



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DIMENSIONAMENTO DE FUNDAÇÕES DIRETAS EM SAPATAS:
DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE**

FERNANDA BARBOSA ALEXANDRE

João Pessoa - PB
2018

FERNANDA BARBOSA ALEXANDRE

**DIMENSIONAMENTO DE FUNDAÇÕES DIRETAS EM SAPATAS:
DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal da Paraíba, como requisito
parcial para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lopes Soares

João Pessoa - PB
2018

A381d Alexandre, Fernanda Barbosa

Dimensionamento de fundações diretas em sapatas: Desenvolvimento de software / Fernanda Barbosa Alexandre. – João Pessoa, 2018.

69f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lopes Soares.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Software 2. Visual Basic 3. Fundações superficiais 4. Algoritmo computacional 5. Recalques I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 624(043.2)

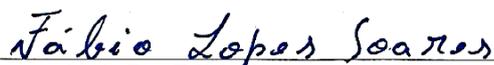
FERNANDA BARBOSA ALEXANDRE

**DIMENSIONAMENTO DE FUNDAÇÕES DIRETAS EM SAPATAS:
DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE**

Trabalho apresentado à Universidade Federal da Paraíba – UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Julgada em 15 de Junho de 2018.

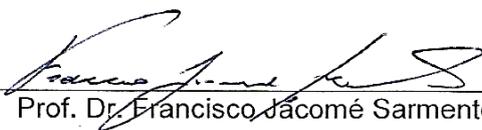
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fábio Lopes Soares, UFPB

APROVADA

Situação



Prof. Dr. Francisco Jacomé Sarmiento, UFPB

APROVADA.

Situação



Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira, UFPB

APROVADA

Situação



Prof.^a Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil da UFPB

Dedico esta obra à minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida, sempre acreditando e investindo em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, que me deu forças para concluir este trabalho com muita esperança e determinação.

Aos meus pais, Maria Lucí e José Roberto, que sempre me apoiaram e respeitaram minhas decisões, sempre incentivando meus estudos.

Ao meu irmão, João Elias, por acreditar em mim e sempre me motivar a continuar lutando pelos meus sonhos com fé e humildade.

Ao professor orientador deste trabalho, Fábio Lopes, pela disponibilidade em me orientar, por sua competência, paciência e todo o conhecimento que me passou ao longo da graduação.

Ao professor Francisco Jacomé, pelos ensinamentos de programação na linguagem Visual Basic e paciência em esclarecer as dúvidas que surgiam no desenvolver deste trabalho. E ao professor Enildo Tales, por aceitar o convite em participar da banca examinadora.

Ao professor Clóvis Dias, por ter me orientado no estágio supervisionando, pelos ensinamentos, honestidade e bom humor. E a todos os demais professores que também contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Ao Eng^o Hamilton Polete e Mestre de obras Arlindo, pela confiança, ensinamentos e oportunidade do estágio supervisionado na obra do Banco Safra.

Minha melhor amiga, Gianna Simões, por todos os seus conselhos, honestidade e paciência comigo.

Agradeço também aos demais amigos e colegas pelos momentos de descontração, conselhos e estarem comigo nos momentos bons e difíceis. Em especial à Aron Silva, Carla Ferreira, Diego Marcos, Debora Caroline, Emily Coeli, Gracielle Ferreira, Gracielly Santos, Kennedy Bezerra, Max Bruno, Raelson Farias, Rafael Pestana, Rauan Trigueiro e Wesley Vítor.

RESUMO

Devido à grande variação na sua composição, os solos são considerados elementos complexos e isso pode trazer dificuldades na elaboração de um projeto geotécnico de fundação. Este trabalho tem como objetivo mostrar que apesar dessas dificuldades é possível automatizar o dimensionamento de fundações por sapatas através do desenvolvimento de um software na linguagem Visual Basic, buscando despertar os engenheiros e a comunidade técnica em geral da importância em se melhorar a qualidade técnica e automação dos projetos geotécnicos que tratem de fundações superficiais. A metodologia adotada baseia-se em pesquisas bibliográficas referente ao tema, para adquirir o embasamento teórico necessário no desenvolvimento da rotina de cálculo do programa. No algoritmo computacional do mesmo, para o cálculo da tensão admissível do solo foi utilizado um método semi-empírico que relaciona o resultado do ensaio SPT com essa tensão. Depois de dimensionadas as sapatas, na estimativa de recalques, foram utilizados os métodos da Teoria da elasticidade e Schmertmann (1978) e por fim, foi possível proceder ao cálculo do quantitativo e orçamento dessas sapatas. Posteriormente, o software foi utilizado em uma aplicação prática para que os resultados fornecidos fossem analisados e discutidos. Esses resultados mostraram que é bastante significativa a diferença dos valores de recalques entre os dois métodos, fato esse que já era esperado, visto que, de acordo com a pesquisa bibliográfica, são utilizados em situações distintas e dependem das características dos solos.

Palavras-chave: Software; Visual Basic; Fundações superficiais; Algoritmo computacional; Recalques.

ABSTRACT

Due to the great variation in its composition, the soils are considered complex elements and this can cause difficulties in the elaboration of a geotechnical project of foundation. This work aims to show that even through these difficulties it is possible to automate the dimensioning of foundations by footing through the development of a software in the Visual Basic language, seeking to awaken the engineers and the technical community in general of the importance in improving the technical quality and automation geotechnical projects dealing with surface foundations. The methodology adopted is based on bibliographical research on the subject, in order to acquire the theoretical basis necessary for the development of the program's calculation routine. In the computational algorithm of the same, a semi-empirical method was used to calculate the permissible soil tension, which relates the result of the SPT test with this voltage. After the footing were dimensioned, the elasticity theory and Schmertmann (1978) methods were used, and finally, it was possible to calculate the quantitative and budget of these footings. Subsequently, the software was used in a practical application so that the results provided could be analyzed and discussed. These results showed that the difference between the two values is quite significant, a fact that was already expected, since, according to the bibliographical research, they are used in different situations and depend on the characteristics of the soils.

Keywords: Software; Visual Basic; Surface foundations; Computational algorithm; Recalques.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Ruptura Geral	16
Figura 2 – Exemplo de Ruptura por Puncionamento	17
Figura 3 – Variáveis necessárias na equação de Terzaghi (1943)	18
Figura 4 – Propagação de tensões segundo uma inclinação 1:2	22
Figura 5 – Segunda camada atingida pelo bulbo de tensões	22
Figura 6 – Sapata fictícia no topo da segunda camada	23
Figura 7 – Desenho de uma sapata genérica: a) Perspectiva; b) Planta; c) Corte ...	24
Figura 8 – Recalque diferencial entre dois elementos de fundação	26
Figura 9 – Limites para distorções angulares	27
Figura 10 – Execução de uma sapata	28
Figura 11 – Ícone do programa GeoDim 1.0	30
Figura 12 – Propagação do bulbo de tensões	32
Figura 13 – Procedimento para calcular a σ_{adm} do solo	33
Figura 14 – Comportamento Tensão x Deformação de um material linear não elástico	37
Figura 15 – Acréscimo de tensão em cada camada do “bulbo” de recalques	38
Figura 16 – Exemplo de divisão do perfil de sondagem em subcamadas, no diagrama I_z x profundidade	40
Figura 17 – Fator de influência na deformação vertical	42
Figura 18 – Dimensões de uma sapata	44
Figura 19 – Dimensões da escavação em planta	45
Figura 20 – Dimensões da escavação em corte, com inclinação 1:1 do talude	45
Figura 21 – Dimensões da escavação em corte, com inclinação 1:2 do talude	46
Figura 22 – Dimensões da escavação em corte, com inclinação 1:3 do talude	46
Figura 23 – Cálculo do volume de escavação através do volume de tronco de pirâmide	47
Figura 24 – Cálculo do volume de concreto magro	47
Figura 25 – Cálculo da área da fôrma	48
Figura 26 – Cálculo do volume de concreto da sapata circular através do volume do tronco de cone.....	49
Figura 27 – Cálculo do volume de reaterro.....	50

Figura 28 – Interface inicial do GeoDim 1.0.....	51
Figura 29 – Diagrama hierárquico de utilização do programa	52
Figura 30 – Planta de locação dos pilares.....	54
Figura 31 – Cálculo da tensão admissível do solo pelo GeoDim 1.0.....	56
Figura 32 – Dimensionamento das sapatas quadradas pelo GeoDim 1.0.....	57
Figura 33 – Dimensionamento das sapatas retangulares pelo GeoDim 1.0.....	57
Figura 34 – Dimensionamento das sapatas circulares pelo GeoDim 1.0	58
Figura 35 – Dados de entrada no cálculo de recalques pela Teoria da elasticidade	59
Figura 36 – Resultado do cálculo de recalques pela Teoria da elasticidade	59
Figura 37 – Dados de entrada no cálculo de recalques pelo método Schmertmann	60
Figura 38 – Resultado do cálculo de recalques pelo método Schmertmann	60
Figura 39 – Quantitativo e orçamento das sapatas quadradas pelo GeoDim 1.0.....	61
Figura 40 – Quantitativo e orçamento das sapatas retangulares pelo GeoDim 1.0..	61
Figura 41 – Quantitativo e orçamento das sapatas circulares pelo GeoDim 1.0	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de capacidade de carga.....	19
Tabela 2 – Fatores de forma.....	19
Tabela 3 – Preço unitário dos serviços para o Estado da Paraíba	29
Tabela 4 – Fator α de correlação.....	36
Tabela 5 – Coeficiente K de correlação.....	36
Tabela 6 – Perfil de sondagem antes e após o melhoramento do solo.....	53
Tabela 7 – Dimensões e carga máxima nos pilares	53
Tabela 8 – Preço unitário dos serviços	55
Tabela 9 – Outros dados de entrada	55
Tabela 10 – Resultado do dimensionamento das sapatas.....	63
Tabela 11 – Resultado do cálculo de recalques das sapatas	64
Tabela 12 – Dados de entrada com o coef. α modificado no cálculo de recalques pela Teoria da elasticidade	64
Tabela 13 – Cálculo de recalques das sapatas pela Teoria da elasticidade modificado	65
Tabela 14 – Resultado do quantitativo das sapatas	66
Tabela 15 – Resultado do orçamento das sapatas.....	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Modos de ruptura	16
2.2	Capacidade de carga.....	17
2.2.1	Teoria de Terzaghi	17
2.2.2	Solo estratificado.....	21
2.3	Dimensionamento de uma sapata isolada	24
2.4	Recalques	25
2.4.1	Recalque diferencial $\Delta\delta$ e distorção angular (ρ)	26
2.5	Orçamento das sapatas	27
2.5.1	Execução de uma sapata	27
2.5.2	Estimativa de custos.....	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	O programa	30
3.2	Dados de entrada	31
3.3	Algoritmo	31
3.3.1	Tensão admissível do solo	31
3.3.2	Dimensionamento de uma sapata isolada.....	34
3.3.3	Módulo de deformabilidade E_S	36
3.3.4	Cálculo de Recalques pela Teoria da Elasticidade.....	37
3.3.5	Cálculo de Recalques pelo Método Schmertmann (1978)	40
3.3.6	Quantitativo das sapatas	44
3.3.7	Orçamento das sapatas	50

4	APLICAÇÃO PRÁTICA DO PROGRAMA.....	51
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
	ANEXO A – Perfil de sondagem do terreno (SP 01).....	69

1 INTRODUÇÃO

É imprescindível observar que a especialização em Fundações é uma das áreas que requer maior vivência e experiência, sendo considerada uma das mais complexas na Engenharia Civil devido à grande variação da composição dos solos e o seu comportamento divergente mesmo em obras similares. Por esse motivo existem distintas soluções em um projeto geotécnico de fundação, umas mais complexas que outras a depender do tipo de solo que estará apoiada a fundação, devendo obrigatoriamente suportar as cargas da superestrutura com segurança e apresentar deformações admissíveis para a obra.

Partindo dessa explanação, este trabalho levanta o seguinte problema: seria possível algo complexo como um projeto de fundação ser automatizado através de programação computacional? Além disso, também indaga à validade de uma das teorias da capacidade de carga, variável fundamental em qualquer projeto de fundação.

Com base nesse questionamento, este trabalho busca otimizar o dimensionamento de fundações diretas através de sapatas com o uso de programação na linguagem Visual Basic.

1.1 Justificativa

Esta pesquisa justifica-se pela necessidade de automatização nos projetos geotécnicos de fundação, a fim de auxiliar os profissionais dessa área na elaboração de um projeto seguro, respeitando os estados-limites últimos (ruptura) e de serviço (recalques).

1.2 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo:

- Realizar uma revisão bibliográfica;
- Automatizar o dimensionamento de fundações por sapatas através do desenvolvimento de um software;
- Apresentar uma aplicação prática utilizando o software e analisar os resultados obtidos pelo programa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo de revisão bibliográfica será visto alguns dos métodos de dimensionamento utilizados em um projeto geotécnico de fundação. Inicialmente, será discutido de forma sucinta os modos de ruptura que um solo pode sofrer e a teoria da capacidade de carga proposta por Terzaghi (1943), assim como é questionado à validade da mesma.

Em seguida, a revisão trata de descrever o procedimento necessário no dimensionamento das sapatas e fala sobre o cálculo de recalques, que é a variável mais importante quando o engenheiro tem como objetivo elaborar um projeto de fundação seguro. Além disso, também discute o que é necessário para obter o orçamento dessas sapatas.

2.1 Modos de ruptura

Para a determinação da capacidade de carga, é preciso entender os modos de ruptura aos quais o solo pode estar sujeito. São eles:

- a) ruptura geral, a qual ocorre nos solos mais resistentes (menos deformáveis), com sapatas suficientemente rasas. A ruptura é imediata, levando ao tombamento da sapata e por isso é designada como um modo de ruptura frágil. Além disso, a carga de ruptura é atingida para pequenos valores de recalque (Ver Figura 1);

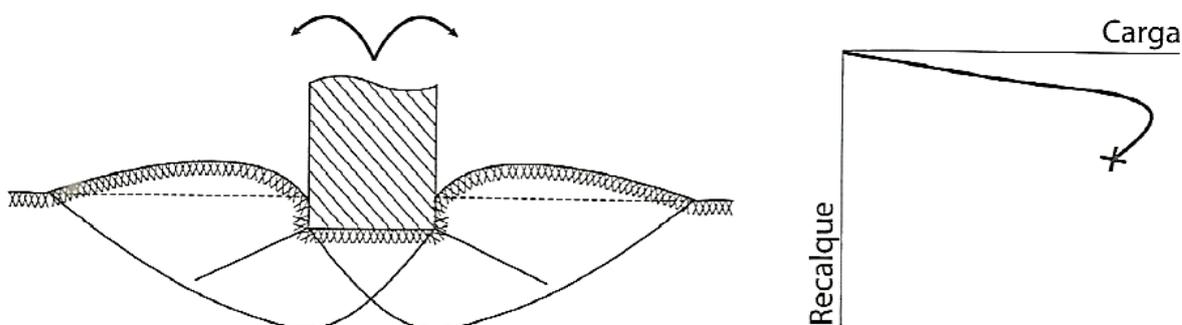


Figura 1 – Exemplo de Ruptura Geral
Fonte: Cintra et al., 2011.

- b) ruptura por punção, a qual ocorre nos solos menos resistentes (mais deformáveis). Em vez do tombamento, temos a penetração cada vez maior da

sapata e por isso é designada como um modo de ruptura dúctil. Além disso, segundo Cintra et al. (2011) a carga de ruptura é atingida para recalques mais elevados e, para esse valor de carga, os recalques passam a ser incessantes, podendo haver necessidade de acréscimo contínuo na carga para manter a evolução dos recalques da sapata (Ver Figura 2);

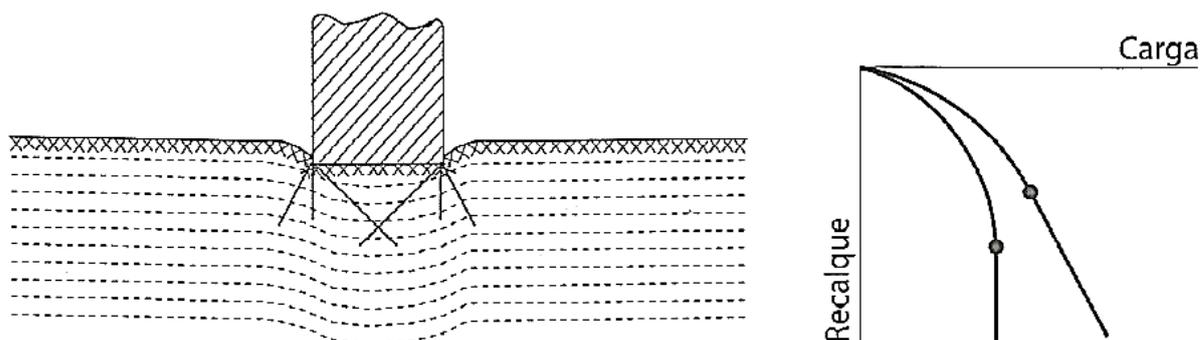


Figura 2 – Exemplo de Ruptura por Puncionamento
Fonte: Cintra et al., 2011.

- c) ruptura local, que é um caso intermediário dos modos de ruptura geral e por puncionamento.

2.2 Capacidade de carga

A capacidade de carga de um elemento de fundação pode ser definida como a resistência máxima do sistema sapata-solo na iminência da sua ruptura.

2.2.1 Teoria de Terzaghi

Em sua teoria, desenvolvida em 1943, Terzaghi considera três hipóteses básicas. São elas:

- trata-se de uma sapata corrida, simplificando o problema para um caso bidimensional;
- a profundidade de embutimento da sapata (h) é inferior a largura da sapata (B), ou seja, $h \leq B$. Isso permite desprezar a resistência ao cisalhamento da camada de solo situada acima da cota de apoio da sapata;

c) o maciço de solo sob a base da sapata é rígido, caracterizando o caso de ruptura geral.

A Figura 3 mostra algumas das variáveis necessárias na Equação (1) de Terzaghi (1943).

- Ruptura geral

$$\sigma_r = (c \times N_c \times S_c) + (\gamma_1 \times h \times N_q \times S_q) + \frac{1}{2} \times \gamma_2 \times B \times N_\gamma \times S_\gamma \quad (1)$$

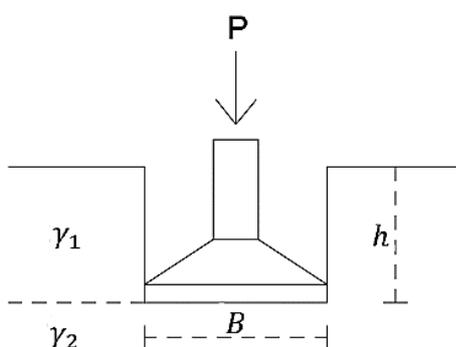


Figura 3 – Variáveis necessárias na equação de Terzaghi (1943)
Fonte: Autoria própria, 2018.

Em que:

σ_r = capacidade de carga da fundação (tf/m²);

N_c, N_q, N_γ = fatores de capacidade de carga (Tabela 1);

S_c, S_q, S_γ = fatores de capacidade de forma (Tabela 2);

c = coesão do solo (tf/m²);

ϕ = ângulo de atrito interno do solo (°);

γ_1 = peso específico do solo acima da base da sapata (tf/m³);

γ_2 = peso específico do solo abaixo da base da sapata (tf/m³);

h = embutimento da sapata (m);

B = menor dimensão da sapata, ou diâmetro D_s no caso de sapata circular (m).

Tabela 1 – Fatores de capacidade de carga

ϕ°	N_c	N_q	N_γ	N_q/N_c	$\tan \phi$	ϕ°	N_c	N_q	N_γ	N_q/N_c	$\tan \phi$
0	5,14	1	0	0,2	0	26	22,25	11,85	12,54	0,53	0,49
1	5,38	1,09	0,07	0,2	0,02	27	23,94	13,2	14,47	0,55	0,51
2	5,63	1,2	0,15	0,21	0,03	28	25,8	14,72	16,72	0,57	0,53
3	5,9	1,31	0,24	0,22	0,05	29	27,86	16,44	19,34	0,59	0,55
4	6,19	1,43	0,34	0,23	0,07	30	30,14	18,4	22,4	0,61	0,58
5	6,49	1,57	0,45	0,24	0,09	31	32,67	20,63	25,99	0,63	0,6
6	6,81	1,72	0,57	0,25	0,11	32	35,49	23,18	30,22	0,65	0,62
7	7,16	1,88	0,71	0,26	0,12	33	38,64	26,09	35,19	0,68	0,65
8	7,53	2,06	0,86	0,27	0,14	34	42,16	29,44	41,06	0,7	0,67
9	7,92	2,25	1,03	0,28	0,16	35	46,12	33,3	48,03	0,72	0,7
10	8,35	2,47	1,22	0,3	0,18	36	50,59	37,75	56,31	0,75	0,73
11	8,8	2,71	1,44	0,31	0,19	37	55,63	42,92	66,19	0,77	0,75
12	9,28	2,97	1,69	0,32	0,21	38	61,35	48,93	78,03	0,8	0,78
13	9,81	3,26	1,97	0,33	0,23	39	67,87	55,96	92,25	0,82	0,81
14	10,37	3,59	2,29	0,35	0,25	40	75,31	64,2	109,41	0,85	0,84
15	10,98	3,94	2,65	0,36	0,27	41	83,86	73,9	130,22	0,88	0,87
16	11,63	4,34	3,06	0,37	0,29	42	93,71	85,38	155,55	0,91	0,9
17	12,34	4,77	3,53	0,39	0,31	43	105,11	99,02	186,54	0,94	0,93
18	13,1	5,26	4,07	0,4	0,32	44	118,37	115,31	224,64	0,97	0,97
19	13,93	5,8	4,68	0,42	0,34	45	133,88	134,88	271,76	1,01	1,00
20	14,83	6,4	5,39	0,43	0,36	46	152,1	158,51	330,35	1,04	1,04
21	15,82	7,07	6,2	0,45	0,38	47	173,64	187,21	403,67	1,08	1,07
22	16,88	7,82	7,13	0,46	0,4	48	199,26	222,31	496,01	1,12	1,11
23	18,05	8,66	8,2	0,48	0,42	49	229,93	265,51	613,16	1,15	1,15
24	19,32	9,6	9,44	0,5	0,45	50	266,89	319,07	762,89	1,2	1,19
25	20,72	10,66	10,88	0,51	0,47						

Fonte: Vesic, 1975.

Tabela 2 – Fatores de forma

Forma da fundação	S_c	S_γ	S_q
Corrida	1	1	1
Quadrada	1,3	0,8	1
Circular	1,3	0,6	1
Retangular	1,1	0,9	1

Fonte: Alonso, 2010.

Apesar da Equação (1) ter sido desenvolvida para ruptura geral, Terzaghi (1943) também propõe que essa mesma equação seja utilizada nos casos de ruptura por punção, com uma redução empírica nos parâmetros de resistência do solo (c e ϕ), como mostra as Equações (2) e (3) respectivamente.

- Ruptura por punção

$$c^* = \frac{2}{3} \times c \quad (2)$$

$$\tan \phi^* = \frac{2}{3} \times \tan \phi \quad (3)$$

- Ruptura local

Para ruptura local Cintra et al. (2011) propõem calcular o valor médio da capacidade de carga para as condições de ruptura geral e de punção.

Validade da teoria de Terzaghi (1943)

Na 13ª edição da Palestra Milton Vargas, realizada anualmente pela Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS), o engenheiro civil Luciano Décourt causou polêmica ao questionar a eficiência da teoria da capacidade de carga proposta por Terzaghi (1943).

Décourt (2017) afirma que o uso dessa teoria deve ser interrompido, tanto na prática, quanto no meio acadêmico pelos professores.

Em pleno século XXI é necessário que limpemos as nossas mentes de alguns conceitos que ajudaram por um tempo, mas agora impedem qualquer novo desenvolvimento na arte de projetar fundações. Está sendo proposto que as abordagens de projeto baseadas nessa teoria sejam abandonadas. A ênfase deve ser dada aos recalques. Os projetos de fundação no século XXI devem se basear exclusivamente em cálculos de recalques, deixando os fantasmas das teorias da capacidade de carga no passado (palestra)¹.

Em sua palestra, o engenheiro civil também apresenta o método RDZ, que objetiva a obtenção de recalques diferenciais zero, entre todas as sapatas. Com isso,

¹ Informação fornecida por Luciano Décourt na Palestra Milton Vargas realizada pela ABMS, São Paulo, em dezembro de 2017.

as tensões a serem aplicadas ao solo pelas sapatas terão que ser diferentes. Finalmente, Décourt (2017) afirma: “Um bom projeto de fundações deve almejar recalques iguais e não tensões iguais em todas as sapatas”.

2.2.2 Solo estratificado

Na prática é comum o solo apresentar-se estratificado em diferentes camadas e, portanto, essa condição deve ser considerada no cálculo da capacidade de carga. Para isso, é importante entender o conceito de bulbo de tensões.

2.2.2.1 Bulbo de tensões

A parcela $\Delta\sigma$ de tensão propagada à profundidade z , segundo Cintra et al. (2011) é obtida através da Equação (4).

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma \times B \times L}{(B + z) \times (L + z)} \quad (4)$$

Em que:

$\Delta\sigma$ = acréscimo de tensão à profundidade z (tf/m²);

σ = tensão aplicada pela base da sapata (tf/m²);

B, L = dimensões da sapata (m).

Logo, pela Equação (4), o acréscimo de tensão à profundidade $z = 2B$ abaixo de uma sapata quadrada de lado B , será fornecido através da Equação (5).

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma \times B^2}{(B + 2B)^2} = \frac{\sigma}{9} = 10\% \sigma \quad (5)$$

A Mecânica dos Solos define a profundidade do bulbo de tensões como sendo correspondente à propagação de 10% da tensão aplicada pela base da sapata (σ). Cintra et al. (2011) admitem que essa propagação ocorre de forma simplificada com uma inclinação de 1:2 (Figura 4) e consideram as seguintes profundidades do bulbo de tensões:

- Sapata Circular ou Quadrada: $z = 2B$
- Sapata Retangular: $z = 3B$

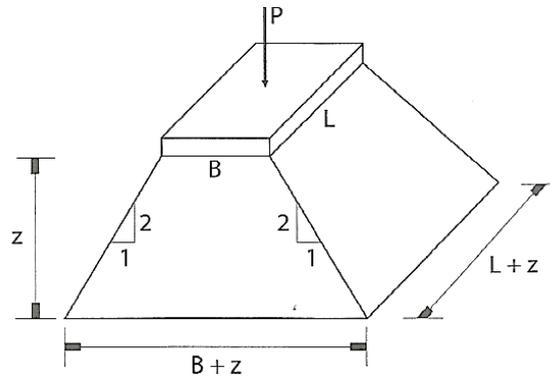


Figura 4 – Propagação de tensões segundo uma inclinação 1:2
Fonte: Cintra et al., 2011.

Dessa forma, podemos admitir que a superfície potencial de ruptura se desenvolve toda no interior do bulbo de tensões e, portanto, no cálculo da capacidade de carga devemos adotar os parâmetros c , ϕ e γ_2 considerando apenas a espessura atingida pelo bulbo de tensões. Se for uma camada de mesmo solo, mas com alguma variação nesses parâmetros podemos determinar o valor médio de cada um dentro do bulbo de tensões.

2.2.2.2 Procedimento para duas camadas

No caso de termos duas camadas atingidas pelo bulbo de tensões (Figura 5), Cintra et al. (2011) propõem o seguinte procedimento:

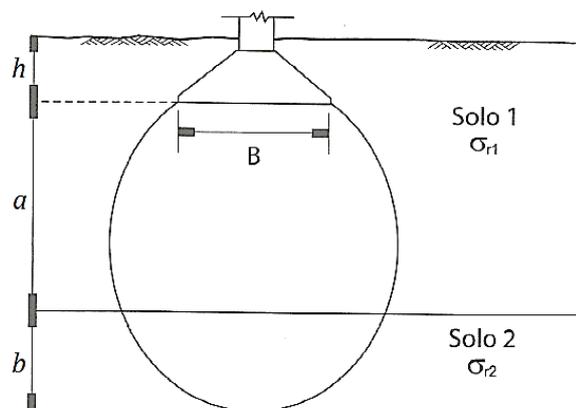


Figura 5 – Segunda camada atingida pelo bulbo de tensões
Fonte: Cintra et al., 2011.

- a) determinar a capacidade de carga considerando apenas a primeira camada (σ_{r1}) e, depois, a capacidade de carga para uma sapata fictícia apoiada no topo da segunda camada (σ_{r2}), conforme exemplificado na Figura 6;

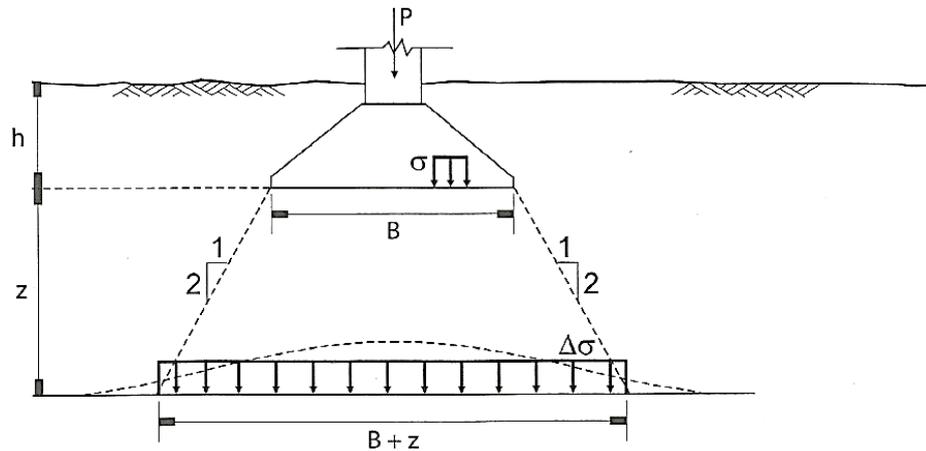


Figura 6 – Sapata fictícia no topo da segunda camada
Fonte: Cintra et al., 2011.

- b) comparar σ_{r1} e σ_{r2} (Equação 6);

$$\sigma_{r1} \leq \sigma_{r2} \Rightarrow OK! \Rightarrow \sigma_r = \sigma_{r1} \quad (6)$$

- c) se a condição da alínea b desta seção 2.2.2.2 for falsa, comparar σ_{r1} e σ_{r2} novamente (Equação 7).

$$\sigma_{r1} > \sigma_{r2} \Rightarrow \sigma_{r1,2} = \frac{(a \times \sigma_{r1}) + (b \times \sigma_{r2})}{a + b} \quad (7)$$

Ainda na alínea c desta seção 2.2.2.2, verificar se haverá ruptura da segunda camada na iminência da sapata aplicar este valor de tensão obtido na Equação (7). Para isso, calcula-se a parcela propagada dessa tensão até o topo da segunda camada ($\Delta\sigma$) e, depois, compara-se $\Delta\sigma$ com σ_{r2} (Equação 8).

Assim, se tivermos:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{r1,2} \times B \times L}{(B + z) \times (L + z)} \leq \sigma_{r2} \Rightarrow OK! \Rightarrow \sigma_r = \sigma_{r1,2} \quad (8)$$

Se $\Delta\sigma > \sigma_{r2}$, será necessário reduzir o valor da capacidade de carga média utilizando a Equação (9), de modo que o valor propagado $\Delta\sigma$ não ultrapasse σ_{r2} .

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{r1,2} \times \sigma_{r2}}{\Delta\sigma} \quad (9)$$

2.3 Dimensionamento de uma sapata isolada

As sapatas são elementos de fundação em concreto armado, que se caracterizam principalmente por tralharem à flexão. Os valores h_1 e h_2 são calculados no dimensionado estrutural da sapata e não será abordado neste trabalho (Figura 7).

Em princípio, esse tipo de fundação só é vantajoso quando a área total ocupada pela fundação abranger, no máximo, 70% da área disponível.

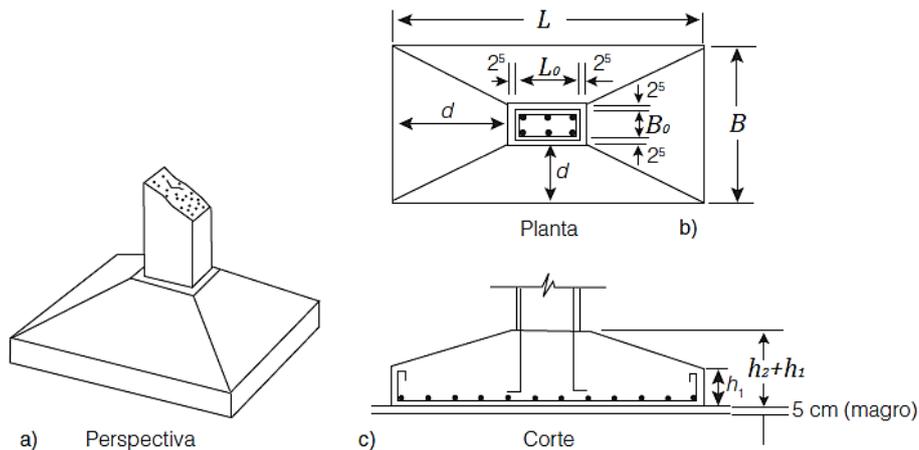


Figura 7 – Desenho de uma sapata genérica: a) Perspectiva; b) Planta; c) Corte
Fonte: Alonso, 2010.

A área da base de uma sapata genérica é calculada pela Equação (10).

$$A = L \times B = \frac{P}{\sigma_{adm}} \quad (10)$$

Em que:

A = área da base da sapata (m^2);

P = soma da carga proveniente do pilar e peso próprio da sapata (tf);

σ_{adm} = tensão admissível do solo (tf/ m^2).

Depois de calcular a área da sapata, Alonso (2010) recomenda escolher os valores de L e B de modo que:

- a) o centro de gravidade da sapata coincida com o centro de carga do pilar, quando a sapata não for de divisa;
- b) a sapata não apresente nenhuma dimensão menor que 60 cm;
- c) $\frac{L}{B} \leq 2,5$;
- d) a forma da sapata coincida à forma do pilar, quando não existir limitações de espaço.

2.4 Recalques

Os recalques sofridos pelas fundações são inevitáveis, pois os solos são deformáveis e, portanto, a hipótese de apoio fixo para pilares, geralmente considerada no cálculo estrutural, não é realista. Ao se aplicar carga em uma fundação direta, obrigatoriamente ocorrerão recalques.

Por isso, deve fazer parte da rotina de projetos de fundações a estimativa dos recalques e, mais do que isso, a adequação do projeto para que os recalques sejam inferiores aos valores admissíveis. (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p. 62)

Segundo Cintra et al. (2011), recalque é o deslocamento vertical para baixo da base da sapata em relação a uma referência fixa indeslocável. São provenientes das deformações por diminuição de volume e/ou mudança de forma do maciço de solo compreendido entre a base da sapata e o indeslocável.

Simons & Menzies (1981) afirmam que o recalque total (δ) das fundações é constituído de três componentes, como pode ser visto na Equação (11).

$$\delta = \delta_I + \delta_C + \delta_S \quad (11)$$

Em que:

δ = recalque total (ou absoluto) final;

δ_I = recalque imediato, típico em areias, resultante da distorção a volume constante da massa carregada de solo;

δ_c = recalque por adensamento, típico em argilas, resultante do fluxo de água da área carregada, sob influência do excesso de pressão neutra gerado pela carga;

δ_s = recalque secundário, o qual é dependente do tempo, mas pode ocorrer sob pressão efetiva basicamente constante.

2.4.1 Recalque diferencial ($\Delta\delta$) e distorção angular (ρ)

O recalque diferencial ($\Delta\delta$) pode ser definido como a diferença entre os recalques totais (ou absolutos) de dois quaisquer elementos de fundação, como pode ser visto na Figura 8.

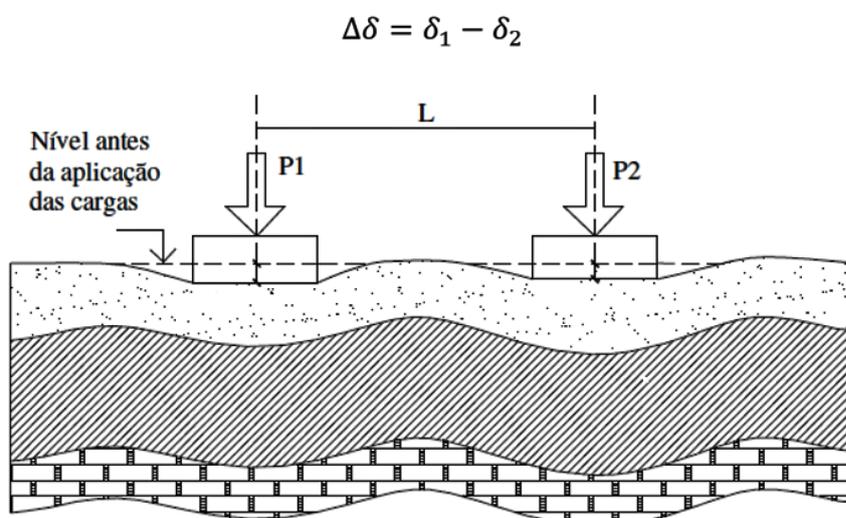


Figura 8 – Recalque diferencial entre dois elementos de fundação
Fonte: Soares, 2015.

Esse recalque diferencial impõe distorções à estrutura e dependendo da sua magnitude pode provocar fissuras na mesma. Portanto, a distorção angular (ρ), como mostra a Equação (12), é definida como a divisão entre $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$, o recalque diferencial de dois elementos de fundação e L , a distância entre eles.

$$\rho = \frac{\Delta\delta}{L} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{L} \quad (12)$$

Na Figura 9 são apresentados os critérios de Bjerrum (1963) que estabelecem limites para a distorção angular em função de vários tipos de danos.

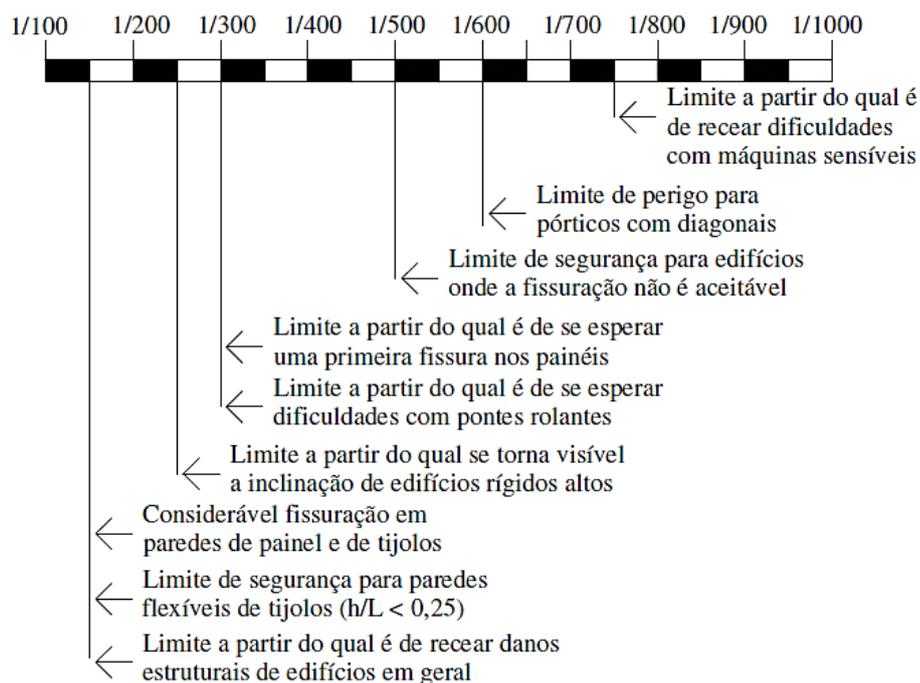


Figura 9 – Limites para distorções angulares
Fonte: Bjerrum, 1963.

Na teoria, uma estrutura sujeita apenas a recalques totais uniformes não sofreria danos. Entretanto, na prática, muitas vezes ocorrem recalques diferenciais e conseqüentemente distorções angulares. Logo, a limitação do recalque total é uma das maneiras de limitar o recalque diferencial.

2.5 Orçamento das sapatas

O primeiro passo para realizar o orçamento de uma sapata é fazer o levantamento de quantidades e para isso torna-se necessário entender como é realizado cada um dos serviços na execução de uma sapata. Com isso, torna-se possível realizar uma estimativa de custos devido a implantação das sapatas.

2.5.1 Execução de uma sapata

Para executar uma sapata é feita uma escavação até 5 cm abaixo da cota de apoio, com as inclinações do talude variando de 1:1 a 1:3 e deve ser deixada uma folga de 50 cm entre os bordos da sapata e da escavação (Figura 10a).

Em seguida, para nivelar a base, lança-se uma camada de concreto magro com 5 cm de espessura e folga mínima de 10 cm a partir do bordo da sapata, apoiar a

fôrma do rodapé da sapata, colocar a armação da sapata e os ferros de arranque do pilar (Figura 10b).

Por último, é realizada a concretagem até a face superior da sapata, retira-se a fôrma do rodapé da mesma, coloca-se a ferragem do pilar e a fôrma do mesmo, seguindo-se de sua concretagem. Assim, após desformar o pilar, a execução termina com o reaterro em torno da sapata (Figura 10c).

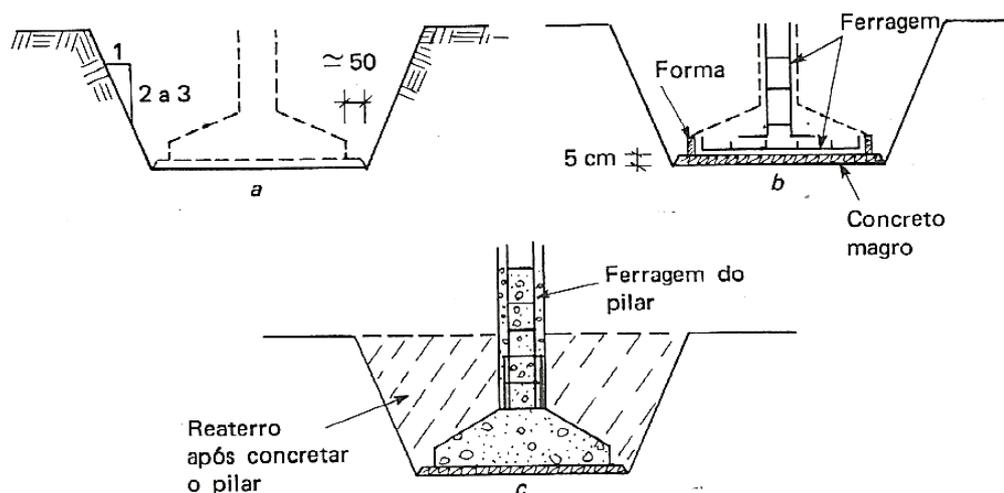


Figura 10 – Execução de uma sapata
Fonte: Alonso, 2010.

2.5.2 Estimativa de custos

A Caixa Econômica Federal disponibiliza, a partir de links em sua página, os preços e custos do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) para que possam ser consultados e utilizados como referência na elaboração de orçamentos. Dessa forma, os preços unitários dos serviços citados para o Estado da Paraíba são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Preço unitário dos serviços para o Estado da Paraíba

Descrição do Insumo	Unidade	Preço Unitário (R\$)	
		Não desonerado	Desonerado
ESCAVAÇÃO			
ESCAVAÇÃO MECANIZADA PARA BLOCO DE COROAMENTO OU SAPATA, SEM PREVISÃO DE FÔRMA, COM RETROESCAVADEIRA	m³	63,67	59,26
ESCAVAÇÃO MECANIZADA PARA BLOCO DE COROAMENTO OU SAPATA, COM PREVISÃO DE FÔRMA, COM RETROESCAVADEIRA.	m³	27,92	26,74
ESCAVAÇÃO MANUAL PARA BLOCO DE COROAMENTO OU SAPATA, SEM PREVISÃO DE FÔRMA	m³	94,15	84,0
ESCAVAÇÃO MANUAL PARA BLOCO DE COROAMENTO OU SAPATA, COM PREVISÃO DE FÔRMA	m³	60,11	53,66
CONCRETO MAGRO			
LASTRO DE CONCRETO MAGRO, APLICADO EM BLOCOS DE COROAMENTO OU SAPATAS, ESPESSURA DE 5 CM	m²	18,68	17,69
FÔRMA			
FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA PARA SAPATA, EM MADEIRA SERRADA, E=25 MM, 1 UTILIZAÇÃO	m²	166,06	155,33
FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA PARA SAPATA, EM MADEIRA SERRADA, E=25 MM, 2 UTILIZAÇÕES	m²	109,95	101,8
FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA PARA SAPATA, EM MADEIRA SERRADA, E=25 MM, 4 UTILIZAÇÕES	m²	80,72	73,91
FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA PARA SAPATA, EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA, E=17 MM, 2 UTILIZAÇÕES	m²	161,01	149,41
FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA PARA SAPATA, EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA, E=17 MM, 4 UTILIZAÇÕES	m²	114,43	105,11
CONCRETAGEM			
CONCRETAGEM DE SAPATAS, FCK 30 MPA, COM USO DE JERICA – LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO	m³	452,02	432,64
CONCRETAGEM DE SAPATAS, FCK 30 MPA, COM USO DE BOMBA – LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO	m³	417,02	415,08
REATERRO			
REATERRO MANUAL DE VALAS COM COMPACTAÇÃO MECANIZADA	m³	18,23	16,47
REATERRO MANUAL APILOADO COM SOQUETE	m³	31,58	28,25
ARMAÇÃO			
ARMAÇÃO DE BLOCO, VIGA BALDRAME E SAPATA UTILIZANDO AÇO CA-60 DE 5 MM - MONTAGEM	kg	10,84	10,24
ARMAÇÃO DE BLOCO, VIGA BALDRAME OU SAPATA UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 6,3 MM - MONTAGEM	kg	9,45	9,03
ARMAÇÃO DE BLOCO, VIGA BALDRAME OU SAPATA UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 8 MM - MONTAGEM	kg	9,15	8,83
ARMAÇÃO DE BLOCO, VIGA BALDRAME OU SAPATA UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 10 MM - MONTAGEM	kg	7,47	7,24
ARMAÇÃO DE BLOCO, VIGA BALDRAME OU SAPATA UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 12,5 MM - MONTAGEM	kg	6,66	6,49
ARMAÇÃO DE BLOCO, VIGA BALDRAME OU SAPATA UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 16 MM - MONTAGEM	kg	6,19	6,06
ARMAÇÃO DE BLOCO, VIGA BALDRAME OU SAPATA UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 20 MM - MONTAGEM	kg	5,67	5,58
ARMAÇÃO DE BLOCO, VIGA BALDRAME OU SAPATA UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 25 MM - MONTAGEM	kg	6,17	6,11

Fonte: SINAPI, 2018.

3 METODOLOGIA

Para automatizar o projeto de fundação em sapatas isoladas, optou-se por fazer uso da programação computacional, realizando um dimensionamento seguro dessas sapatas, já que o software permite prever os recalques a que se submetem cada uma dessas sapatas.

3.1 O programa

O GeoDim 1.0 é um software elaborado com a proposta de realizar o dimensionamento de sapatas isoladas, calcular o recalque imediato de cada sapata dimensionada e por fim, obter o quantitativo e orçamento das mesmas.

Desenvolvido em programação na linguagem Visual Basic, o programa traz uma interface simples e de fácil utilização. A Figura 11 mostra o ícone do programa.



Figura 11 – Ícone do programa GeoDim 1.0
Fonte: Autoria própria, 2018.

O GeoDim 1.0 necessita de dados de entrada obtidos no ensaio de sondagem à percussão SPT e, portanto, um estudo geotécnico eficiente é imprescindível para que o programa forneça resultados corretos. É importante deixar claro que a utilização do software apenas auxilia na elaboração de um projeto de fundação e o mesmo não deve substituir o engenheiro calculista de fundação, até porque alguns dados de entrada necessitam da experiência desse engenheiro.

3.2 Dados de entrada

Ao abrir o programa o usuário deverá inserir os dados necessários ao processo de cálculo, sendo eles:

- a) perfil de sondagem SPT do solo;
- b) carga máxima proveniente do pilar (tf);
- c) dimensões dos pilares das sapatas (m);
- d) peso específico do solo acima da base da sapata (tf/m³);
- e) peso específico do solo abaixo da base da sapata (tf/m³);
- f) altura de embutimento (ou profundidade) da sapata (m);
- g) altura do rodapé da sapata (m);
- h) altura do cuscuz da sapata (m);
- i) inclinação do talude de escavação (m/m);
- j) preço unitário da escavação (R\$/m³);
- k) preço unitário do concreto magro (R\$/m²);
- l) preço unitário da fôrma (R\$/m²);
- m) preço unitário do concreto simples (R\$/m³);
- n) preço unitário do reaterro (R\$/m³);
- o) preço unitário da armadura (R\$/kg).

3.3 Algoritmo

O algoritmo, segundo Sarmento (2018), é um conjunto de regras e procedimentos perfeitamente definidos para a solução de um problema específico. Encontra-se aqui toda a sequência lógica realizada pelo programa para a obtenção do resultado desejado por esta pesquisa.

3.3.1 Tensão admissível do solo

Denominam-se isóbaras as curvas ou superfícies obtidas ligando-se os pontos de mesma tensão vertical. Esse conjunto de isóbaras forma o bulbo de tensões, onde a altura do mesmo depende de vários fatores e pode variar conforme o projeto de fundação e características do solo (Figura 12). Portanto, a finalidade do software será

a de calcular a tensão admissível para várias alturas do bulbo de tensões, até mesmo para o projetista poder comparar as tensões e decidir a mais adequada a ser utilizada no dimensionamento das sapatas.

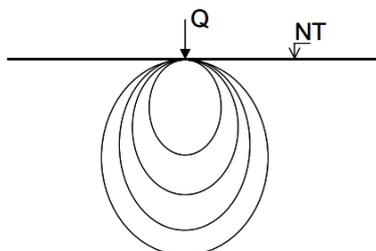


Figura 12 – Propagação do bulbo de tensões
Fonte: Autoria própria, 2018.

Para a estimativa da tensão admissível do solo, variável necessária no dimensionamento das sapatas, será utilizado o método semi-empírico que relaciona o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) obtido no ensaio de sondagem à percussão SPT com a tensão admissível (σ_{adm}), como mostra a Equação (13).

$$\sigma_{adm} = \overline{N_{SPT}} \times 2 \quad (13)$$

Em que:

σ_{adm} = tensão admissível do solo (tf/m²);

$5 \leq \overline{N_{SPT}} \leq 20$;

$\overline{N_{SPT}}$ = média do N_{SPT} dentro do bulbo de tensões.

A NBR 6122/2010, no seu item 3.27, define tensão admissível como sendo a “tensão adotada em projeto que, aplicada ao terreno pela fundação superficial, atende com coeficientes de segurança predeterminados, aos estados-limites últimos (ruptura) e de serviço (recalques, vibrações etc.)”.

A Equação (13) é utilizada considerando que o bulbo de tensões atinge apenas uma camada. Entretanto, quando vamos calcular a tensão admissível devemos levar em consideração todas as camadas de solo que estão dentro do bulbo. Sabe-se que quanto maior a altura do bulbo maior será o número de camadas atingidas por ele, então o software irá considerar a possibilidade do bulbo atingir várias camadas.

É possível adequar a Equação (13) para que a mesma possa ser utilizada considerando que o bulbo de tensões atinja mais de uma camada. Para isso, o software irá calcular a média ponderada do $\overline{N_{SPT}}$, levando em consideração a altura

de cada uma dessas camadas, como exemplificado na Figura 13 e nas seguintes relações:

$$\sigma_{adm[2 \text{ camadas}]} = \frac{(\overline{N_{SPT_a}} \times a) + (\overline{N_{SPT_b}} \times b)}{a + b} \times 2$$

$$\sigma_{adm[3 \text{ camadas}]} = \frac{(\overline{N_{SPT_a}} \times a) + (\overline{N_{SPT_b}} \times b) + (\overline{N_{SPT_c}} \times c)}{a + b + c} \times 2$$

$$\sigma_{adm[4 \text{ camadas}]} = \frac{(\overline{N_{SPT_a}} \times a) + (\overline{N_{SPT_b}} \times b) + (\overline{N_{SPT_c}} \times c) + (\overline{N_{SPT_d}} \times d)}{a + b + c + d} \times 2$$

Em que:

a, b, c, d = altura das camadas(m);

$\overline{N_{SPT_a}}, \overline{N_{SPT_b}}, \overline{N_{SPT_c}}, \overline{N_{SPT_d}}$ = média do N_{SPT} dentro de cada camada.

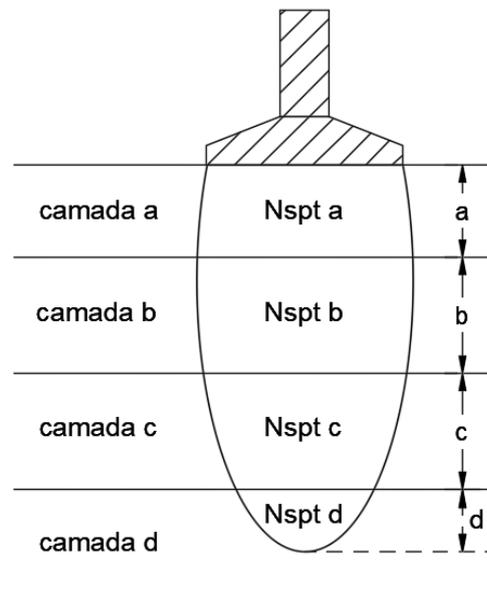


Figura 13 – Procedimento para calcular a σ_{adm} do solo
Fonte: Autoria própria, 2018.

Por fim, esse raciocínio será realizado pelo software até que o bulbo de tensões atinja várias camadas.

3.3.2 Dimensionamento de uma sapata isolada

No dimensionamento das sapatas podemos distinguir três casos particulares: Sapata quadrada, circular e retangular.

- Sapata quadrada

Quando não existir limitação de espaço, a sapata deverá ter seção quadrada, cujo lado B será dado pela Equação (14).

$$A = B^2 = \frac{P}{\sigma_{adm}}$$

$$B = \sqrt{\frac{P}{\sigma_{adm}}} \quad (14)$$

- Sapata circular

Quando não existir limitação de espaço, a sapata deverá ter seção circular, cujo diâmetro D_S será dado pela Equação (15).

$$A = \pi \times \frac{D_S^2}{4} = \frac{P}{\sigma_{adm}}$$

$$D_S = \sqrt{\frac{4 \times P}{\sigma_{adm} \times \pi}} \quad (15)$$

- Sapata retangular

Neste caso, pela Figura 7b mostrada na seção 2.3, quando não existir limitação de espaço podemos escrever:

$$\begin{cases} L - L_0 = 2 \times d \\ B - B_0 = 2 \times d \end{cases} \Rightarrow L - B = L_0 - B_0$$

Em que:

L_0, B_0 = dimensões do pilar (m);

$L_0 > B_0; L > B$.

Dessa forma, os lados L e B da sapata com seção retangular serão obtidos pelas Equações (16) e (17), respectivamente.

$$L = L_0 - B_0 + B \quad (16)$$

$$A = L \times B = \frac{P}{\sigma_{adm}} \Rightarrow (L_0 - B_0 + B) \times B = \frac{P}{\sigma_{adm}}$$

$$B = \frac{-(L_0 - B_0) + \sqrt{(L_0 - B_0)^2 + \frac{4 \times P}{\sigma_{adm}}}}{2} \quad (17)$$

Em que:

P = soma da carga máxima proveniente do pilar e peso próprio da sapata (tf);

Como o peso próprio da sapata depende de suas respectivas dimensões, por recomendação de Soares (2015), o software irá considerar o peso próprio da sapata como sendo 10% dessa carga máxima que chega no pilar.

Importante ressaltar que o programa irá, depois de calcular as dimensões das sapatas, arredondar os valores para múltiplos de 5 cm com a finalidade de facilitar a sua execução na obra. Por exemplo, $B = 0,77 \text{ m} \cong 0,8 \text{ m}$ ou $L = 1,83 \text{ m} \cong 1,85 \text{ m}$. Além disso, o algoritmo do programa também irá respeitar a condição de que a sapata deve ter dimensão mínima de 60 cm.

Depois disso, deve-se proceder ao cálculo de recalques. Entretanto, o software ainda terá a opção de modificar essas dimensões calculadas e isso será uma opção discricionária do engenheiro projetista. Essa opção pode ser útil caso o engenheiro queira uniformizar as dimensões das sapatas facilitando a sua execução no canteiro de obras, ou ainda, simplesmente para diminuir o recalque de uma sapata específica no projeto.

O software irá considerar apenas o cálculo do recalque imediato pela Teoria da Elasticidade e o método Schmertmann (1978), descritos a seguir.

3.3.3 Módulo de deformabilidade E_S

O módulo de deformabilidade E_S é uma variável importante no cálculo de recalques. Na Geotecnia, para avaliar o comportamento Tensão x Deformação de um solo em laboratório, o principal ensaio utilizado é o ensaio triaxial, pelo qual é possível determinar o módulo de deformabilidade E_S dentre outros parâmetros importantes.

Entretanto, como na prática é difícil medir o valor de E_S , o software irá calcular o mesmo através de uma correlação com o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) apresentada por Teixeira & Godoy (1996) através da Equação (18).

$$E_S = \alpha \times K \times N_{SPT} \quad (18)$$

Em que:

α = fator de correlação (Tabela 4);

K = coeficiente de correlação (Tabela 5).

Tabela 4 – Fator α de correlação

Solo	α
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Fonte: Teixeira & Godoy, 1996.

Tabela 5 – Coeficiente K de correlação

Solo	K (MPa)
Areia com pedregulhos	1,1
Areia	0,9
Areia siltosa	0,7
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,3
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,2

Fonte: Teixeira & Godoy, 1996.

De acordo com Cintra et al. (2011) é importante ficar claro que: Se o valor de E_S for constante com a profundidade, temos o chamado **meio elástico homogêneo**

(MEH), como é o caso das argilas sobreadensadas. Já se E_s for variável com a profundidade, temos o **meio elástico não homogêneo**, como é o caso das areias.

3.3.4 Cálculo de Recalques pela Teoria da Elasticidade

A Teoria da Elasticidade, em regra, é aplicada quando se pretende estimar o recalque imediato em **meio elástico homogêneo (MEH)**, ou seja, quando E_s for constante com a profundidade.

É consenso que os solos não são materiais elásticos e, portanto, os recalques imediatos geralmente não são recuperáveis quando ocorre o descarregamento, podendo ser reversíveis apenas parcialmente. Portanto, o que justifica o uso da Teoria da Elasticidade na estimativa de recalques é a linearidade da curva Tensão x Deformação (Figura 14), por ser razoável admitir comportamento linear dessa curva até níveis de tensão da ordem dos que são aplicados pelas sapatas.

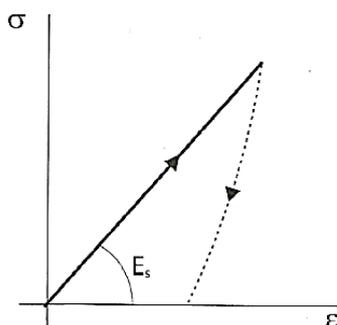


Figura 14 – Comportamento Tensão x Deformação de um material linear não elástico
Fonte: Cintra et al., 2011.

Sabe-se que a Lei de Hooke estudada na Física e adaptada na Mecânica dos Solos é definida pela Equação (19) e a partir disso é possível deduzir que para um meio elástico homogêneo (MEH) a Equação (20) será utilizada para calcular o recalque imediato.

$$\Delta\sigma = E_s \times \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{\delta_I}{h_0} \quad (19)$$

$$\Delta\sigma = E_s \times \frac{\delta_I}{h_0} \Rightarrow \delta_I = \frac{\Delta\sigma \times h_0}{E_s} \quad (20)$$

Em que:

$\Delta\sigma$ = acréscimo de tensão no centro da camada em que é calculado o recalque;

ε = deformação do solo presente na camada;

h_0 = altura da camada;

δ_I = recalque imediato.

O acréscimo de tensão ($\Delta\sigma$) será calculado no centro de cada camada em que se deseja calcular o recalque, como mostra a Figura 15, utilizando a Equação (21) estudada na Física: quantidade de força aplicada em unidade de área.

$$\sigma = \frac{\text{Força}}{\text{Área}} \quad (21)$$

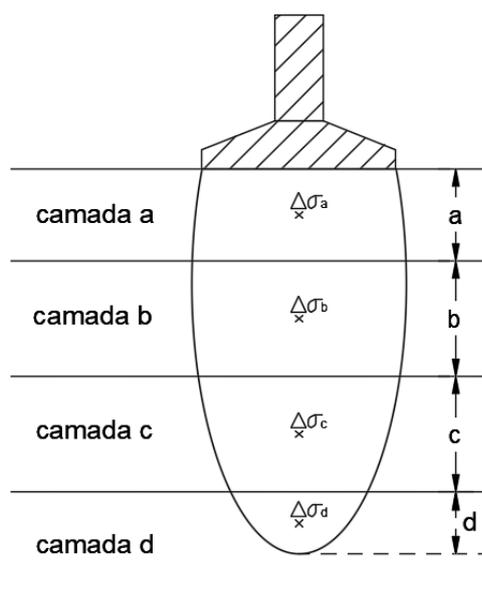


Figura 15 – Acréscimo de tensão em cada camada do “bulbo” de recalques
Fonte: Autoria própria, 2018.

Entretanto, em cada ponto em que é calculado o acréscimo de tensão, deverá ser considerada uma sapata fictícia apoiada no ponto em que se pretende calcular esse acréscimo de tensão, com as dimensões dessa sapata ampliadas através da propagação 1:2 exemplificada anteriormente na Figura 6 da seção 2.2.2.2.

Adaptando a Equação (21) à Mecânica dos Solos e considerando as dimensões da sapata ampliadas pela propagação 1:2 em cada ponto do centro dessas camadas, as seguintes relações podem ser utilizadas para calcular o acréscimo de tensão:

- Sapata Quadrada e Retangular

$$\Delta\sigma_{a[1 \text{ camada}]} = \frac{P}{\left(B + \frac{a}{2}\right) \times \left(L + \frac{a}{2}\right)}$$

$$\Delta\sigma_{b[2 \text{ camadas}]} = \frac{P}{\left(B + a + \frac{b}{2}\right) \times \left(L + a + \frac{b}{2}\right)}$$

$$\Delta\sigma_{c[3 \text{ camadas}]} = \frac{P}{\left(B + a + b + \frac{c}{2}\right) \times \left(L + a + b + \frac{c}{2}\right)}$$

$$\Delta\sigma_{d[4 \text{ camadas}]} = \frac{P}{\left(B + a + b + c + \frac{d}{2}\right) \times \left(L + a + b + c + \frac{d}{2}\right)}$$

- Sapata Circular

$$\Delta\sigma_{a[1 \text{ camada}]} = \frac{P}{\frac{\pi}{4} \times \left(D_s + \frac{a}{2}\right)^2}$$

$$\Delta\sigma_{b[2 \text{ camadas}]} = \frac{P}{\frac{\pi}{4} \times \left(D_s + a + \frac{b}{2}\right)^2}$$

$$\Delta\sigma_{c[3 \text{ camadas}]} = \frac{P}{\frac{\pi}{4} \times \left(D_s + a + b + \frac{c}{2}\right)^2}$$

$$\Delta\sigma_{d[4 \text{ camadas}]} = \frac{P}{\frac{\pi}{4} \times \left(D_s + a + b + c + \frac{d}{2}\right)^2}$$

Em que:

B, L = dimensões das sapatas quadrada (substituir L por B) e retangular;

D_s = diâmetro da sapata circular.

Por fim, esse raciocínio será realizado pelo software até que o “bulbo” de recalques atinja várias camadas.

Importante definir que a profundidade do “bulbo” de recalques é a região em que se pretende calcular o recalque e corresponde à propagação de 10% do recalque total. Essa profundidade do “bulbo” de recalques será fornecida pelo usuário que

utiliza o software, ou seja, o mesmo terá a opção de calcular o recalque até a profundidade que achar conveniente.

3.3.5 Cálculo de Recalques pelo Método Schmertmann (1978)

O Método de Schmertmann (1978) é aplicado quando se pretende estimar o recalque imediato em **meio elástico não homogêneo**, ou seja, quando E_S for variável com a profundidade.

Embora a Teoria da Elasticidade seja primeiramente aplicável a estimativa de recalque imediato em meio elástico homogêneo (MEH), o método proposto por Schmertmann (1978) e descrito por Cintra et al. (2011) é resultado de uma adaptação dessa Teoria pois esse método consiste em dividir o perfil de sondagem (Figura 16) em um número de subcamadas suficiente para que E_S seja constante em cada uma dessas subcamadas.

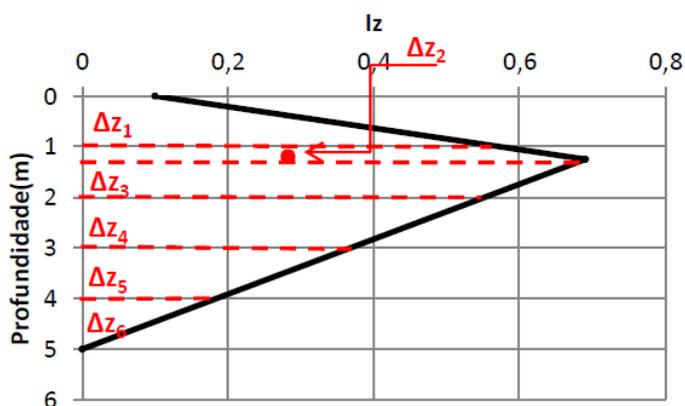


Figura 16 – Exemplo de divisão do perfil de sondagem em subcamadas, no diagrama I_z x profundidade
Fonte: Autoria própria, 2018.

Schmertmann (1978) considerou um carregamento uniforme σ , que atua na superfície de um semiespaço elástico, isotrópico e homogêneo, com módulo de deformabilidade E_S . Para essa situação, os recalques imediatos serão calculados pela Equação (22).

$$\delta_I = C_1 \times C_2 \times \sigma^* \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_z}{E_S} \times \Delta z \right)_i \quad (22)$$

Em que:

C_1 = fator de correção devido ao embutimento da sapata;

C_2 = fator de correção devido ao efeito do tempo;

$\sigma^* = \sigma - q$ = tensão líquida aplicada pela sapata;

$q = \gamma_1 \times h$ = tensão vertical efetiva à cota de apoio da fundação;

E_s = módulo de deformabilidade da i -ésima camada do solo;

Δz = espessura da i -ésima camada do solo;

I_z = fator de influência na deformação vertical à meia altura da camada.

Os fatores de correção C_1 e C_2 (com t em anos) podem ser calculados pelas Equações (23) e (24), respectivamente.

$$C_1 = 1 - 0,5 \times \left(\frac{q}{\sigma^*} \right) \geq 0,5 \quad (23)$$

$$C_2 = 1 + 0,2 \times \log \left(\frac{t}{0,1} \right) \quad (24)$$

Entretanto, como o objetivo do programa é calcular apenas o recalque imediato, foi adotado no algoritmo o valor de $C_2 = 1$.

Na Figura 17 o autor propõe uma distribuição do fator de influência na deformação para o cálculo de recalque em sapatas rígidas apoiadas em meio elástico não homogêneo.

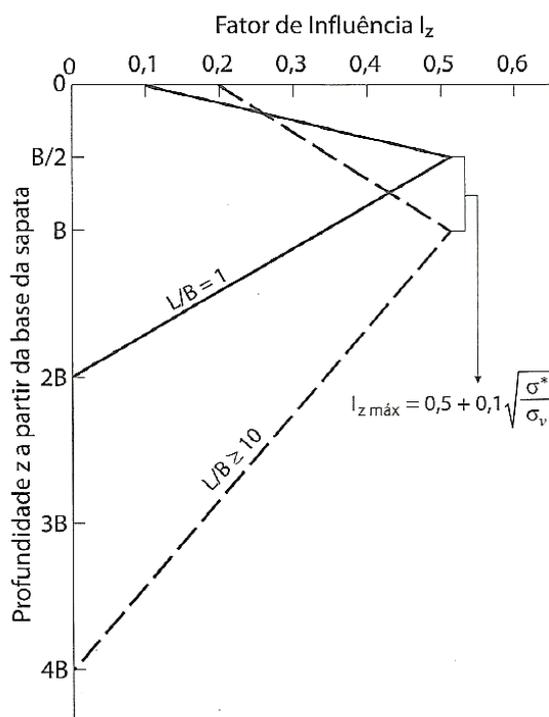


Figura 17 – Fator de influência na deformação vertical
 Fonte: Schmertmann, 1978, apud Cintra et al., 2011.

O valor de I_z em cada subcamada de um maciço arenoso pode ser obtido por semelhança de triângulo ou, como foi utilizado no algoritmo do software, pelas Equações (25) e (26) no caso de sapata quadrada. O I_z é calculado em função da variável z (profundidade contada a partir da base da sapata).

$$I_z = 0,1 + 2 \times (I_{zmax} - 0,1) \times \frac{z}{B} \quad \left(z \leq \frac{B}{2} \right) \quad (25)$$

$$I_z = \frac{2}{3} \times I_{zmax} \times \left(2 - \frac{z}{B} \right) \quad \left(\frac{B}{2} \leq z \leq 2B \right) \quad (26)$$

Para sapatas intermediárias $\left(1 < \frac{L}{B} < 10 \right)$ Cintra et al. (2011) afirmam que podemos construir um diagrama interpolado, em que a altura Y do “bulbo” de recalques (espessura da camada sob a base da sapata que produz mais de 90% do recalque imediato total) atinja a profundidade dada pela Equação (27).

$$Y = 2B \times \left(1 + \log \left(\frac{L}{B} \right) \right) \quad (27)$$

Fazendo a interpolação do diagrama, no caso de sapata retangular, o valor de I_z será calculado pelas Equações (28) e (29).

$$I_z = \frac{4 \times z \times (I_{zmax} - I_{zi})}{Y} + I_{zi} \quad \left(z \leq \frac{Y}{4} \right) \quad (28)$$

$$I_z = \frac{4 \times I_{zmax} \times (Y - z)}{3 \times Y} \quad \left(\frac{Y}{4} \leq z \leq Y \right) \quad (29)$$

Em que:

I_{zi} = fator de influência inicial para sapata retangular com largura B ;

O diagrama da Figura 17 não diz o valor de I_z inicial (I_{zi}) para sapata retangular. Entretanto, também podemos determina-lo por interpolação e assim, utilizar a Equação (30) para proceder ao cálculo.

$$I_{zi} = 0,1 + \frac{\log\left(\frac{L}{B}\right)}{10} \quad (30)$$

O valor máximo de I_z , que ocorre a profundidade de $\frac{1}{4}$ do “bulbo” de recalques, isto é, $z = \frac{B}{2}$ para sapata quadrada e $z = B$ para sapata corrida, é dado pela Equação (31).

$$I_{zmax} = 0,5 + 0,1 \times \sqrt{\frac{\sigma^*}{\sigma_V}} \quad (31)$$

Em que:

σ_V = tensão vertical efetiva na profundidade correspondente a I_{zmax} .

O método também pode ser utilizado em sapatas circulares, onde devemos calcular o lado de um quadrado de área equivalente para valer o diagrama $\frac{L}{B} = 1$.

Uma condição inescusável para calcularmos o recalque pelo método Schmertmann (1978) é que quando for dividir o perfil de sondagem em subcamadas é necessário que essa divisão passe no ponto onde I_z é máximo, o vértice do diagrama da Figura 17, e, além disso, a espessura máxima das subcamadas deve ser igual a esse valor.

3.3.6 Quantitativo das sapatas

Para que seja determinado o quantitativo de cada um dos serviços necessários na execução de uma sapata foram deduzidas equações, onde as mesmas serão explícitas a seguir e foram obtidas através de ferramentas matemáticas.

A Figura 18 mostra o desenho da planta e corte, respectivamente, de uma sapata genérica, com a representação das variáveis utilizadas no algoritmo do software.

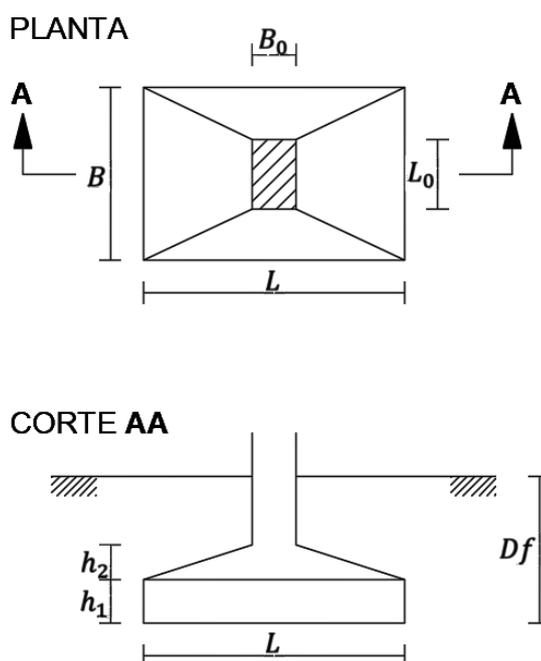


Figura 18 – Dimensões de uma sapata
Fonte: Autoria própria, 2018.

Em que:

$Df = h + 0,05 \text{ m}$ (sapata escavada 5 cm abaixo da cota de apoio);

h = embutimento da sapata (m);

$L; B; L_0; B_0; h_1; h_2$ (m).

3.3.6.1 Volume de escavação

O desenho da planta de uma sapata genérica (Figura 19) mostra a folga de 50 cm que deve ser deixada entre os bordos da sapata e da escavação, como dito na seção 2.5.1.

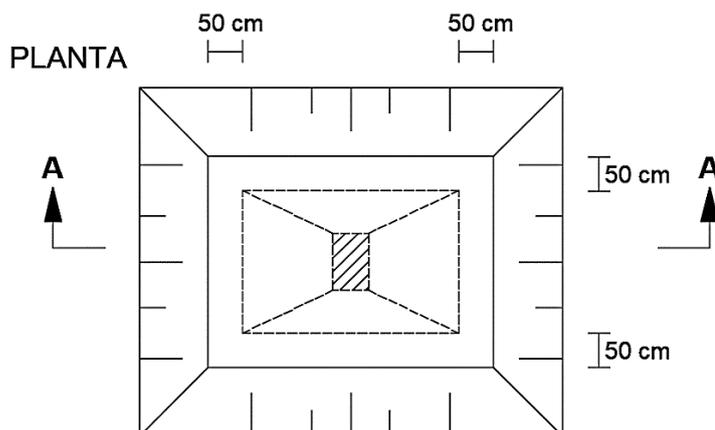


Figura 19 – Dimensões da escavação em planta
Fonte: Autoria própria, 2018.

Como a inclinação do talude varia de 1:1 a 1:3, temos três diferentes configurações para as dimensões da escavação em corte, como é exibido nas Figuras 20, 21 e 22.

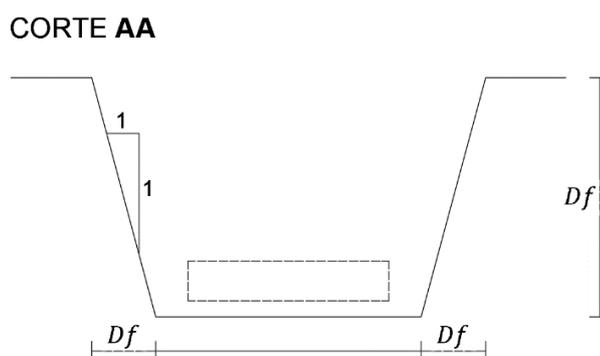


Figura 20 – Dimensões da escavação em corte, com inclinação 1:1 do talude
Fonte: Autoria própria, 2018.

CORTE AA

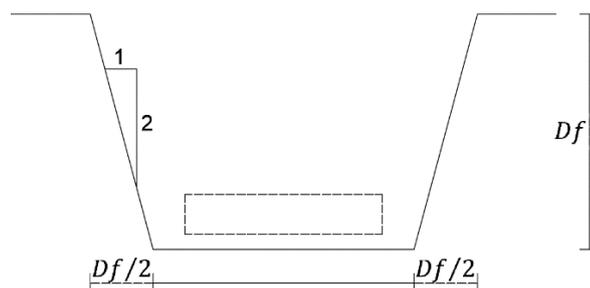


Figura 21 – Dimensões da escavação em corte, com inclinação 1:2 do talude
Fonte: Autoria própria, 2018.

CORTE AA

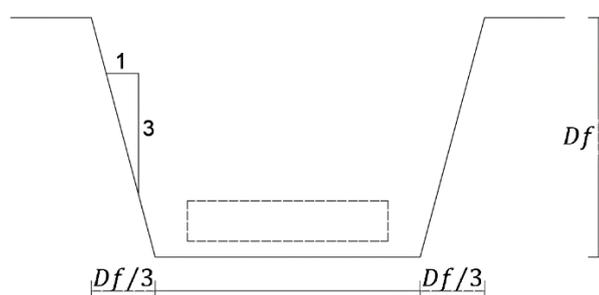


Figura 22 – Dimensões da escavação em corte, com inclinação 1:3 do talude
Fonte: Autoria própria, 2018.

Portanto, o volume de escavação será calculado através da Equação (32) do volume de tronco de pirâmide, exemplificado na Figura 23.

$$V_{esc} = \frac{Df}{3} \times (a + A + \sqrt{(a \times A)}) \quad (32)$$

Em que:

$$a = (L + 1) \times (B + 1)$$

$$A = (L + 1 + 2Df) \times (B + 1 + 2Df) \Rightarrow \text{inclinação } 1:1$$

$$A = (L + 1 + Df) \times (B + 1 + Df) \Rightarrow \text{inclinação } 1:2$$

$$A = \left(L + 1 + \frac{2Df}{3}\right) \times \left(B + 1 + \frac{2Df}{3}\right) \Rightarrow \text{inclinação } 1:3$$

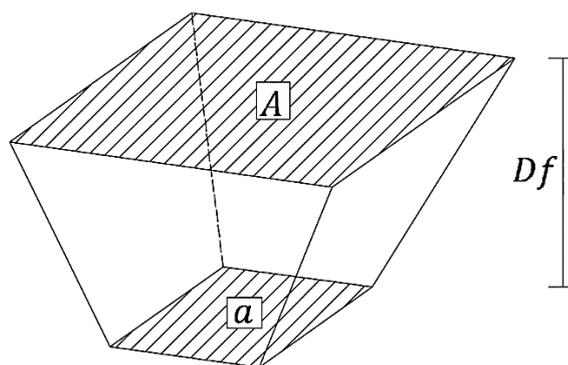


Figura 23 – Cálculo do volume de escavação através do volume de tronco de pirâmide
Fonte: Autoria própria, 2018.

OBS.: Nas sapatas circulares, substituir L e B por D_s (diâmetro da sapata).

3.3.6.2 Volume de concreto magro

A Figura 24 mostra que deve ser lançada uma camada de concreto magro com 5 cm de espessura e folga mínima de 10 cm a partir do bordo da sapata, como dito na seção 2.5.1. Portanto, o volume de concreto magro será calculado pela Equação (33).

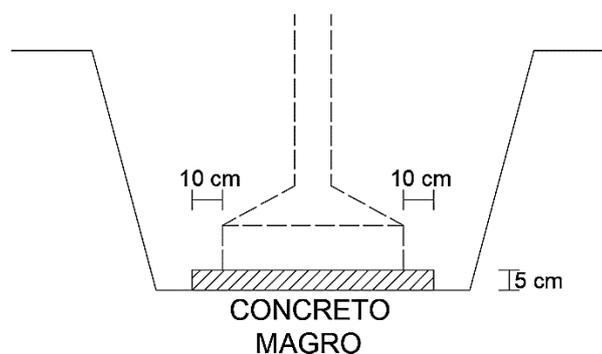


Figura 24 – Cálculo do volume de concreto magro
Fonte: Autoria própria, 2018.

$$V_{mag} = 0,05 \times [(L + 0,2) \times (B + 0,2)] \quad (33)$$

$$A_{mag} = \frac{V_{mag}}{0,05}$$

OBS.: Nas sapatas circulares, substituir L e B por D_s (diâmetro da sapata).

3.3.6.3 Área da fôrma

A Figura 25 mostra que a área de fôrma total é composta pela sapata e pescoço do pilar, ou seja, $A_{fôrma} = A_{sap} + A_{pes}$. Portanto, a área de fôrma total será calculada pelas Equações (34) e (35) no caso de sapata quadrada ou retangular e Equações (36) e (37) quando for sapata circular.

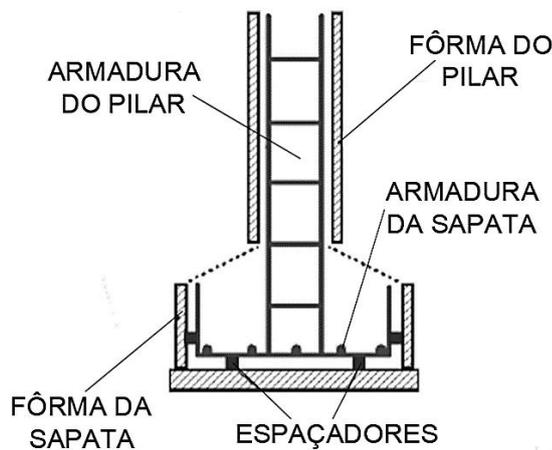


Figura 25 – Cálculo da área da fôrma
Fonte: Autoria própria, 2018.

$$A_{sap} = h_1 \times [2 \times (L + B)] \quad (34)$$

$$A_{pes} = [h - (h_1 + h_2)] \times [2 \times (L_0 + B_0)] \quad (35)$$

$$A_{sap} = h_1 \times (\pi \times D_s) \quad (36)$$

$$A_{pes} = [h - (h_1 + h_2)] \times [\pi \times D_p] \quad (37)$$

Em que:

D_s = diâmetro da sapata (m);

D_p = diâmetro do pilar (m).

3.3.6.4 Volume de concreto

O volume de concreto total é composto pela sapata e pescoço do pilar, ou seja, $V_{concreto} = V_{sap} + V_{pes}$. Portanto, o volume de concreto total será calculado pelas Equações (38) e (39) no caso de sapata quadrada ou retangular e Equações (40) e (41) quando for sapata circular.

A dedução dessas equações foi realizada com o auxílio das fórmulas do volume de tronco de pirâmide, visto anteriormente na Figura 23 e volume do tronco de cone reto, mostrado na Figura 26.

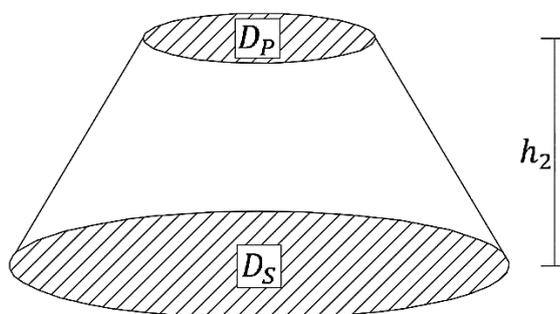


Figura 26 – Cálculo do volume de concreto da sapata circular através do volume do tronco de cone
Fonte: Autoria própria, 2018.

$$V_{sap} = [h_1 \times L \times B] + \frac{h_2}{3} \times [(L \times B) + (L_0 \times B_0) + \sqrt{L \times B \times L_0 \times B_0}] \quad (38)$$

$$V_{pes} = [h - (h_1 + h_2)] \times [L_0 \times B_0] \quad (39)$$

$$V_{sap} = \left[h_1 \times \frac{\pi \times D_s^2}{4} \right] + \frac{\pi \times h_2}{12} \times [D_s^2 + (D_s \times D_p) + D_p^2] \quad (40)$$

$$V_{pes} = [h - (h_1 + h_2)] \times \left[\frac{\pi \times D_p^2}{4} \right] \quad (41)$$

3.3.6.5 Volume de reaterro

Segundo Soares (2015), no cálculo do volume de reaterro deve ser considerado o empolamento do material (20 a 30%). Esse volume será calculado pela Equação (42), onde foi considerado um empolamento de 20% (Ver Figura 27).

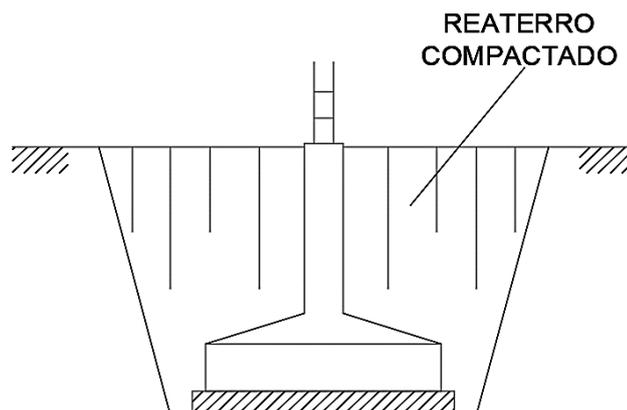


Figura 27 – Cálculo do volume de reaterro
Fonte: Autoria própria, 2018.

$$V_{rea} = [V_{esc} - (V_{mag} + V_{sap} + V_{pes})] \times 1,2 \quad (42)$$

3.3.6.6 Peso da armadura

A taxa de armadura da sapata é geralmente de 50 a 60 kg/m³ de concreto, segundo Soares (2015). Portanto, o algoritmo do programa irá considerar uma taxa de armadura de 55 kg/m³ de concreto.

3.3.7 Orçamento das sapatas

Como os preços unitários dos serviços podem variar com o tempo e região, o programa vai dar a opção de o usuário fornecer esses preços unitários e a partir disso irá fazer a estimativa dos custos por meio das equações deduzidas no levantamento de quantidades, na seção 3.3.6.

4 APLICAÇÃO PRÁTICA DO PROGRAMA

Foi desenvolvido um programa de fácil utilização ao usuário com dados de entrada acessíveis, de modo a facilitar e incentivar o uso do mesmo no dimensionamento de sapatas. A interface inicial do GeoDim 1.0, disponível imediatamente ao abrir o programa, é mostrada na Figura 28.

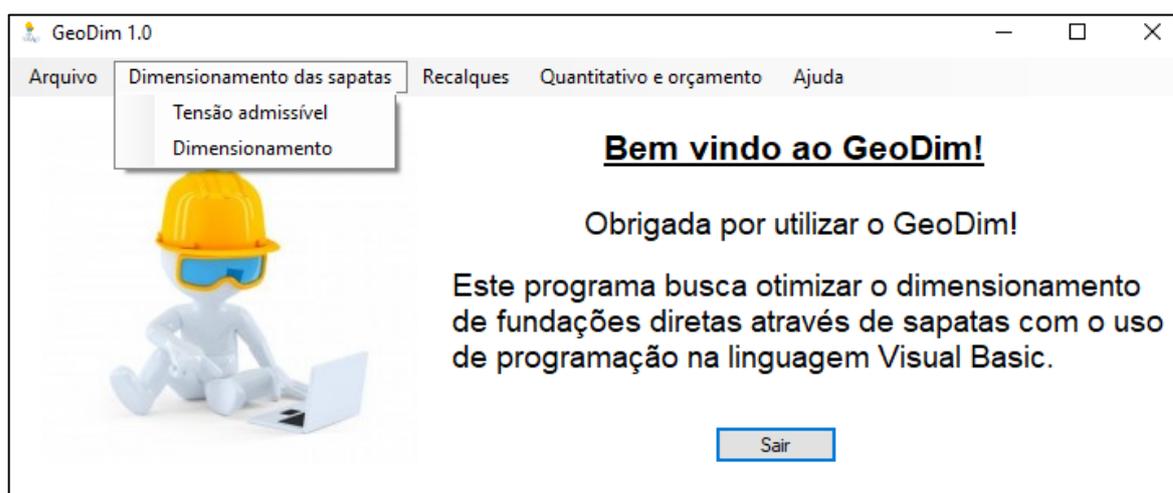


Figura 28 – Interface inicial do GeoDim 1.0
Fonte: Autoria própria, 2018.

O diagrama hierárquico de utilização do programa deve seguir a ordem mostrada na Figura 29, ou seja, primeiro o usuário deve calcular a tensão admissível do solo, em seguida realizar o dimensionamento das sapatas, calcular o recalque pela Teoria da Elasticidade ou pelo Método Schmertmann (1978) e por último calcular o quantitativo e orçamento dessas sapatas.

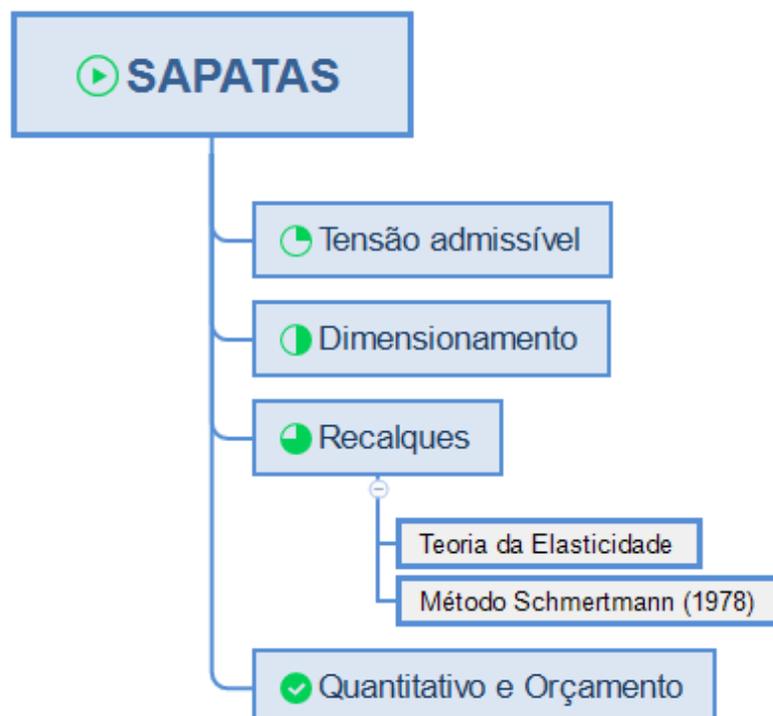


Figura 29 – Diagrama hierárquico de utilização do programa
 Fonte: Autoria própria, 2018.

Como toda a metodologia de cálculo já foi descrita na seção 3, neste capítulo veremos apenas a aplicação do programa para 9 pilares fictícios e um perfil de sondagem real, com o furo da sondagem executado na Rua Noberto de Castro Nogueira, no Bairro Bessa, em João Pessoa - PB.

O perfil de sondagem utilizado neste exemplo de aplicação encontra-se no ANEXO A e foi disponibilizado pela empresa Engeobase (2018). Podemos concluir que seria economicamente inviável a execução de sapatas isoladas nesse terreno, visto que até a profundidade de 4 m o N_{SPT} é baixo, variando entre 6 e 10. Entretanto, para que seja economicamente viável utilizar esse perfil de sondagem no dimensionamento de sapatas isoladas, foi admitido que até essa profundidade ocorreu um melhoramento do solo.

Com esse melhoramento, foi previsto que o N_{SPT} aumentasse em 100% até a profundidade de 4 m. Portanto, a Tabela 6 apresenta os valores do N_{SPT} , em função da profundidade, antes e após o melhoramento do solo.

Tabela 6 – Perfil de sondagem antes e após o melhoramento do solo

Prof. (m)	N_{SPT}	
	Sem melhoramento	Com melhoramento
1	10	20
2	10	20
3	6	12
4	6	12
5	25	25
6	6	6
7	2	2
8	3	3
9	2	2
10	2/5	2/5
11	1/2	1/2
12	2/5	2/5
13	4	4
14	7	7
15	12	12
16	10	10
17	13	13
18	9	9
19	7	7
20	8	8

Fonte: Autoria própria, 2018.

A planta de locação dos pilares encontra-se na Figura 30 e na Tabela 7 estão disponíveis os dados de entrada referente as dimensões, tipo de seção e a carga máxima proveniente desses pilares.

Tabela 7 – Dimensões e carga máxima nos pilares

Pilar	Seção	Dimensões (m)		Carga máxima (tf)
		B_0		
1	Quadrada	0,3		65,1
2	Quadrada	0,3		78,2
3	Quadrada	0,3		80,6
		L_0	B_0	
4	Retangular	0,6	0,22	74,4
5	Retangular	0,6	0,22	86,9
6	Retangular	0,6	0,22	92,3
		D_p		
7	Circular	0,35		46,7
8	Circular	0,35		55,6
9	Circular	0,35		86,2

Fonte: Autoria própria, 2018.

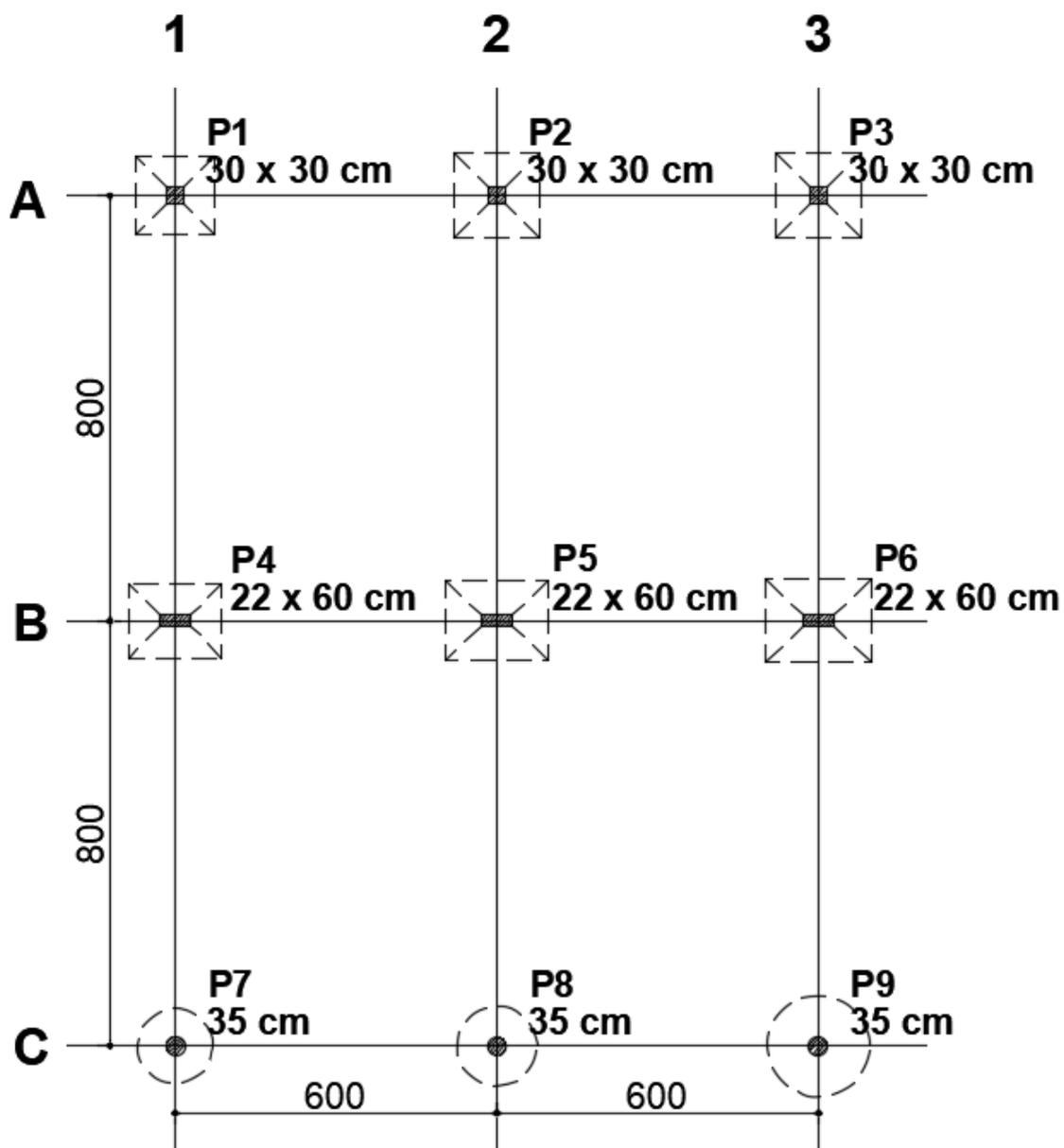


Figura 30 – Planta de localização dos pilares
 Fonte: Autoria própria, 2018.

Os dados de entrada referente ao preço unitário dos serviços necessários na execução de uma sapata encontram-se na Tabela 8. Os outros dados de entrada que precisam ser fornecidos pelo usuário estão na Tabela 9.

Tabela 8 – Preço unitário dos serviços

Serviço	Unidade	Preço unitário (R\$)
Escavação	m ³	63,67
Concreto magro	m ²	18,68
Fôrma	m ²	166,06
Concretagem	m ³	452,02
Reaterro	m ³	18,23
Armação	kg	10,84

Fonte: SINAPI, 2018.

Tabela 9 – Outros dados de entrada

Peso específico do solo acima da base da sapata	tf/m ³	1,6
Peso específico do solo abaixo da base da sapata	tf/m ³	1,8
Altura de embutimento (ou profundidade) da sapata	m	1,0
Altura do rodapé da sapata	m	0,1
Altura do cuscuz da sapata	m	0,2
Inclinação do talude de escavação	m/m	1:1

Fonte: Autoria própria, 2018.

A partir do recolhimento desses dados de entrada foi possível utilizar todos os recursos do programa. Primeiramente, foi calculada a tensão admissível do solo e para isso, foi considerado que o bulbo de tensões atingia as duas camadas que estão logo abaixo da sapata, ou seja, a altura do bulbo seria de 3,73 m e a tensão admissível do solo utilizada no dimensionamento das sapatas foi de 35,24 tf/m², como mostra a Figura 31.

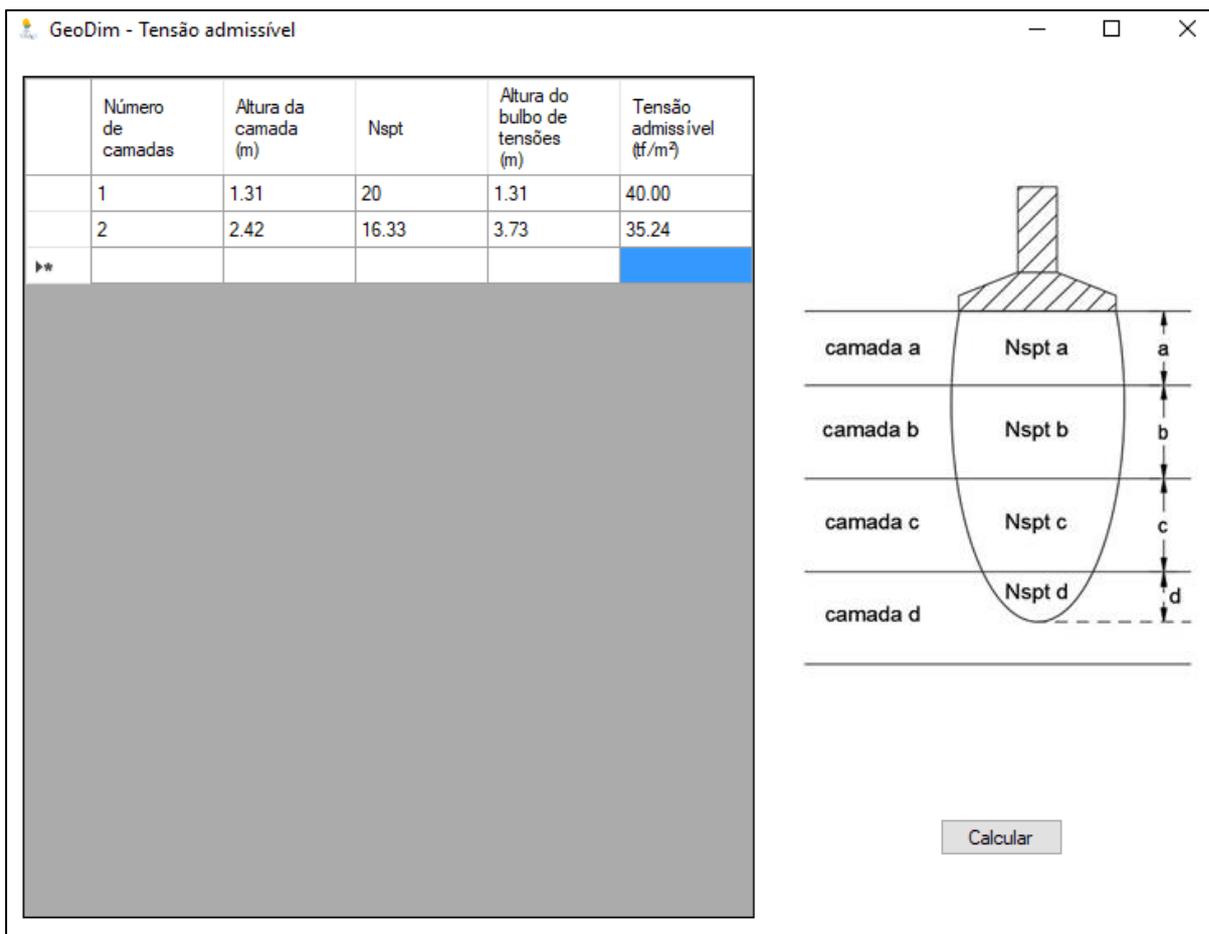


Figura 31 – Cálculo da tensão admissível do solo pelo GeoDim 1.0
 Fonte: Autoria própria, 2018.

Com essa tensão admissível, dimensões dos pilares e a carga máxima proveniente de cada pilar (Tabela 7) tornou-se possível dimensionar as sapatas quadradas, retangulares e circulares, como mostra as Figuras 32, 33 e 34 respectivamente. Em seguida, a tabela foi atualizada para que no cálculo de recalques seja considerada as dimensões calculadas pelo programa. Importante lembrar que, como dito na seção 3.3.2, o usuário pode alterar as dimensões calculadas pelo programa e mesmo que não tenha havido nenhuma alteração nessas dimensões, o usuário deve sempre clicar no botão “ATUALIZAR TABELA”. Logo, o programa irá apresentar uma mensagem dizendo que a tabela foi atualizada e o mesmo poderá proceder ao cálculo de recalques.

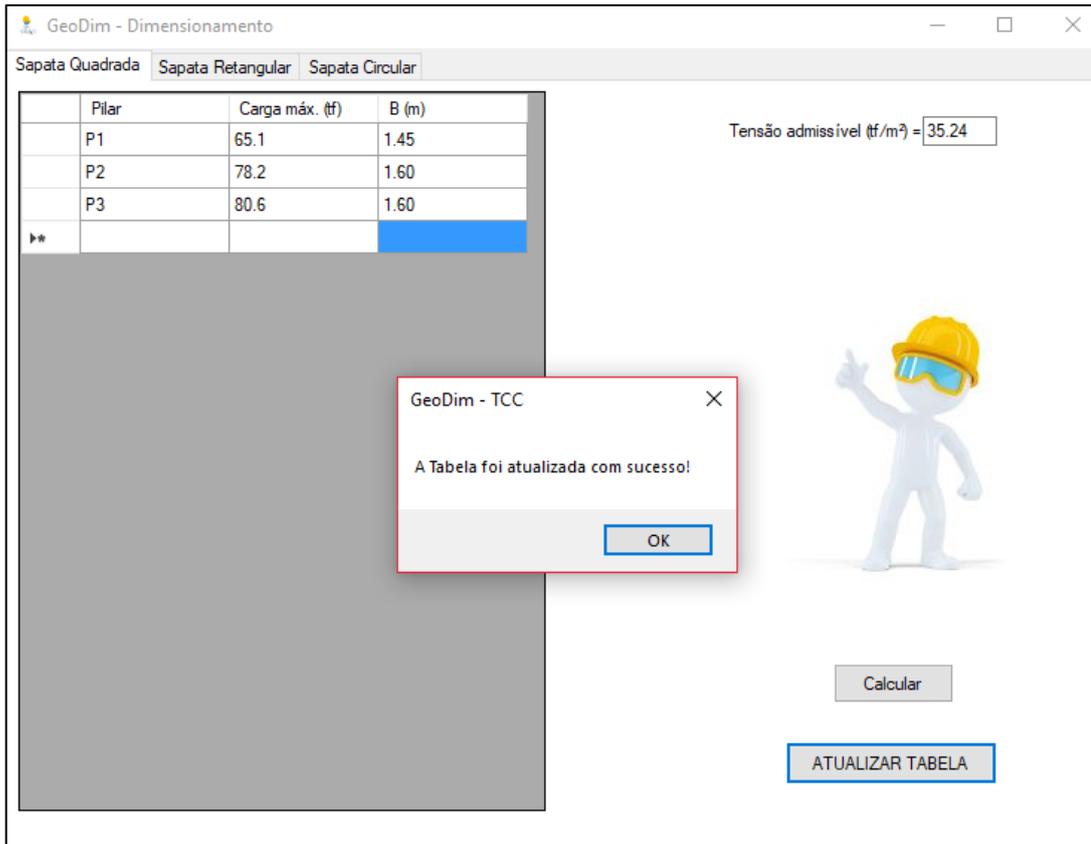


Figura 32 – Dimensionamento das sapatas quadradas pelo GeoDim 1.0
Fonte: Autoria própria, 2018.

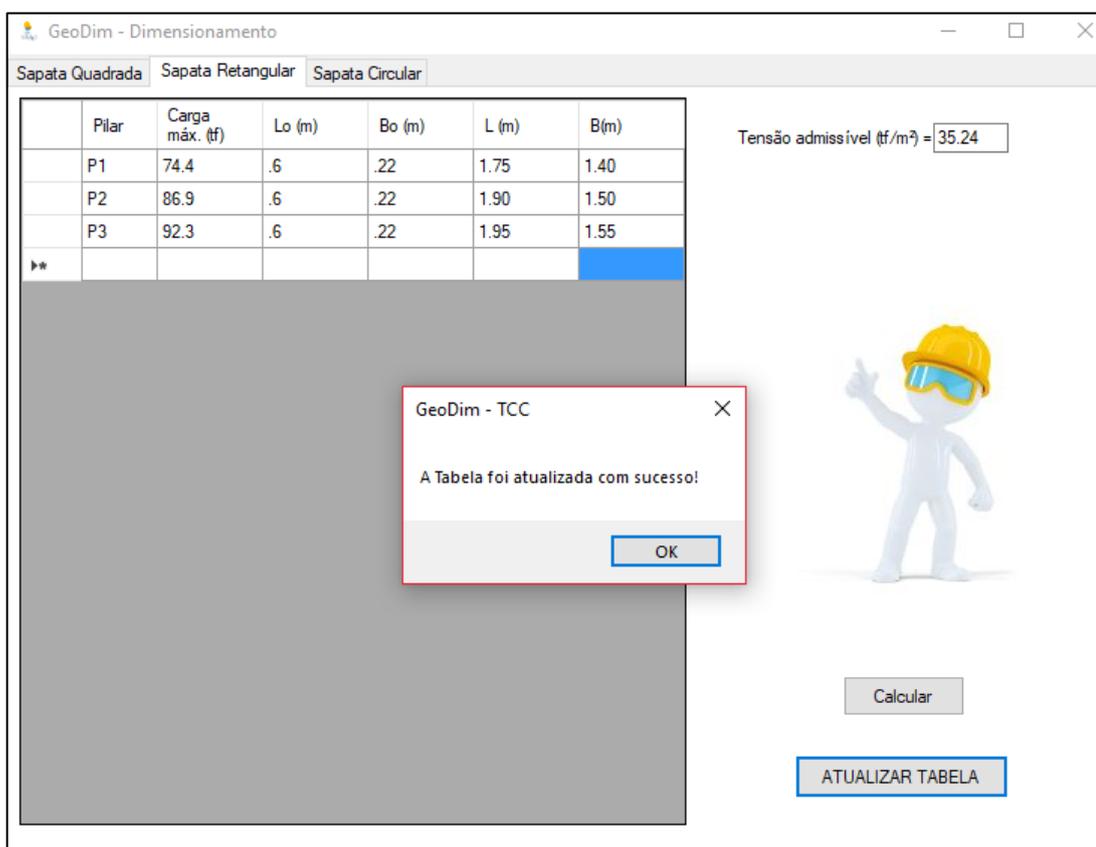


Figura 33 – Dimensionamento das sapatas retangulares pelo GeoDim 1.0
Fonte: Autoria própria, 2018.

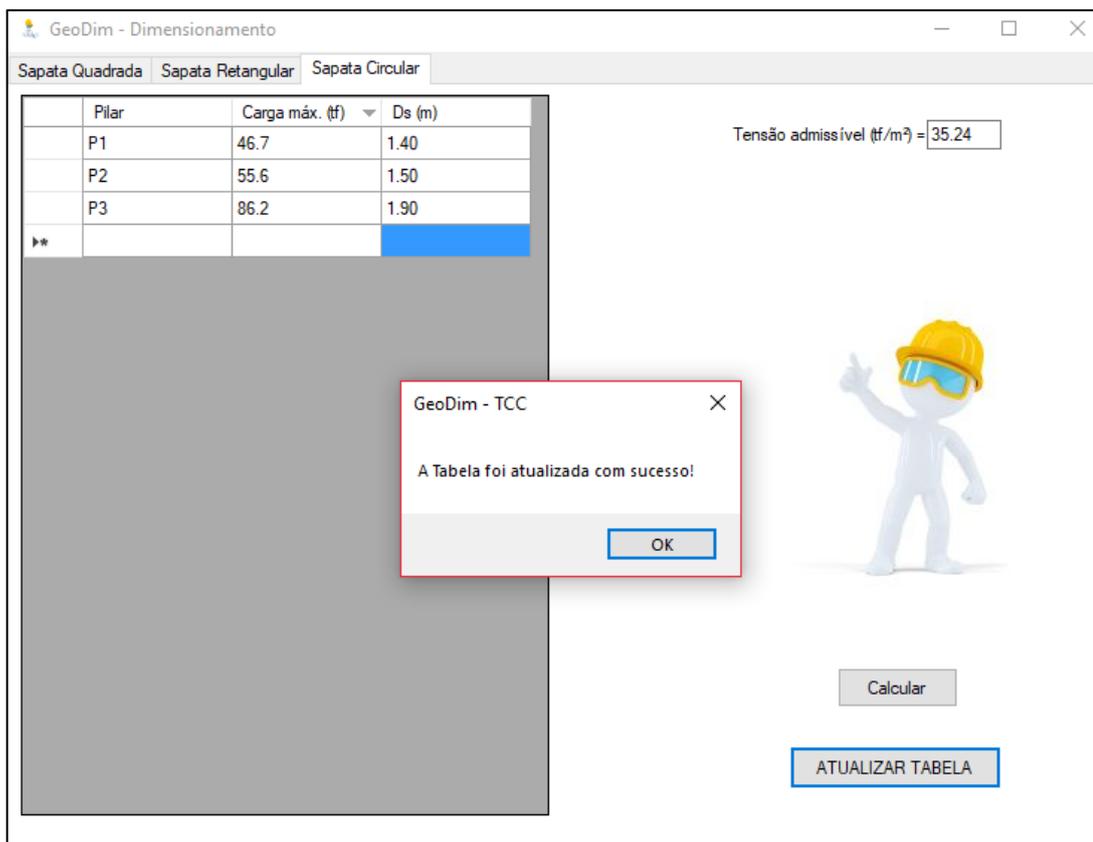


Figura 34 – Dimensionamento das sapatas circulares pelo GeoDim 1.0
 Fonte: Autoria própria, 2018.

No cálculo de recalques pela Teoria da elasticidade, descrito na seção 3.3.4, os recalques foram calculados até a última camada de solo presente no perfil de sondagem do ANEXO A.

Como mostra a Figura 35, os dados de entrada do perfil de sondagem foram fornecidos ao programa e logo em seguida o resultado do cálculo de recalques por esse método é apresentado na Figura 36.

GeoDim - Recalque pela Teoria da elasticidade

Dados de entrada Cálculo do recalque

	Número de camadas	Altura da camada (m)	Nspt	Tipo de solo	Tipo de solo
	1	1.31	20	Areia	Areia siltosa
	2	2.42	16.33	Areia	Areia siltosa
	3	1.37	15.5	Areia	Areia siltosa
	4	2.07	3.67	Silte	Silte arenoso
	5	3.94	0.825	Silte	Silte argiloso
	6	2.51	5.5	Silte	Silte arenoso
	7	5.83	9.83	Silte	Silte arenoso
*					

Figura 35 – Dados de entrada no cálculo de recalques pela Teoria da elasticidade
Fonte: Autoria própria, 2018.

GeoDim - Recalque pela Teoria da elasticidade

Dados de entrada Cálculo do recalque

Sapata Quadrada		
Sapata	Recalque imediato (mm)	
S1	37.98	
S2	43.53	
S3	44.87	
*		

Sapata Retangular		
Sapata	Recalque imediato (mm)	
S1	41.78	
S2	47.02	
S3	49.23	
*		

Sapata Circular		
Sapata	Recalque imediato (mm)	
S1	35.27	
S2	40.65	
S3	56.08	
*		

Calcular Recalque imediato

Calcular Recalque imediato

Calcular Recalque imediato

Figura 36 – Resultado do cálculo de recalques pela Teoria da elasticidade
Fonte: Autoria própria, 2018.

Já no cálculo de recalques pelo método Schmertmann (1978), descrito na seção 3.3.5, o usuário deverá fornecer o perfil de sondagem até a profundidade de 16 m contada a partir da cota de assentamento das sapatas, já que nesse método a altura do “bulbo” de recalques é fixa e não pode ser definida pelo usuário.

Como mostra a Figura 37, alguns dos dados de entrada da Tabela 9 (peso específico do solo e profundidade da sapata) foram fornecidos ao programa e logo em seguida o resultado do cálculo de recalques por esse método é apresentado na Figura 38.

GeoDim - Recalque por Schmertmann (1978)

Dados de entrada Cálculo do recalque

Profundidade (m)	Nspt	Tipo de solo	Tipo de solo
0	20	Areia	Areia siltosa
1	20	Areia	Areia siltosa
2	12	Areia	Areia siltosa
3	12	Areia	Areia siltosa
4	25	Areia	Areia siltosa
5	6	Areia	Areia siltosa
6	2	Silte	Silte arenoso
7	3	Silte	Silte arenoso
8	2	Silte	Silte argiloso
9	.4	Silte	Silte argiloso
10	.5	Silte	Silte argiloso
11	.4	Silte	Silte argiloso

Peso específico do solo

γ_1 (tf/m³) = 1.6

γ_2 (tf/m³) = 1.8

h (m) = 1

?

Prof. (m)	
1	Nspt (1m)
2	Nspt (2m)
3	Nspt (3m)
4	Nspt (4m)
5	Nspt (5m)
6	Nspt (6m)
7	Nspt (7m)
8	Nspt (8m)
9	Nspt (9m)

Figura 37 – Dados de entrada no cálculo de recalques pelo método Schmertmann
Fonte: Autoria própria, 2018.

GeoDim - Recalque por Schmertmann (1978)

Dados de entrada Cálculo do recalque

Sapata Quadrada	
Sapata	Recalque imediato (mm)
S1	11.88
S2	13.16
S3	13.68

Sapata Retangular	
Sapata	Recalque imediato (mm)
S1	12.39
S2	13.61
S3	14.11

Sapata Circular	
Sapata	Recalque imediato (mm)
S1	9.52
S2	10.88
S3	13.86

Calcular Recalque imediato

Calcular Recalque imediato

Calcular Recalque imediato

Figura 38 – Resultado do cálculo de recalques pelo método Schmertmann
Fonte: Autoria própria, 2018.

Por fim, para obter o quantitativo e orçamento dessas sapatas, descritos nas seções 3.3.6 e 3.3.7, foram fornecidos os preços unitários da Tabela 8 e alguns dos dados de entrada da Tabela 9 (inclinação do talude de escavação, altura do rodapé e cuscuz da sapata). Dessa forma, o quantitativo e orçamento das sapatas quadradas, retangulares e circulares é apresentado nas Figuras 39, 40 e 41 respectivamente.

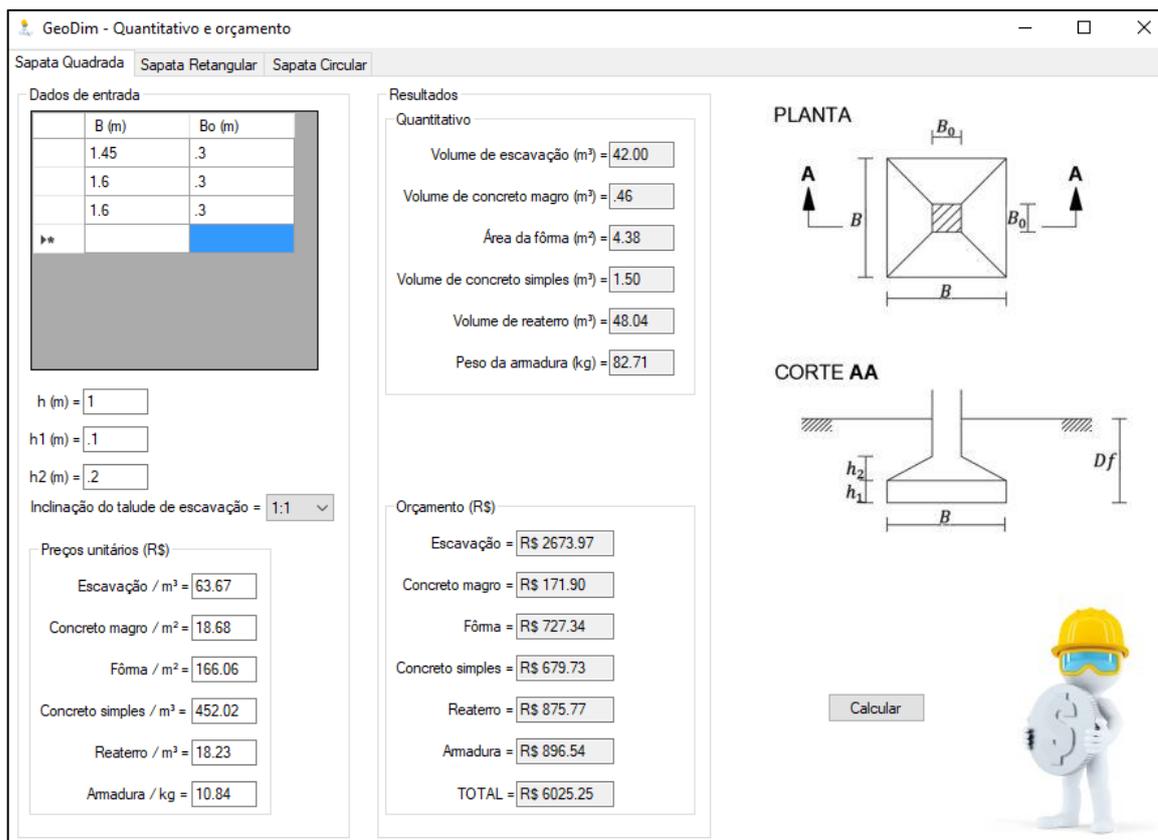


Figura 39 – Quantitativo e orçamento das sapatas quadradas pelo GeoDim 1.0
Fonte: Autoria própria, 2018.

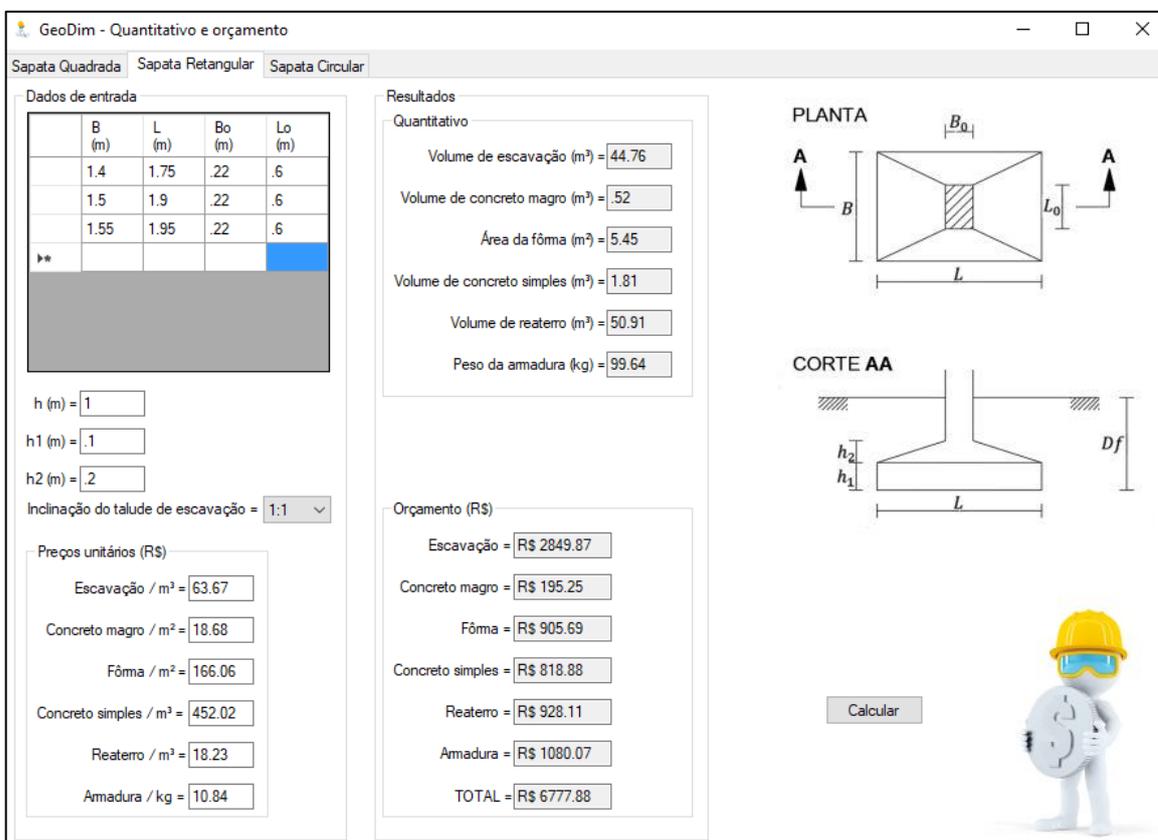


Figura 40 – Quantitativo e orçamento das sapatas retangulares pelo GeoDim 1.0
Fonte: Autoria própria, 2018.

GeoDim - Quantidade e orçamento

Sapata Quadrada Sapata Retangular Sapata Circular

Dados de entrada

	Ds (m)	Dp (m)
	1.4	.35
	1.5	.35
	1.9	.35
»		

h (m) =

h1 (m) =

h2 (m) =

Inclinação do talude de escavação =

Preços unitários (R\$)

Escavação / m³ =

Concreto magro / m² =

Fôrma / m² =

Concreto simples / m³ =

Reatero / m³ =

Amadura / kg =

Resultados

Quantitativo

Volume de escavação (m³) =

Volume de concreto magro (m³) =

Área da fôrma (m²) =

Volume de concreto simples (m³) =

Volume de reatero (m³) =

Peso da amadura (kg) =

Orçamento (R\$)

Escavação =

Concreto magro =

Fôrma =

Concreto simples =

Reatero =

Amadura =

TOTAL =

PLANTA

CORTE AA

Calcular

Figura 41 – Quantidade e orçamento das sapatas circulares pelo GeoDim 1.0
 Fonte: Autoria própria, 2018.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será discutido os resultados obtidos pela aplicação prática do programa, mostrada na seção anterior. Em relação ao resultado do dimensionamento das sapatas, o mesmo encontra-se resumido na Tabela 10 e podemos perceber que as dimensões dessas sapatas estão muito próximas e poderiam ter sido uniformizadas pelo usuário. Como explicado na seção 3.3.2, o programa é flexível pelo fato de permitir que isso seja realizado cabendo ao próprio usuário decidir quais sapatas deseja uniformizar. Essa ferramenta mostra-se bastante útil na prática, visto que facilita a execução na obra e reduz significativamente gastos com fôrmas.

Tabela 10 – Resultado do dimensionamento das sapatas

Sapata	Seção	Dimensões (m)	
		<i>B</i>	
1	Quadrada	1,45	
2	Quadrada	1,6	
3	Quadrada	1,6	
		<i>L</i>	<i>B</i>
4	Retangular	1,75	1,4
5	Retangular	1,9	1,5
6	Retangular	1,95	1,55
		<i>D_S</i>	
7	Circular	1,4	
8	Circular	1,5	
9	Circular	1,9	

Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Tabela 11 podemos comparar o resultado do cálculo de recalques para os métodos da Teoria da elasticidade e Schmertmann (1978) obtidos através do software. É notório que a diferença entre os valores de recalques é bastante significativa entre esses dois métodos e isso está de acordo com o que foi discutido nas seções 3.3.4 e 3.3.5, ou seja, a Teoria da elasticidade é aplicada quando temos um **meio elástico homogêneo** (E_s constante com a profundidade) e o método Schmertmann (1978) é aplicado quando temos um **meio elástico não homogêneo** (E_s variável com a profundidade). Portanto, com base em pesquisas anteriores, essa diferença entre os recalques estimados por esses dois métodos já seria esperada, visto que eles são utilizados em situações distintas.

Tabela 11 – Resultado do cálculo de recalques das sapatas

Sapata	Seção	Recalque imediato (mm)	
		Teoria da elasticidade	Schmertmann (1978)
1	Quadrada	37,98	11,88
2	Quadrada	43,53	13,16
3	Quadrada	44,87	13,68
4	Retangular	41,78	12,39
5	Retangular	47,02	13,61
6	Retangular	49,23	14,11
7	Circular	35,27	9,52
8	Circular	40,65	10,88
9	Circular	56,08	13,86

Fonte: Autoria própria, 2018.

Em relação ao coeficiente α , apresentado na Tabela 4 da seção 3.3.3, o mesmo leva em conta apenas a primeira fração de solo e, portanto, para efeito de comparação, foi realizado o cálculo de recalques considerando uma média desse coeficiente quando a camada de solo apresentar mais de uma fração de solo.

Logo, para o exemplo de aplicação do programa exposto na seção 4, os novos valores de α são apresentados na Tabela 12 e os recalques imediatos pela Teoria da elasticidade com a modificação desse α são mostrados na Tabela 13.

Tabela 12 – Dados de entrada com o coef. α modificado no cálculo de recalques pela Teoria da elasticidade

Número de camadas	Altura da camada (m)	α	K (MPa)	N_{SPT}
1	1,31	4	0,7	20
2	2,42	4	0,7	16,33
3	1,37	4	0,7	15,5
4	2,07	4	0,45	3,67
5	3,94	6	0,25	0,825
6	2,51	4	0,45	5,5
7	5,83	4	0,45	9,83

Fonte: Autoria própria, 2018.

Tabela 13 – Cálculo de recalques das sapatas pela Teoria da elasticidade modificado

Sapata	Seção	Recalque imediato (mm)
		Teoria da elasticidade modificado
1	Quadrada	32,75
2	Quadrada	37,62
3	Quadrada	38,77
4	Retangular	36,09
5	Retangular	40,68
6	Retangular	42,61
7	Circular	30,39
8	Circular	35,08
9	Circular	48,62

Fonte: Autoria própria, 2018.

Considerando os recalques imediatos calculados pelo método Schmertmann (1978) e pela Teoria da elasticidade, com e sem a modificação do coeficiente α , a distorção angular máxima ocorrerá entre as sapatas 1 e 2 e essa distorção não ultrapassa os limites estabelecidos por Bjerrum (1963), mostrados na Figura 9 da seção 2.4.1. Portanto, conclui-se que essa distorção angular máxima se encontra dentro do limite para o qual não ocorrerá danos na estrutura.

Enfim, nenhuma conclusão definitiva pode ser feita em relação a qual método se aproxima mais da realidade já que isso só seria possível se tivesse havido um controle de recalques, o que não é muito comum ocorrer na prática paraibana, apesar da NBR 6122/2010, no seu item 9.1, exigir que esse controle seja realizado no caso de estruturas com mais de 60 m de altura ou quando a relação altura/largura (menor dimensão) seja superior a quatro. Portanto, é necessário mudar essa cultura, pois a verificação do desempenho global das fundações é muito importante na prevenção de patologias nas estruturas.

Em relação ao resultado do quantitativo e orçamento das sapatas, ambos podem ser vistos resumidamente nas Tabelas 14 e 15 respectivamente. Nessa etapa não há nenhum comentário relevante a ser discutido.

Tabela 14 – Resultado do quantitativo das sapatas

Serviço	Unidade	Quantitativo das sapatas		
		Quadrada	Retangular	Circular
Escavação	m ³	42,0	44,76	43,27
Concreto magro	m ²	0,46	0,52	0,49
Fôrma	m ²	4,38	5,45	3,82
Concretagem	m ³	1,5	1,81	1,33
Reaterro	m ³	48,04	50,91	49,73
Armação	kg	82,71	99,64	73,31

Fonte: Autoria própria, 2018.

Tabela 15 – Resultado do orçamento das sapatas

Serviço	Orçamento das sapatas (R\$)		
	Quadrada	Retangular	Circular
Escavação	2673,97	2849,87	2755,03
Concreto magro	171,9	195,25	184,18
Fôrma	727,34	905,69	633,86
Concretagem	679,73	818,88	602,49
Reaterro	875,77	928,11	906,64
Armação	896,54	1080,07	794,67
TOTAL	R\$ 6025,25	R\$ 6777,88	R\$ 5876,87

Fonte: Autoria própria, 2018.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O software desenvolvido neste trabalho mostrou-se uma ferramenta eficaz para auxiliar o engenheiro na realização de um projeto de fundação em sapatas isoladas e revelou que é possível sim a automatização desses projetos mediante programação computacional, desde que a presença do engenheiro calculista de fundação não seja ignorada, tampouco substituída.

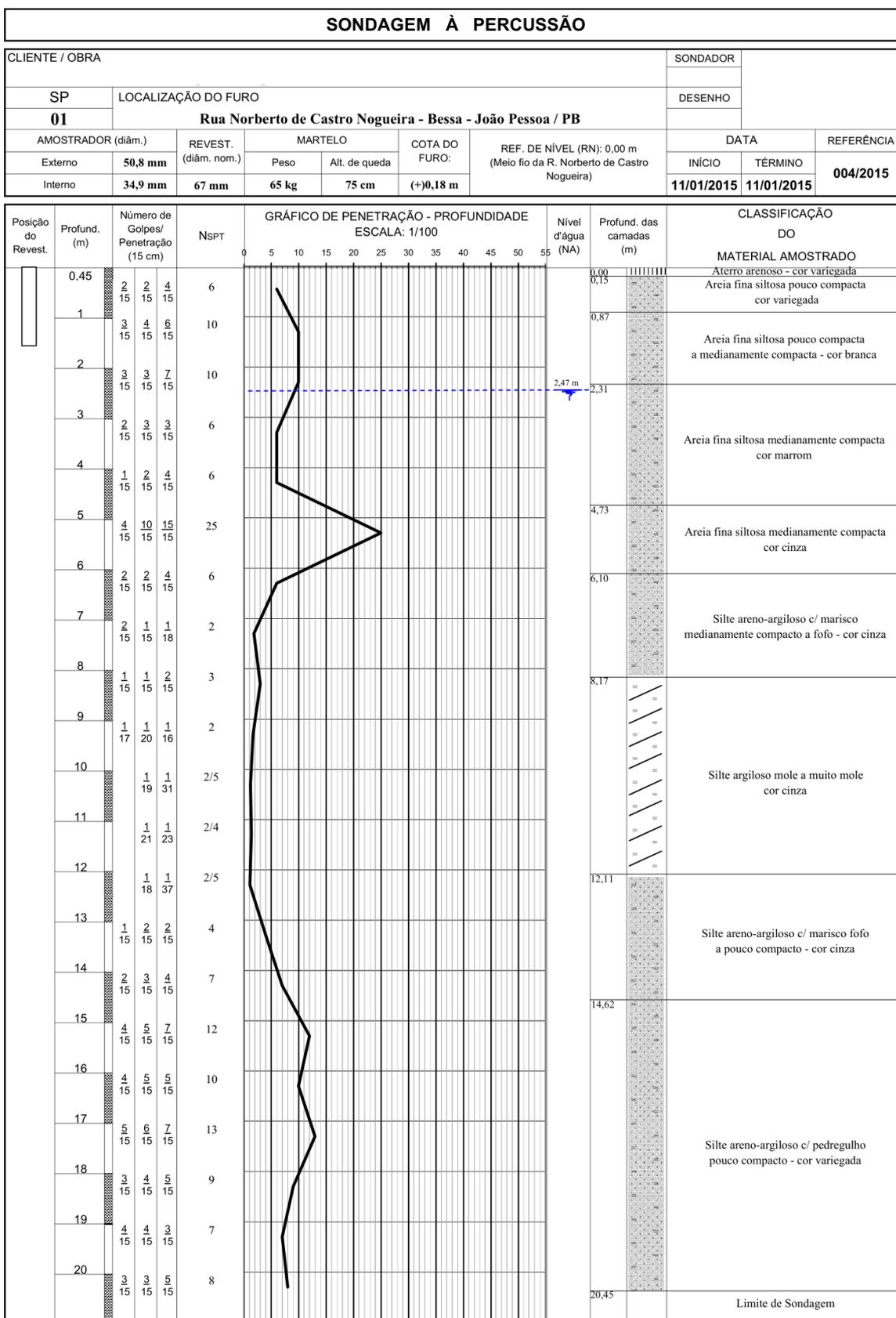
É importante destacar que o programa, assim como qualquer outro utilizado com o objetivo de auxiliar na elaboração dos projetos de engenharia, apenas realiza os cálculos definidos em seu algoritmo, ficando a cargo do usuário a obrigação de analisar a forma correta de utilizá-lo, investir em estudos geotécnicos eficientes, fornecer dados de entrada adequados e interpretar corretamente os resultados fornecidos pelo programa.

Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se a utilização do software em um caso que tenha havido o controle de recalques. Dessa forma, torna-se possível concluir se os métodos utilizados no algoritmo do mesmo se aproximam da realidade e qual desses métodos traz resultados mais satisfatórios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6122: **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010.
- ALONSO, U. R. **Exercícios de fundações**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2010.
- BJERRUM, L. **Allowable settlement of structures, Proceedings European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Wiesbaden, Alemanha, 1963.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas: Projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- DÉCOURT, L. **Palestra Milton Vargas: Quebrando Paradigmas na Engenharia de Fundações**. São Paulo: ABMS, 2017.
- ENGEObASE. **Engenharia de Fundações LTDA**. João Pessoa, Paraíba: Empresa especializada na investigação geotécnica do subsolo e na execução de fundações e obras de contenções, 2018.
- SARMENTO, F. J. **Notas de aula da disciplina Programação aplicada à engenharia**, ministrada pelo professor e engenheiro civil Francisco Jacomé Sarmento. João Pessoa, Paraíba: Universidade Federal da Paraíba, 2018.
- SIMONS, N. E.; MENZIES, B. K. **Introdução à engenharia de fundações**. Rio de Janeiro: Interciência, 1981.
- SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil). **Relatório de Insumos e Composições**. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_652>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2018.
- SOARES, F. L. **Notas de aula da disciplina Mecânica dos Solos II**, ministrada pelo professor e engenheiro civil Fábio Lopes Soares. João Pessoa, Paraíba: Universidade Federal da Paraíba, 2015.
- TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. **Fundações: teoria e prática**. São Paulo: Pini, 1996.
- TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- VESIC, A. S. **Bearing capacity of shallow foundations**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1975.

ANEXO A – Perfil de sondagem do terreno (SP 01)



Fonte: Engeobase, 2018.