacente - β :	0 °			
Carregamento do Pilar					
	Carga Vertical - V:	1350,00 kN			
	Carga Horizontal - H:	0,00 kN			
	Carga Momento - Mx:	100,0 kN.m			
	Carga Momento - My:	50,0 kN.m			
Geometria do Pilar					
	Largura - bp:	0,30 m			
	Comprimento - lp:	0,60 m			
Recalques					
	Coefficiente de Poisson - ν :	0,35			
	Módulo de Elasticidade - E:	25,00 MPa			
	Tempo - t:	5 anos			
	p_limite :	0,015 m			
	Considerar efeito do tempo para o recalque: ☐	FALSO			
Armações e Concreto					
	Cobrimento Concreto:	0,04 m			
	Fck - Concreto:	25 MPa			
	Fyk - Sapata:	500 MPa			
	Bitola:	12,50 mm			
Fatores de Segurança					
	FS Global:	3,00			

Figura 27 – Memorial de cálculo S01 – Via Terzaghi

Cálculos		
1) Influência do Lençol Freático	Sem influência do L.F.	
Lençol Freático - Dw = 100,00 m	Profundidade Sapata - D = 2,00 m	
Peso Específico da água - $\gamma_{\text{ág}} = 10,00 \text{ kN/m}^3$	Peso Específico - $\gamma_{\text{s, novo}} = 19,00 \text{ kN/m}^3$	
2) Cálculo dos fatores de capacidade de carga:	Nc = 23,36	Nq = 11,4 Ng = 7,08
3) Coeficientes de forma da sapata	Sc = 1,30	Sq = 1,00 Sy = 0,80
4) Tensão exercida pelo solo na base da Sapata, q	q = 38,0 kN/m ²	
5) Tensão de ruptura do sistema de fundação, σ_r	$\sigma_r = 1150,8 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_{\text{adm}} = 383,6 \text{ kN/m}^2$	
6) Determinação das excentricidades - ex e ey:	ex = 0,00 m	ey = 0,00 m
7) Correção da área efetiva da Sapata em contato com Solo - A_{efetiva}	B' = 2,05 m L' = 2,05 m	Aefetiva = 4,20 m ²
8) Cálculo da tensão efetiva na Sapata:	cref = 232,3 kN/m ²	
9) Critério de balanços iguais para Sapata:	Largura da Sapata - Comprimento da Sapata = 0,00 m	Larg. Pilar - Comp. Pilar = 0,00 m
ATENDE A ESSE CRITÉRIO = ATENDE		
10) Cálculo das tensões nos bordos da sapata	a) Excentricidade em uma direção Núcleo Central de inércia: 0,00 m Largura Sapata / 6 = 0,34 m ATENDE A ESSE CRITÉRIO = ATENDE Formato da Sapata: Quadrada Área real da sapata: 4,20 m² BORDO 1 = 232,3 kN/m² BORDO 2 = 232,3 kN/m² BORDO 3 = 232,3 kN/m² BORDO 4 = 232,3 kN/m² Máximo = 232,3 kN/m² Mínimo = 232,3 kN/m² Média = 232,3 kN/m² Máxima Limite = 441,1 kN/m²	
11) Cálculo do recalque do solo abaixo da cota de assentamento da sapata	Modelo Sapata Utilizada = Quadrada Máxima Profundidade Z abaixo da Sapata = 6,10 m Profundidade, $z_{\text{max}} = 3,02 \text{ m}$ Tensão Vertical Máxima na cota, $z_{\text{max}} = 57,5 \text{ kN/m}^2$ Índice de deformação específica máxima, $z_{\text{max}} = 0,6839$ Recalque Limite, $p_{\text{limite}} = 0,015 \text{ m}$ Recalque Calculado, $p = 0,010 \text{ m}$ Atende a esse critério = ATENDE	
12) Cálculo Estrutural da Sapata - Método de Bielias	Cálculo da altura útil da sapata, d_u: $d_u = 0,50 \text{ m}$ Cálculo da altura da base da sapata, h_b: $h_b = 0,25 \text{ m}$ Cálculo das trações nas direções x(Bx) e na direção y(Ly): Cálculo das armaduras nas duas direções: Número de barras Direção X: N. barras X = 11 barras Espacamento na Direção X: Espacamento em X = 18,00 cm Comprimento da Barra na direção X: Comprimento em X = 237,00 m Comprimento da dobra Cobrimento de = 21,00 cm Número de barras Direção Y: N. barras Y = 11 barras Número de barras Direção Y Espacamento em Y = 18,00 cm Comprimento da Barra na direção Y: Comprimento em Y = 237,00 m	

Figura 28 – Memorial de cálculo S01 – Via Vesic

MEMORIAL DE CÁLCULOS

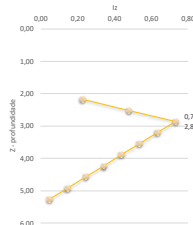
Cálculos			
1) Influência do Lençol Freático	Sem influência do L.F.		
	Lençol Freático - Dw = 100,00 m	Profundidade Sapata - D = 2,00 m	
	Peso Específico da água - $\gamma_{água}$ = 10,00 kN/m³	Peso Específico - $\gamma_{s,novo}$ = 19,00 kN/m³	
2) Cálculo dos fatores de capacidade de carga	Nc = 19,32	Nq = 9,60	Ng = 9,44
3) Coeficientes de forma da sapata	Sc = 1,50	Sq = 1,45	S $_{\gamma}$ = 0,60
4) Cálculo dos fatores de profundidade	k = 0,43 dc = 1,17	dq = 1,13	d $_{\gamma}$ = 1,00
5) Cálculo do coeficiente m:	mb = 1,50 ml = 1,50		
6) Cálculo da componente horizontal:	H = 0,00 kN		
7) Fatores de correção de inclinação:	ic = 1,00	iq = 1,00	iy = 1,00
8) Tensão exercida pelo solo na base da Sapata, q	q = 38 kN/m²		
9) Fator de inclinação do terreno	gc = 1,00	gq = 1,00	g $_{\gamma}$ = 1,00
10) Fator de inclinação de base	bc = 1,00	bq = 1,00	b $_{\gamma}$ = 1,00
11) Tensão de ruptura do sistema de fundação, σ_r	σ_r = 1368,4 kN/m² σ_{adm} = 456,1 kN/m²	$\sigma_{r,novo}$ = 1368,4 kN/m² $\sigma_{adm,novo}$ = 456,1 kN/m²	Ruptura: Geral c = 20,0 kN/m²
12) Determinação das excentricidades - ex e ey:	ex = 0,00 m	ey = 0,00 m	
13) Correção da área efetiva da Sapata em contato com Solo - $A_{s,efetiva}$	B' = 1,72 m L' = 1,72 m	Área efetiva = 2,94 m²	
14) Cálculo da tensão efetiva na Sapata:	σ_{ef} = 331,2 kN/m²		
15) Critério de balanços iguais para Sapata:	Largura da Sapata - Comprimento da Sapata = 0,00 m		
	Larg. Pilar - Comp. Pilar = 0,00 m		
	ATENDE A ESSE CRITÉRIO = ATENDE		
16) Cálculo das tensões nos bordos da Sapata	Núcleo Central de inércia = 0,00 m		
a) Excentricidade em uma direção	Largura Sapata / 6 = 0,29 m		
	ATENDE A ESSE CRITÉRIO = ATENDE		
	Formato da Sapata: Quadrada		
	BORDO 1 = 331,2 kN/m² BORDO 2 = 331,2 kN/m² BORDO 3 = 331,2 kN/m² BORDO 4 = 331,2 kN/m²		
	Máximo = 331,2 kN/m² Mínimo = 331,2 kN/m² Média = 331,2 kN/m² Máxima Limite = 324,6 kN/m²		
17) Cálculo do recalque do solo abaixo da cota de assentamento da sapata	Modelo Sapata Utilizada = Quadrada		
	Máxima Profundidade Z abaixo da Sapata = 5,43 m		
	Profundidade, z_{max} = 2,86 m		
	Tensão Vertical Máxima na cota, z_{max} = 54,3 kN/m²		
	Índice de deformação específica máxima, z_{max} = 0,7324		
	Recalque Limite, p_{limite} = 0,015 m		
	Recalque Calculado, p = 0,014 m		
	Atende a esse critério = ATENDE		
			
	VER TABELA CÁLCULOS		
18) Cálculo Estrutural da Sapata - Métodos de Bielas	Cálculo da altura útil da sapata, d_u : d_u = 0,35 m		
	Cálculo da altura da base da sapata, h_0 : h_0 = 0,25 m		
	$d \geq \frac{a - a_0}{4} = \frac{0,35}{4} = 0,0875 \text{ m}$ $d \geq \frac{b - b_0}{4} = \frac{0,35}{4} = 0,0875 \text{ m}$ em que $\sigma_s = 0,85 \frac{f_c}{1,06} = 0,14$ m		
	Cálculo das trações nas direções x(Bs) e na direção y(Ls)		
	$T_x = \frac{P(a - a_0)}{8d} = 487,50 \text{ kN}$ $T_y = \frac{P(b - b_0)}{8d} = 487,50 \text{ kN}$		
	Cálculo das armações nas duas direções:		
	$A_{sx} = \frac{1,61 T_x}{f_{yk}} = 15,70 \text{ cm}^2$ $A_{sy} = \frac{1,61 T_y}{f_{yk}} = 15,70 \text{ cm}^2$		
	Número de barras Direção X: N. barras X = 13 barras		
	Número de barras Direção Y: N. barras Y = 13 barras		
	Espaçamento na direção X: Espaçamento em X = 13,00 cm		
	Espaçamento na Direção Y: Espaçamento em Y = 13,00 cm		
	Comprimento da Barra na direção X: Comprimento em X = 204,00 m		
	Comprimento da Barra na Direção Y: Comprimento em Y = 204,00 m		
	Comprimento da dobra = 20 cm		

Figura 29 – Memorial de cálculo S02 – Via Terzaghi

MEMORIAL DE CÁLCULOS

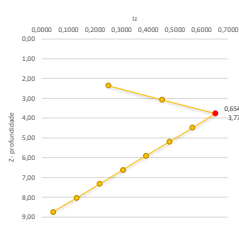
Cálculos		
1) Influência do Lençol Freático		
Sem influência do L.F.		
Lençol Freático - Dw = 100,00 m	Profundidade Sapata - D = 2,00 m	
Peso Específico da água - $\gamma_{\text{ág}} = 10,00 \text{ kN/m}^3$	Peso Específico - $\gamma_{\text{s, novo}} = 19,00 \text{ kN/m}^3$	
2) Cálculo dos fatores de capacidade de carga:		
$N_c = 23,36$	$N_q = 11,4$	$N_g = 7,08$
3) Coeficientes de forma da sapata		
$S_c = 1,10$	$S_q = 1,00$	$S_\gamma = 0,90$
4) Tensão exercida pelo solo na base da Sapata, q		
$q = 38,0 \text{ kN/m}^2$		
5) Tensão de ruptura do sistema de fundação, σ_r		
$\sigma_r = 1090,4 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_{r\text{adm}} = 363,5 \text{ kN/m}^2$	Ruptura: Geral $c = 20,0 \text{ kN/m}^2$	
6) Determinação das excentricidades - e_x e e_y :		
$e_x = 0,04 \text{ m}$	$e_y = 0,07 \text{ m}$	
7) Correção da área efetiva da Sapata em contato com Solo - $A_{\text{e, efetiva}}$		
$B' = 2,29 \text{ m}$ $L' = 2,59 \text{ m}$	$A_{\text{e, efetiva}} = 5,94 \text{ m}^2$	
8) Cálculo da tensão efetiva na Sapata:		
$\sigma_{\text{ref}} = 227,2 \text{ kN/m}^2$		
9) Critério de balanços iguais para Sapata:		
Largura da Sapata - Comprimento da Sapata = 0,30 m		Larg. Pilar - Comp. Pilar = 0,30 m
ATENDE A ESSE CRITÉRIO = ATENDE		
10) Cálculo das tensões nos bordos da sapata		
a) Excentricidade em uma direção		
Núcleo Central de inércia: 0,04 m		Largura Sapata / 6 = 0,39 m
ATENDE A ESSE CRITÉRIO = ATENDE		
Formato da Sapata: Retangular		Área real da sapata: 6,48 m ²
BORDO 1 = 194,0 kN/m ² BORDO 2 = 261,5 kN/m ² BORDO 3 = 222,4 kN/m ² BORDO 4 = 154,9 kN/m ² Máximo = 261,5 kN/m ² Mínimo = 154,9 kN/m ² Média = 208,2 kN/m ² Máxima Limite = 418,0 kN/m ²		
11) Cálculo do recalque do solo abaixo da cota de assentamento da sapata		
Modelo Sapata Utilizada = Retangular		
Máxima Profundidade Z abaixo da Sapata = 9,10 m		
Profundidade, $l_{\text{max}} = 3,77 \text{ m}$		
Tensão Vertical Máxima na cota, $l_{\text{max}} = 71,7 \text{ kN/m}^2$		
Índice de deformação específica máxima, $l_{\text{max}} = 0,6540$		
Recalque Limite, $p_{\text{limite}} = 0,015 \text{ m}$		
Recalque Calculado, $p = 0,015 \text{ m}$		
Atende a esse critério = ATENDE		
		
VER TABELA CÁLCULOS		
12) Cálculo Estrutural da Sapata - Método de Bielas		
$\left\{ \begin{array}{l} \frac{a - a_0}{4} = 0,54 \text{ m} \\ \frac{b - b_0}{4} = 0,52 \text{ m} \\ 1,44 \sqrt{\frac{P}{\sigma_s}} \text{ em que } \sigma_s = 0,88 \frac{f_d}{1,36} = 0,51 \text{ m} \end{array} \right.$		
Cálculo da altura útil da sapata, du:		
		du = 0,60 m
Cálculo da altura da base da sapata, h0:		
		h0 = 0,25 m
Cálculo das trações nas direções x(Bx) e na direção y(Ly):		
$T_x = \frac{P(a - a_0)}{8d} = 581,13 \text{ kN}$		
$T_y = \frac{P(b - b_0)}{8d} = 601,96 \text{ kN}$		
Cálculo das armaduras nas duas direções:		
$A_{sx} = \frac{1,61T_x}{f_{yk}} \quad A_{sx} = 18,71 \text{ cm}^2$		
$A_{sy} = \frac{1,61T_y}{f_{yk}} \quad A_{sy} = 19,38 \text{ cm}^2$		
Número de barras Direção X:		
N. barras X = 15 barras		
Espaçamento na Direção X:		
Espaçamento em X = 18,00 cm		
Comprimento da Barra na direção X:		
Comprimento em X = 269,00 m		
Comprimento da dobra		
Cobrimento de = 21,00 cm		
Número de barras Direção Y:		
N. barras Y = 16 barras		
Espaçamento na Direção Y:		
Espaçamento em Y = 14,00 cm		
Comprimento da Barra na direção Y:		
Comprimento em Y = 306,00 m		

Figura 30 – Memorial de cálculo sapata 02 – Via Vesic

MEMORIAL DE CÁLCULOS	Cálculos		
	Sem influência do L.F.		
1) Influência do Lençol Freático	Lençol Freático - Dw = 100,00 m	Profundidade Sapata - D = 2,00 m	
	Peso Específico da água - $\gamma_{água}$ = 10,00 kN/m ³	Peso Específico - $\gamma_{s, novo}$ = 19,00 kN/m ³	
2) Cálculo dos fatores de capacidade de carga	Nc = 19,32	Nq = 9,60	Ng = 9,44
3) Coeficientes de forma da sapata	Sc = 1,43	Sq = 1,38	S _y = 0,65
4) Cálculo dos fatores de profundidade	k = 0,85 dc = 1,34	dq = 1,26	d _y = 1,00
5) Cálculo do coeficiente m:	mb = 1,54 ml = 1,46		
6) Cálculo da componente horizontal:	H = 0,00 kN		
7) Fatores de correção de inclinação:	lc = 1,00	lq = 1,00	ly = 1,00
8) Tensão exercida pelo solo na base da Sapata, q	q = 38,00 kN/m ²		
9) Fator de inclinação do terreno	gc = 1,00	gq = 1,00	gy = 1,00
10) Fator de inclinação de base	bc = 1,00	bq = 1,00	by = 1,00
11) Tensão de ruptura do sistema de fundação, σ_r	$\sigma_r = 1517,1 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_{adm} = 505,7 \text{ kN/m}^2$	$\sigma_{r, novo} = 1512,7 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_{adm, novo} = 504,2 \text{ kN/m}^2$	Ruptura: Geral c = 20,0 kN/m ²
12) Determinação das excentricidades - ex e ey:	ex = 0,04 m	ey = 0,07 m	
13) Correção da área efetiva da Sapata em contato com Solo - $A_{s, efetiva}$	B' = 2,29 m L' = 2,59 m	$A_{efetiva} = 5,94 \text{ m}^2$	
14) Cálculo da tensão efetiva na Sapata:	$\sigma_{ref} = 227,2 \text{ kN/m}^2$		
15) Critério de balanços iguais para Sapata:	Largura da Sapata - Comprimento da Sapata = 0,30 m	Larg. Pilar - Comp. Pilar = 0,30 m	
	ATENDE A ESSE CRITÉRIO = ATENDE		
16) Cálculo das tensões nos bordos da Sapata			
a) Excentricidade em uma direção			
	Núcleo Central de inércia = 0,04 m		
	Largura Sapata / 6 = 0,46 m		
	ATENDE A ESSE CRITÉRIO = ATENDE		
	Área real da Sapata = 6,48 m ²		
	Formato da Sapata: Retangular		
	BORDO 1 = 194,0 kN/m ²		
	BORDO 2 = 261,5 kN/m ²		
	BORDO 3 = 222,4 kN/m ²		
	BORDO 4 = 154,9 kN/m ²		
	Máximo = 261,5 kN/m ²		
	Mínimo = 154,9 kN/m ²		
	Média = 208,2 kN/m ²		
	Máxima Limite = 381,5 kN/m ²		
17) Cálculo do recalque do solo abaixo da cota de assentamento da sapata			
Modelo Sapata Utilizada = Retangular			
Máxima Profundidade Z abaixo da Sapata = 9,10 m			
Profundidade, lzmax = 3,77 m			
Tensão Vertical Máxima na cota, lzmax = 71,7 kN/m ²			
Índice de deformação específica máxima, lzmax = 0,6540			
Recalque Limite, p _{limite} = 0,015 m			
Recalque Calculado, p = 0,015 m			
Atende a esse critério = ATENDE			
18) Cálculo Estrutural da Sapata - Métodos de Bielas			
	Cálculo da altura útil da sapata, du:		
	du = 0,54 m		
	Cálculo da altura da base da sapata, h0:		
	h0 = 0,25 m		
	Cálculo das trações nas direções x(Bx) e na direção y(Ly)		
	Cálculo das armações nas duas direções:		
	Número de barras Direção X:		
	N. barras X = 17 barras		
	Número de barras Direção Y:		
	N. barras Y = 18 barras		
	Comprimento da Barra na Direção X:		
	Comprimento em X = 269,00 m		
	Comprimento da Barra na Direção Y:		
	Comprimento em Y = 306,00 m		
	Comprimento da dobra = 20 cm		

Figura 31 – Resumo dimensionamento S01 – Via Terzaghi

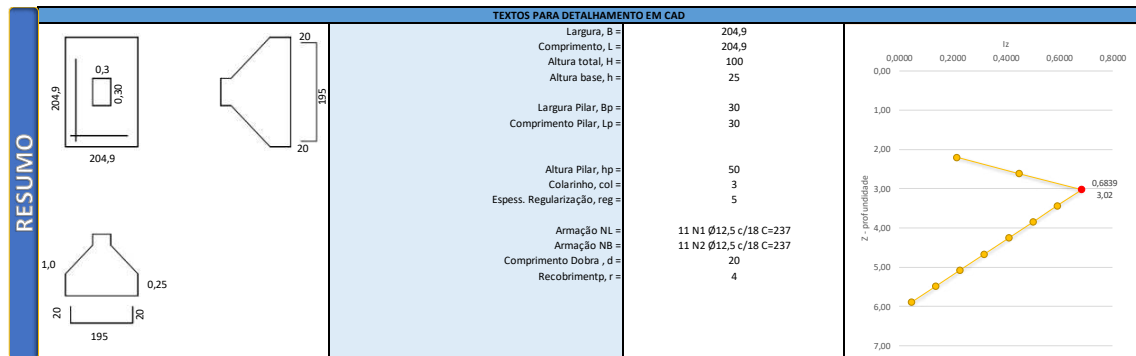


Figura 32 – Resumo Dimensionamento S01 – Via Vesic

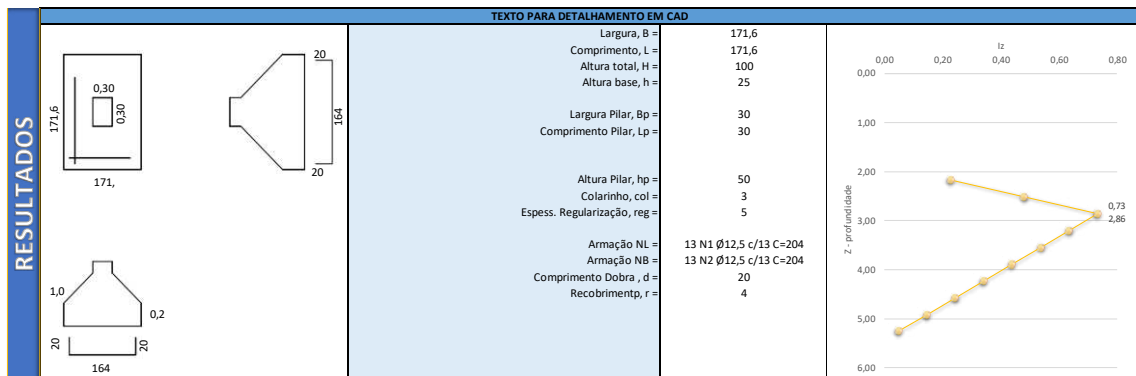


Figura 33 – Resumo Dimensionamento S02 – Via Terzaghi

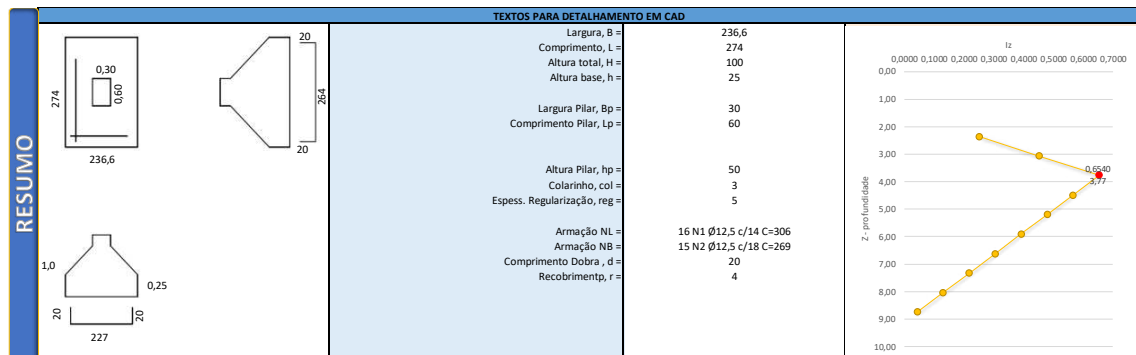
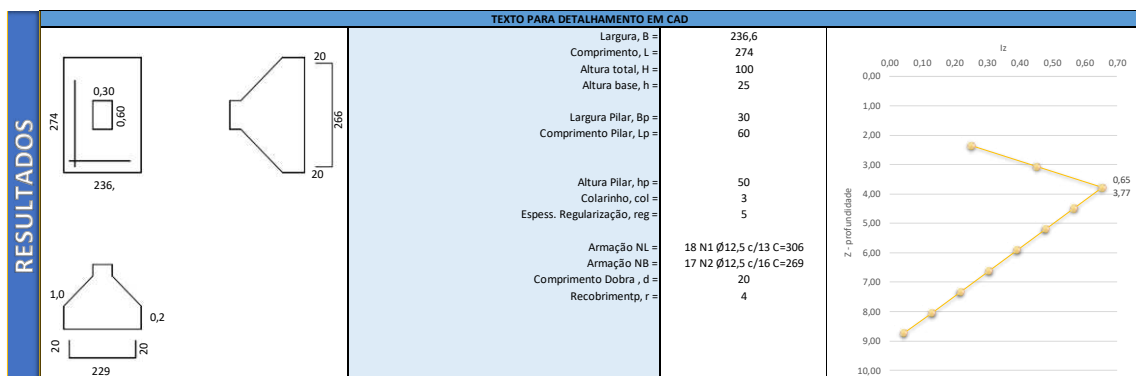


Figura 34 – Resumo Dimensionamento S02 – Via Vesic



APÊNDICE B

TABELAS

Tabela 10 – Área de aço

Diâmetro (mm)	Número de barras									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4,2	0,14	0,28	0,42	0,56	0,70	0,84	0,98	1,12	1,26	1,40
5,0	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
6,3	0,32	0,63	0,95	1,26	1,58	1,89	2,21	2,52	2,84	3,15
8,0	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
10,0	0,80	1,60	2,40	3,20	4,00	4,80	5,60	6,40	7,20	8,00
12,5	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	10,00	11,25	12,50
16,0	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00
20,0	3,15	6,30	9,45	12,60	15,75	18,90	22,05	25,20	28,35	31,50
22,0	3,80	7,60	11,40	15,20	19,00	22,80	26,60	30,40	34,20	38,00
25,0	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
32,0	8,00	16,00	24,00	32,00	40,00	48,00	56,00	64,00	72,00	80,00
40,0	12,56	25,12	37,68	50,24	62,80	75,36	87,92	100,48	113,04	125,60

Fonte: Adaptado, (BASTOS, 2019).

Tabela 11 – Cálculos recalque via Schmertmann S01 – via Terzaghi

CAMADA	Dz	COTA Z (m)	Z*	Iz - Quadrada	Es,i (kN/m²)	ssap,med (kN/m²)	sv,o (kN/m²)	Ds (kN/m²)	C1	C2	$\frac{I_z \cdot \Delta_z}{E_{s_i}}$	Recalque (m)
1	0,409	2,20	0,204	0,217	25000	232,33	38,00	194,33	0,9022	1	3,553E-06	0,00062
2	0,409	2,61	0,614	0,450	25000	232,33	38,00	194,33	0,9022	1	7,380E-06	0,00129
3	0,409	3,02	1,024	0,684	25000	232,33	38,00	194,33	0,9022	1	1,121E-05	0,00197
4	0,409	3,43	1,434	0,593	25000	232,33	38,00	194,33	0,9022	1	9,714E-06	0,00170
5	0,409	3,84	1,843	0,502	25000	232,33	38,00	194,33	0,9022	1	8,219E-06	0,00144
6	0,409	4,25	2,253	0,410	25000	232,33	38,00	194,33	0,9022	1	6,725E-06	0,00118
7	0,409	4,66	2,663	0,319	25000	232,33	38,00	194,33	0,9022	1	5,230E-06	0,00092
8	0,409	5,07	3,072	0,228	25000	232,33	38,00	194,33	0,9022	1	3,736E-06	0,00066
9	0,409	5,48	3,482	0,137	25000	232,33	38,00	194,33	0,9022	1	2,242E-06	0,00039
10	0,409	5,89	3,892	0,046	25000	232,33	38,00	194,33	0,9022	1	7,472E-07	0,00013
Recalque r: 0,010 m												

Fonte: Autoral (2022).

Tabela 12 – Cálculos recalque via Schmertmann S01 – via Vesic

CAMADA	Dz	COTA Z (m)	Z*	Iz - Quadrada	Es,i (kN/m²)	ssap,med (kN/m²)	sv,o (kN/m²)	Ds (kN/m²)	C1	C2	$\frac{I_z \cdot \Delta_z}{E_{s_i}}$	Recalque (m)
1	0,343	2,17	0,1716	0,226	25000	331,22	38,00	293,22	0,9352	1	3,109E-06	0,00085
2	0,343	2,51	0,5147	0,479	25000	331,22	38,00	293,22	0,9352	1	6,580E-06	0,00180
3	0,343	2,86	0,8579	0,732	25000	331,22	38,00	293,22	0,9352	1	1,005E-05	0,00276
4	0,343	3,20	1,201	0,635	25000	331,22	38,00	293,22	0,9352	1	8,712E-06	0,00239
5	0,343	3,54	1,5441	0,537	25000	331,22	38,00	293,22	0,9352	1	7,372E-06	0,00202
6	0,343	3,89	1,8873	0,439	25000	331,22	38,00	293,22	0,9352	1	6,031E-06	0,00165
7	0,343	4,23	2,2304	0,342	25000	331,22	38,00	293,22	0,9352	1	4,691E-06	0,00129
8	0,343	4,57	2,5736	0,244	25000	331,22	38,00	293,22	0,9352	1	3,351E-06	0,00092
9	0,343	4,92	2,9167	0,146	25000	331,22	38,00	293,22	0,9352	1	2,010E-06	0,00055
10	0,343	5,26	3,2599	0,049	25000	331,22	38,00	293,22	0,9352	1	6,702E-07	0,00018
Recalque r:												0,014 m

Fonte: Autoral (2022).

Tabela 13 – Cálculos recalque via Schmertmann S02 – Via Terzaghi

[illegible]

Tabela 14 – Cálculos recalque via Schmertmann S02 – Via Vesic

CAMADA	Dz	COTA Z (m)	Z*	Iz - Retangular	Es,i (kN/m²)	ssap.med (kN/m²)	sv,o (kN/m²)	Ds (kN/m²)	C1	C2	$\frac{I_z \cdot \Delta_z}{E_s}$	Recalque (m)
1	0,70987	2,35	0,3549	0,251	25000	208,20	38,00	170,20	0,8884	1	7,122E-06	0,00108
2	0,70987	3,06	1,0648	0,452	25000	208,20	38,00	170,20	0,8884	1	1,285E-05	0,00194
3	0,70987	3,77	1,7747	0,654	25000	208,20	38,00	170,20	0,8884	1	1,857E-05	0,00281
4	0,70987	4,48	2,4845	0,567	25000	208,20	38,00	170,20	0,8884	1	1,610E-05	0,00243
5	0,70987	5,19	3,1944	0,480	25000	208,20	38,00	170,20	0,8884	1	1,362E-05	0,00206
6	0,70987	5,90	3,9043	0,392	25000	208,20	38,00	170,20	0,8884	1	1,114E-05	0,00168
7	0,70987	6,61	4,6142	0,305	25000	208,20	38,00	170,20	0,8884	1	8,667E-06	0,00131
8	0,70987	7,32	5,3240	0,218	25000	208,20	38,00	170,20	0,8884	1	6,191E-06	0,00094
9	0,70987	8,03	6,0339	0,131	25000	208,20	38,00	170,20	0,8884	1	3,714E-06	0,00056
10	0,70987	8,74	6,7438	0,044	25000	208,20	38,00	170,20	0,8884	1	1,238E-06	0,00019
											Recalque r:	0,015 m

APÊNDICE C

GRÁFICOS

Gráfico 3 – Recalque via Schmertmann para S01 – Via Terzaghi

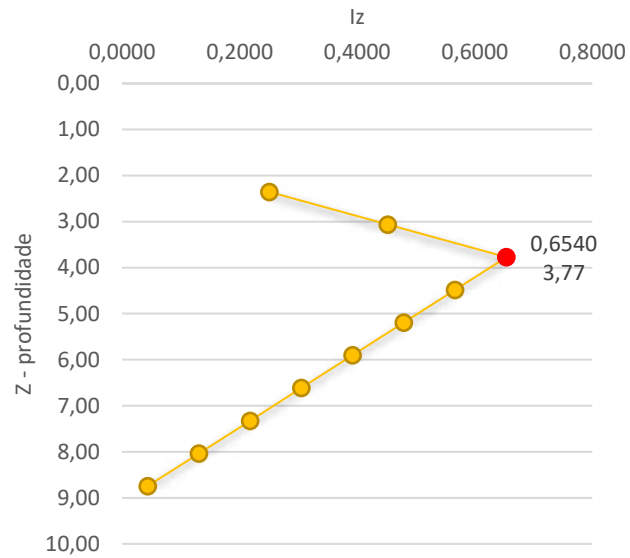


Gráfico 4 – Recalque via Schmertmann para S01 – Via Vesic

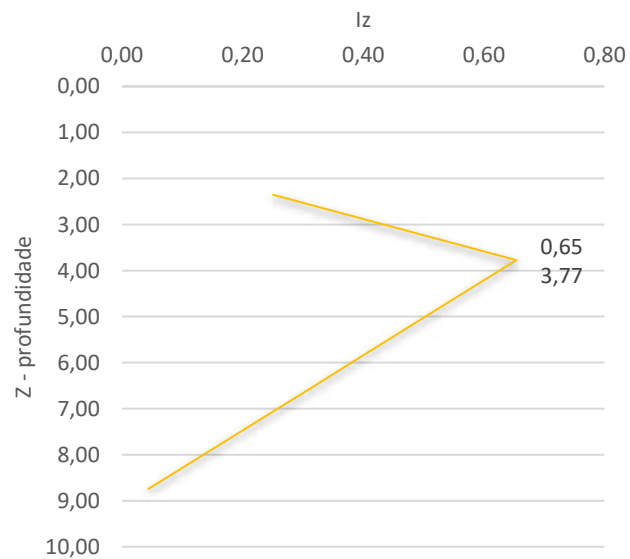


Gráfico 5 – Recalque via Schmertmann para S02 – Via Terzaghi

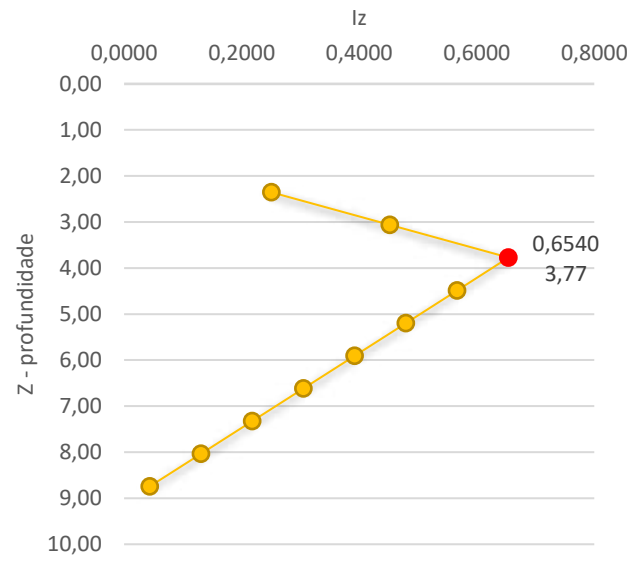
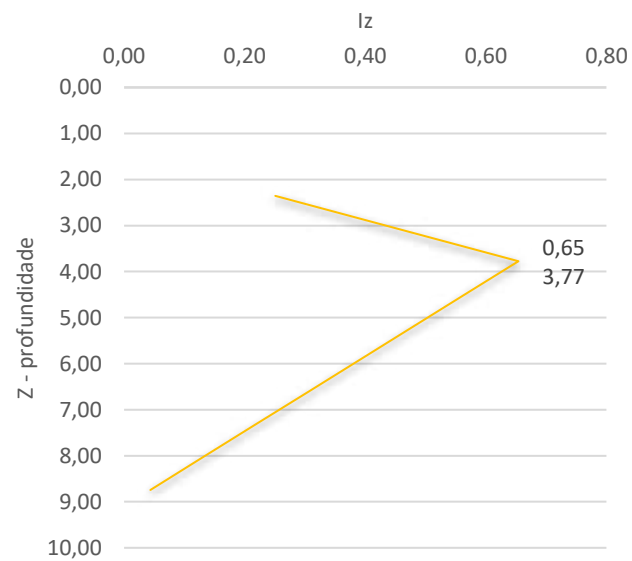
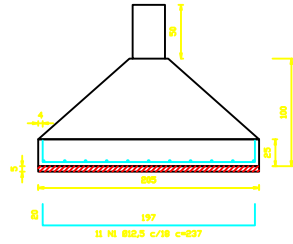
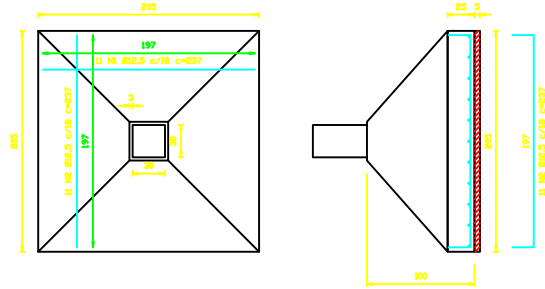


Gráfico 6 – Recalque via Schmertmann para S02 – Via Vesic



S01 - TERZAGHI

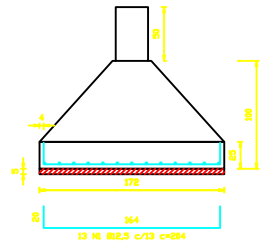
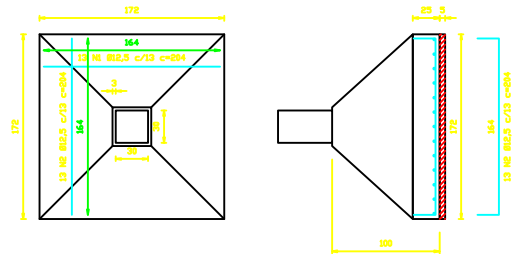
0205/205/100/250 Esc 1:63



Posição	Repetição	Bitola (mm)	Esp. (cm)	Compr. (cm)	L. total (m)	Peso (kg) + 10% (Vol (m³))
1	11	12,5	18	237	26,07	29,7
2	11	12,5	18	237	26,07	29,7
Total =					52,14	59,4

S01 - VESIC

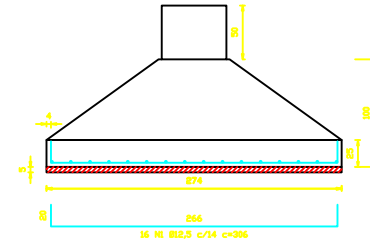
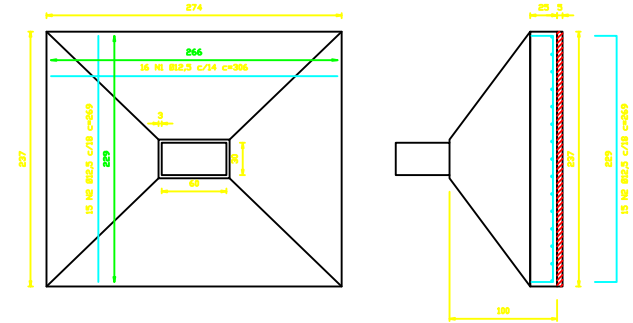
0171,6/171,6/100/250 Esc 1:63



Posição	Repetição	Bitola (mm)	Esp. (cm)	Compr. (cm)	L. total (m)	Peso (kg) + 10% (Vol (m³))
1	13	12,5	13	204	26,52	29,2
2	13	12,5	13	204	26,52	29,2
Total =					53,04	58,4

S02 - TERZAGHI

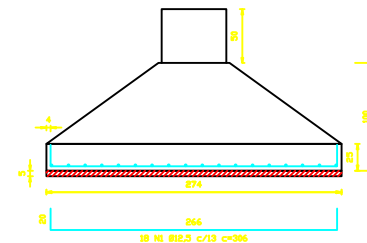
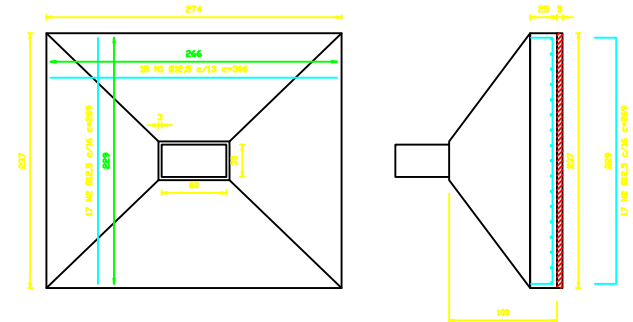
0236,6/274/100/250 Esc 1:63



Posição	Repetição	Bitola (mm)	Esp. (cm)	Compr. (cm)	L. total (m)	Peso (kg) + 10% (Vol (m³))
1	16	12,5	14	306	48,96	53,9
2	16	12,5	14	306	48,96	53,9
Total =					97,92	107,8

S02 - VESIC

0236,6/274/100/250 Esc 1:63



Posição	Repetição	Bitola (mm)	Esp. (cm)	Compr. (cm)	L. total (m)	Peso (kg) + 10% (Vol (m³))
1	18	12,5	13	306	55,08	60,6
2	18	12,5	13	306	55,08	60,6
Total =					110,16	121,2