

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ VITOR ARAÚJO CORRÊA

**DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO DE SAPATAS ISOLADAS
SUBMETIDAS A FORÇAS CONCENTRADAS ATRAVÉS DE
PROCESSO ITERATIVO**

São Luís

2016

JOSÉ VITOR ARAÚJO CORRÊA

**DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO DE SAPATAS ISOLADAS
SUBMETIDAS A FORÇAS CONCENTRADAS ATRAVÉS DE
PROCESSO ITERATIVO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para o grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar

Coorientador: Eng. Rafael Otávio Alves Abreu

São Luís

2016

Corrêa, José Vitor Araújo

Dimensionamento geométrico de sapatas isoladas submetidas
as forças concentradas através de processo iterativo / José Vitor Araújo
Corrêa . – São Luís, 2016.

95 folhas

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil
Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar

Coorientador: Eng. Rafael Otávio Alves Abreu

1. Sapatas. 2. Dimensionamento geométrico. 3. Método da bisseção.
Título.

CDU:624.012.45/.46

JOSÉ VITOR ARAÚJO CORRÊA

**DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO DE SAPATAS
ISOLADAS SUBMETIDAS A FORÇAS CONCENTRADAS ATRAVÉS
DE PROCESSO ITERATIVO**

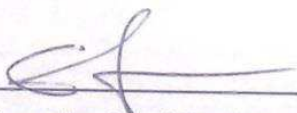
Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para o grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar.

Co-orientador: Rafael Otávio Alves Abreu

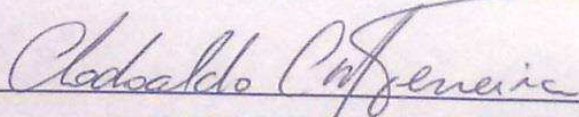
Aprovada em: 19/12/2016

BANCA EXAMINADORA



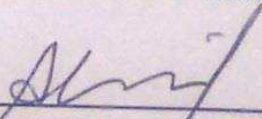
Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar (Orientador)

Universidade Estadual do Maranhão



Prof.º Me. Clodoaldo Cesar Malheiros Ferreira

Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Esp. Sólton Tupinambá Leite

Universidade Estadual do Maranhão

“Todo aquele, pois, que escuta estas
minhas palavras, e as pratica,
assemelhá-lo-ei ao homem prudente,
que edificou a sua casa sobre a rocha;
E desceu a chuva, e correram rios, e
assopraram ventos, e combateram
aquela casa, e não caiu, porque estava
edificada sobre a rocha.”
(Mateus 7:24,25 – Bíblia Sagrada
Cristã)

Dedico este trabalho a minha família: pai, mãe, esposa e filhas. Em particular a meu pai, José Corrêa, principal construtor da base de tudo que é bom em meu caráter.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela conclusão desse trabalho, assim como a do curso de Engenharia Civil, pois sou crédulo, e admito a existência de um ser divino e superior a mim, e a qualquer outro ser vivo, a quem chamo de Deus.

Agradeço especial e amorosamente a meus pais, José Corrêa e Raimunda P. Araújo, incansáveis investidores de fé inabalável e apoio incondicional a todos os bons projetos os quais me proponho.

Aos amigos de longa data, em especial José Alexandre, Diogo Leitão, Lailson Martins, Raimisom Rego, Adriano Ewerton, George Souza, Thiago Maranhão, Marcio João, Fabio Daniel e Luis Carlos. Essas pessoas sempre estiveram ao meu lado, reiterando dia a dia o significado da palavra amigo.

Aos amigos que fiz há menos tempo, que contribuem para a evolução saudável de nossa amizade e de alguma forma participaram do processo de construção desse trabalho, os quero levar para a vida toda. Agradeço a José Kleber, Reginaldo Cavalcante, Ana Paula Carvalho, Amanda Bastos, Ray Andrade, Newton Soares, Fernando Aragão, Hugo Camapum e Rodrigo Rocha.

Agradeço a minha amiga e irmã Nelsivania Galisa, apoio de muito valor nesse trabalho e na vida toda.

A toda a equipe de docentes da escola Aluizio de Azevedo, pela compreensão às minhas ausências. Em particular Diolinda, Giselia, Tânia e Carlos Magno.

À Márcia Cristina, minha amada esposa, que não poupou esforços para ajudar a escrever cada palavra desse trabalho e que sempre esteve presente nos momentos mais difíceis dessa caminhada.

Agradeço a Rafael Abreu, meu co-orientador e amigo, incansável na missão de me fazer concluir esse trabalho monográfico e o próprio curso de engenharia civil. Obrigado pela paciência em tirar todas as dúvidas provenientes desse processo.

Por fim agradeço meu orientador, o Prof. Eduardo Aguiar, que esteve presente durante a formulação desse trabalho e durante o curso de Engenharia Civil dedicou, por várias vezes, seu tempo para me ajudar a superar as dificuldades por mim encontradas nesse curso. É mais que digno de ser chamado de professor.

RESUMO

O objetivo desse trabalho é sugerir uma possibilidade de dimensionar geometricamente fundações superficiais, usando correlações empíricas, através de algoritmo computacional pautado no Método da Bissecção. As características básicas do solo, do elemento estrutural e o projeto das fundações são usados para simplificar o processo de projeto sem perder a confiabilidade. Por meio do trabalho de vários estudiosos da área de Engenharia Geotécnica, são expostos pontos de relevante importância no dimensionamento de fundações. É comentado também o caráter estrutural das fundações. Por fim, é verificada a funcionalidade do método por meio de exemplos contidos na literatura que são refeitos com o algoritmo.

Palavras Chave: Sapatas, Dimensionamento Geométrico, Método da Bissecção.

ABSTRACT

The objective of this work is to suggest the possibility of geometric sizing of superficial foundations using empirical correlations through computational algorithm based on the Bisection Method. Basic characteristics of the soil the structural element and the foundations design are used to simplify the design process without losing reliability. Through the work of several scholars in the area of Geotechnical Engineering are exposed of relevant importance points in the design of foundations. The structural character of the foundations is also commented on. Finally, the functionality of the method is checked by examples contained in the literature which are redone with the algorithm.

Keywords: Shallow Foundations, Geometric Dimensioning, Bisection Method.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Classificação das fundações.....	14
2.2 Sapatas	15
3 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS	19
3.1 Definições	19
3.2 Identificação.....	20
3.2.1 Identificação Visual - Tátil	20
3.2.2 Identificação do solo segundo as dimensões dos grãos.....	21
3.3 Investigação do solo.....	24
3.3.1 Métodos de investigação do subsolo	25
3.3.2 Métodos diretos	25
3.3.1.1 Poços de inspeção	25
3.3.1.2 Sondagem à percussão.....	26
3.3.3 Métodos indiretos	30
3.3.3.1 Métodos geofísicos.....	30
3.3.3.2 Sensoriamento Remoto	30
4 CAPACIDADE DE CARGA.....	32
4.1 Definição	32
4.2. Modos de Ruptura	33
4.3. Métodos teóricos para determinação da capacidade de carga.....	34
4.3.1. Métodos de Terzaghi	34
4.3.3.1 Solo sem peso e sapata à superfície	37
4.3.3.1 Solo não coesivo sem peso	37
4.3.3.3 Solo não coesivo e sapata à superfície	37
4.3.3.4 Superposição de Efeitos.....	38
4.3.3.5 Efeitos de forma da sapata	38
4.3.2. Outros métodos de determinação da capacidade de carga.....	40
4.3.2.1 Método de Skempton	40
4.3.2.2 Método de Meyerhof	40
4.3.2.3 Método de Brinch Hansen.....	41
5 TENSÃO ADMISSÍVEL	42

5.1 Bulbo de tensões	44
5.2 Tensão admissível em fundações por sapatas.....	45
5.2.1 Prova de carga sobre placa	46
5.2.2 Métodos teóricos	46
5.2.3 Métodos empíricos	47
6 DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO DE SAPATAS	49
6.1 Descrição do Processo de Dimensionamento	49
6.2 Descrição do Processo de Dimensionamento por meio de Algoritmo	52
6.2.1 Método da Bissecção.....	53
6.2.2 Exemplos	56
7 Conclusões.....	69
7.1 Sugestões para trabalhos futuros	69
REFERÊNCIAS	70
Apêndice A – Organograma do algoritmo	74
Anexo A – Algoritmo para os Exemplos	78
Exemplo 1A	78
Exemplo 1B	81
Exemplo 1C	84
Exemplo 2A	87
Exemplo 2B	90
Exemplo 2C	93

1 INTRODUÇÃO

Em se tratando de construção civil, segundo Berberian (1996), numa visão geral, a estrutura de uma edificação tem duas partes básicas: superestrutura e infraestrutura. A superestrutura é a parte da edificação que fica acima do nível do solo, ou seja, se projeta para fora dele. A infraestrutura é a parte que está abaixo da linha do solo.

Na infraestrutura encontram-se os elementos que suportam e transmitem para o solo as cargas provenientes da superestrutura. Ao conjunto de elementos estruturais da infraestrutura juntamente com o solo dá-se o nome de fundações. Percebe-se então que há nas fundações dois elementos: o solo e o elemento estrutural. Tanto no estudo teórico quanto na prática da construção civil, é comum referenciar-se a fundações apenas como o elemento estrutural, sem mencionar o solo.

As fundações são de extrema importância no processo construtivo da edificação. O elemento estrutural deve possuir a resistência adequada para suportar as tensões causadas pelos esforços solicitantes, oriundos da superestrutura. Além disso, o solo deve apresentar resistência e rigidez apropriadas, para não sofrer ruptura nem deformações acentuadas ou diferenciais. Essas deformações são chamadas de recalques.

A escolha do tipo de fundação e seu dimensionamento, feitos de forma correta concedem segurança e longevidade a obra. Já a negligência com relação a estes itens pode causar colapso da superestrutura e culminar no desabamento da obra.

O presente trabalho propõe um processo de dimensionamento geométrico de elementos de fundação por sapatas retangulares, sujeitas a carga vertical centrada, sem a ação de momentos ou solicitações horizontais.

O processo tem como base o Método da Bissecção, um método numérico empregado no cálculo de raízes de funções. Sendo assim, este método será empregado na solução da função que retrata a diferença entre a tensão admissível suportada pelo solo (determinada através da sondagem SPT) e a tensão aplicada pela sapata. Fez-se uso de uma ferramenta computacional, a linguagem de

programação Python. Esta ferramenta é utilizada para criar um algoritmo que execute o cálculo do dimensionamento geométrico do elemento de fundação, determinando as dimensões da base do elemento.

Este trabalho está organizado de forma que no capítulo 1 é apresentada uma breve revisão sobre o tema fundações com ênfase nas principais características das sapatas.

No capítulo 2 são apresentadas características dos solos que estão intrinsecamente ligadas ao projeto de fundações.

O capítulo 3 discorre sobre a capacidade de carga nos solos, tendo como base principal os trabalhos de Terzaghi (1943) e abordando outros pesquisadores do mesmo tema.

Já o capítulo 4 tem como tema a tensão admissível no solo, item de extrema importância no projeto de fundações. Este capítulo expõe, em particular, métodos de obtenção desse dado baseados nos trabalhos dos principais pesquisadores desse tema, no ramo da Engenharia Geotécnica.

Por fim, o capítulo 5 trata do dimensionamento geométrico de elementos de fundação por sapatas, expondo o método de dimensionamento sugerido nesse trabalho. Posteriormente, são feitas considerações acerca do processo assim como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Classificação das fundações

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011) há maneiras distintas de classificar os elementos estruturais da fundação. Uma dessas formas leva em conta a profundidade na qual está assentada a base ou a ponta do elemento de fundação. Esta classificação dá origem a dois grandes grupos: fundações rasas, também chamadas de superficiais e fundações profundas.

Outra forma de classificação leva em consideração a maneira como o elemento estrutural transmite as cargas para o solo. Desse ponto de vista as fundações classificam-se em diretas e indiretas.

De acordo com a ABNT NBR 6122:2010, no item 3.1, as fundações diretas ou superficiais são aquelas em que a carga é transmitida ao solo, predominantemente pelas tensões distribuídas sob a base do elemento estrutural de fundação, estando este assentado a uma profundidade inferior a duas vezes o valor da menor dimensão do elemento estrutural da fundação. Enquadram-se nessa definição os seguintes elementos de fundação:

- Sapatas;
- Radiês;
- Vigas de fundação;
- Blocos;

Karl Terzaghi é considerado o pai da mecânica dos solos, e foi também um dos pioneiros no estudo da engenharia geotécnica. Terzaghi (1943) classifica como fundações rasas aquelas que estão assentadas a uma profundidade menor que o valor da menor dimensão da fundação.

O item 3.7 da ABNT NBR 6122:2010 define como fundação profunda aquela que transmite a carga proveniente da superestrutura ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste), ou pela combinação das duas. Além disto, segundo essa norma, nas fundações profundas a profundidade de assentamento deve ser maior que o dobro da menor dimensão em planta do elemento de fundação. Nesse perfil se enquadram:

- Estacas;
- Tubulões;
- Caixões.

2.2 Sapatas

“As sapatas são elementos de fundação superficial, de concreto armado, dimensionado de maneira que tensões de tração nele resultante sejam resistidas pelo emprego de armadura especialmente disposta para esse fim.” (ABNT NBR 6122:2010, p. 2). A sapata é um elemento de fundação amplamente utilizado em obras de construção civil.

As sapatas podem ser classificadas como:

- Sapatas isoladas: elementos de concreto armado dimensionados de forma que as tensões de tração geradas não sejam resistidas pelo concreto e sim pelo aço;
- Sapatas corridas: sapata sujeita a ação de uma carga distribuída linearmente;
- Sapatas associadas: sapata comum a vários pilares cujos centros gravitacionais não estejam situados no mesmo alinhamento.

Figura 1 – Sapata Isolada

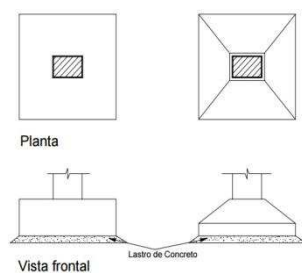


Figura 2 – Sapata corrida

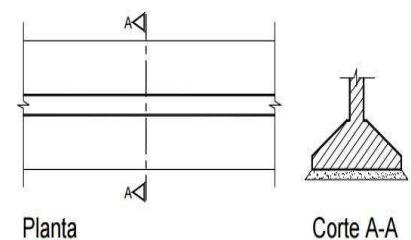
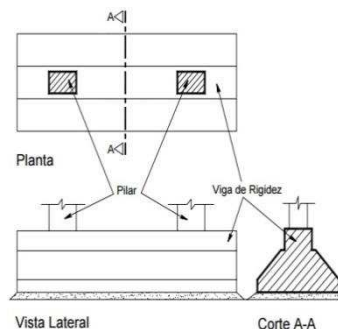


Figura 3 – Sapata associada



Cada um desses tipos de sapa é utilizado segundo uma necessidade específica. O mais comum entre eles é a sapata isolada. Esse elemento recebe a carga de apenas um pilar.

Alonso (1983) indica que, em princípio, o emprego de sapatas só é viável técnica e economicamente quando a área ocupada pela fundação abranger, no máximo, de 50% a 70% da área disponível. De uma maneira geral, esse tipo de fundação não deve ser usado nos seguintes casos:

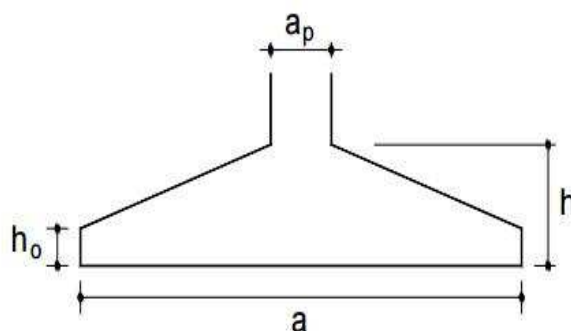
- Aterro não compactado;
- Argila mole;
- Areia fofa e muito fofa;
- Solos colapsíveis;
- Existência de água onde o rebaixamento do lençol freático não se justifica economicamente.

Segundo Araújo (2010) as sapatas podem ser classificadas de acordo com o polígono que representa sua base em: retangulares, quadradas, circulares, poligonais, etc. Podem ser piramidais ou retas, ou ainda retas em degraus.

Em função da rigidez a sapata pode ser classificada como rígida ou flexível, segundo a sua altura h . A ABNT NBR 6118:2014 verifica a expressão abaixo para as duas direções, na base da sapata. Se a verificação for positiva a sapata é considerada rígida, caso contrário flexível. “Esse conceito de rigidez é relativo ao elemento estrutural e não pressupõe nenhum comportamento específico quanto às distribuições de tensões no terreno.” (ARAÚJO, 2010, p.242).

$$h = (a - a_p) / 3 \quad (2.1)$$

Figura 4 – Dimensões Típicas em Sapatas



onde:

- h - altura da sapata;
- a - dimensão da sapata em uma determinada direção;
- a_p - dimensão do pilar na mesma direção.

Para Araújo (2010) as sapatas flexíveis proporcionam menor consumo de concreto, são mais leves e, por conta disso, mais adequadas para solos com menor capacidade de carga. Já as sapatas rígidas têm menor consumo de aço, além de ser possível empregar concreto de menor resistência. Esse tipo de sapata é mais pesada em relação às flexíveis e é mais econômica quando usada em terrenos de boa capacidade de carga.

Os pilares precisam estar fixos nas sapatas as quais estão assentados, para tanto suas armaduras precisam ser ancoradas na armadura da sapata. As sapatas precisam ter altura suficiente para que as forças nas armaduras do pilar possam ser transferidas ao concreto do elemento de fundação (ancoragem), incluindo um cobrimento mínimo para a proteção das armaduras. O comprimento de ancoragem é denotado por l_b e obedece a lei abaixo:

$$h > l_b + c \quad (2.2)$$

sendo:

l_b - Comprimento de ancoragem;

h - Altura da sapata;

c - Cobrimento.

“Todas as barras das armaduras devem ser ancoradas de forma que as forças a que estejam submetidas sejam integralmente transmitidas ao concreto, seja por meio de aderência ou de dispositivos mecânicos ou por combinação de ambos.” (ABNT NBR 6118, 2014, p. 35)

É importante conhecer o comportamento das pressões que atuam entre a superfície inferior da sapata e o solo no qual ela está assentada, tanto para verificar as tensões no solo quanto para cálculos relativos à própria sapata.

A carga proveniente da superestrutura provoca pressões na base do elemento de fundação por sapata. Essas cargas podem ser centradas, ou excêntricas. Quando centrada, a carga vertical do pilar passa pelo centro de gravidade da sapata. Caso sejam excêntricas não coincidem com o centro de gravidade da sapata, gerando momentos nas fundações.

Figura 5 – Sapata sobre carga centrada

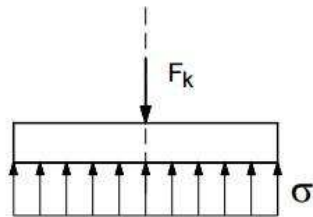
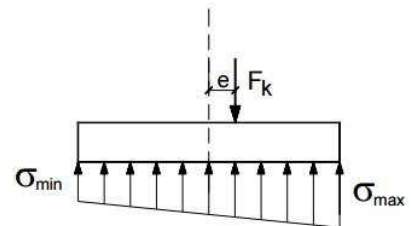


Figura 6 – Sapata sobre carga excêntrica



onde:

- F_k - Solicitação vertical na sapata;
- A - Área da base da sapata
- E - Excentricidade

De acordo com Araújo (2010) a distribuição das pressões no terreno abaixo de uma sapata dependerá do tipo de solo e da rigidez da sapata em questão. Essa análise é bastante complexa, e seus resultados, frequentemente, não geram informações quantitativas sobre a distribuição das pressões no terreno. Desta forma, em termos de projeto estrutural, pode-se admitir que as pressões sob a sapata se distribuam uniformemente quando a carga sob o elemento de fundação é centrada ou tenham uma variação linear quando a carga na sapata é excêntrica.

3 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS

3.1 Definições

Para projetar adequadamente as fundações de uma edificação, o projetista de fundações precisa de muitas informações. Dentre essas informações estão as características geotécnicas, a composição e a capacidade de carga do solo. A determinação prévia das cargas admissíveis para um elemento de fundação e profundidade adequada para sua colocação são por vezes tarefas difíceis de serem executadas. Segundo Andrade (2003), determinar a composição do solo, apresenta-se como a maior dificuldade encontrada pelo projetista de fundações.

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), boa parte da superfície terrestre, seja nas áreas emersas ou nas vastas regiões submersas, está coberta por solos ou maciços terrosos. A maioria das estruturas de Engenharia Civil está implantada sobre maciços terrosos, pois as populações tendem a estabelecer-se nas regiões litorâneas e junto a vales formados por grandes rios, que são zonas geológicas mais recentes, e estas regiões tem a camada de solo sobre o substrato rochoso particularmente importante.

Para Knappet e Craig (2014), a engenharia civil vê os solos como qualquer reunião de partículas minerais soltas, ou fracamente unidas, formadas pela decomposição de rochas, como parte do ciclo dessas rochas. Há espaços vazios entre essas partículas ocupados por água e/ou ar.

De acordo com Gonçalves et al (2014), a constituição dos solos se dá pela decomposição das rochas e sua evolução depende do clima, da rocha de origem, do relevo, do tempo e até mesmo dos microrganismos.

A natureza possui inúmeros processos que formam solos a partir de rochas, ou maciços rochosos. Tais processos não serão aprofundados nesse trabalho. Porém é interessante expor que os solos, quanto a seu modo de formação ou origem, podem ser classificados em dois grandes grupos, que englobam solos com propriedades mecânicas muito distintas. São eles: Solos Residuais e Solos Sedimentares.

Os Solos Residuais são provenientes do produto final da rocha sã que sofreu com o intemperismo químico, permanecendo *in situ*. Esse solo possui grande

relação com a rocha de origem. O intemperismo químico é o processo de decomposição da rocha onde os vários processos químicos alteram, solubilizam e depositam os minerais das rochas transformando-a em solo.

Segundo Gonçalves et al (2014), os Solos Sedimentares ou transportados são aqueles que foram levados de seu local de origem por algum agente (água sólida ou líquida, vento, gravidade) de transporte e depositados em outro local. Os solos transportados podem ser:

- Coluvionares: transportado pela ação da gravidade;
- Aluvionares: transportados pelas águas correntes;
- Glaciais: transportados pelas geleiras;
- Eólicos: transportados pelo vento.

O solo é constituído por camadas, e a engenharia civil se ocupa, em particular, do estudo das camadas mais profundas do solo, pois as obras se apoiam tanto sobre, quanto no interior da crosta terrestre.

3.2 Identificação

Os solos encontrados na superfície da terra apresentam grande variedade de tipos, em função das diferentes combinações de seus fatores de formação. Classificar um solo, entretanto, não é uma tarefa fácil, pois eles formam um meio contínuo ao longo do relevo, sendo que a passagem lateral de um tipo ao outro se faz gradualmente, fato que dificulta em muito a colocação de um limite entre os vários tipos, e assim classifica-los separadamente.

3.2.1 Identificação Visual - Tátil

Um método prático de identificação de solo é o procedimento visual e tátil. Esse método é executado sem utilização de equipamentos, e é de grande importância, pois pode ser realizado *in situ*, sem necessidade de instalações de um laboratório. Tal análise agrupa solos com características semelhantes permitindo definir o tipo e número de ensaios necessários a sua caracterização de um modo mais correto. A identificação visual-tátil é realizada com base na sensibilidade e experiência dos operadores.

Coletando-se uma porção do solo, colocando-a na mão e esfregando-a entre os dedos, é possível identificar a textura mais áspera ou mais lisa relativa a esse solo. A textura áspera caracterizará solos mais arenosos, enquanto a lisa, indicará solos argilosos.

Segundo Gonçalves et al (2014), solos argilosos são solos com plasticidade acentuada, ou seja, permitem ser moldadas. Já os siltosos ou arenosos, não possuem essa característica em evidência. Moldando o solo em pequenas porções arredondadas e deixando secar, é possível verificar a resistência à compressão, pressionando as amostras com os dedos. Nas argilas essa resistência será elevada, enquanto nos solos arenosos e siltosos, será baixa. A quantidade de areia pode ser estimada dissolvendo certa quantidade de solo em um recipiente com água limpa. A areia irá rapidamente para o fundo do recipiente, enquanto a argila demorará mais tempo para decantar.

Dessa forma, percebe-se que é possível distinguir, superficialmente, o tipo de solo o qual se está trabalhando, mesmo sem o uso de equipamentos de laboratório. Essa análise não deve ser definitiva, porém, quando feita por um profissional habilitado e experiente, pode determinar com grande aproximação o tipo de solo trabalhado.

3.2.2 Identificação do solo segundo as dimensões dos grãos

A dimensão das partículas é uma característica importante do solo. Em sua variedade, os solos são constituídos por uma imensa quantidade de partículas de variados tamanhos, formas e composição mineralógica. Por conta dessa importante característica foi elaborado um estudo da distribuição das partículas do solo, segundo suas dimensões. Esse estudo é chamado de Granulometria, ou Análise Granulométrica.

No Brasil, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) por meio da NBR (Norma Brasileira Regulamentadora) 7181 de 1984, regulamenta a maneira de executar o estudo granulométrico dos solos, por peneiramento e sedimentação.

“A análise granulométrica consiste, em geral, de duas fases: peneiramento e sedimentação.” (HACHICH et al, 1998, p. 57). No peneiramento o solo passará por uma sequência de peneiras, com o objetivo de determinar as

frações mais grossas do solo. Essas frações são compostas por pedregulhos e areias. As frações mais finas são estudadas pelo processo de sedimentação.

Segundo Hachich et al (1998), a análise por peneiramento tem como parâmetro a abertura da malha das peneiras, que não pode ser tão pequena quanto o diâmetro de interesse.

A análise granulométrica facilita a delimitação da composição do solo, para melhor classificação do mesmo. Para Campos (2015), a classificação da mecânica dos solos para os materiais que constituem a crosta terrestre esta dividida em quatro grupos: rocha, solos arenosos, solos siltosos e solos argilosos. Porém essa delimitação é insuficiente, pois não é rígida e os solos, nem sempre, se encaixam em um único grupo. Os solos são construídos de frações de vários grupos, e quando analisados, são classificados em relação ao grupo de maior fração que o compõe. Isso só pode ser feito pela análise do tamanho das partículas do solo.

A necessidade de determinar as frações de cada grupo no solo analisado, pelo tamanho das partículas que o compõe, faz da granulometria o principal critério de classificação do solo.

“O peso de material que passa em cada peneira [...] é considerado como a "porcentagem que passa" e representada graficamente em função da abertura da peneira, esta em escala logarítmica.” (HACHICH, 1998, p. 57). A esses dados de porcentagem serão adicionados os resultados da sedimentação, para a construção de um gráfico com as características relativas ao tamanho das partículas do solo.

Certas vezes se faz necessário conhecer a distribuição da porção mais fina dos solos. Hachich et al (1998, p. 57) diz que nesses casos “[...] emprega-se a técnica da sedimentação, que se baseia na Lei de Stokes.” Essa lei relaciona a velocidade de queda de partículas esféricas num meio viscoso ao quadrado do diâmetro dessas partículas.

Na sedimentação o solo é colocado em uma proveta com solução dispersante e se mede a velocidade de quedas das partículas. É usado um densímetro para medir a variação da densidade do fluído com o tempo. Através da lei de Stokes calculam-se os diâmetros das partículas. Usa-se a seguinte expressão:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} D^2 \quad (3.1)$$

sendo:

- V - Velocidade de queda
- γ_s - Peso específico do material
- γ_w - Peso específico do fluido
- μ - Viscosidade do fluido
- D - Diâmetro das partículas

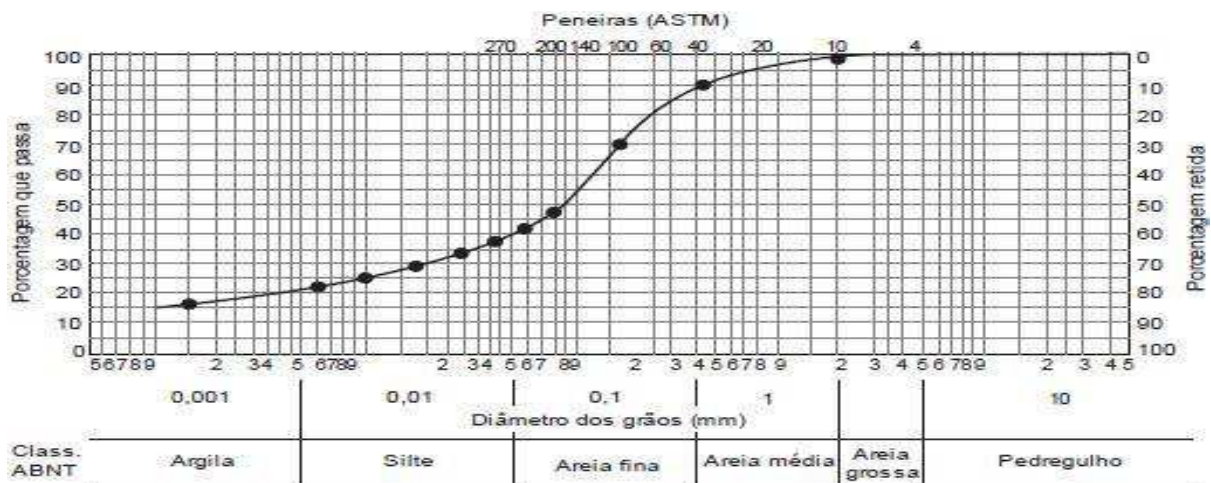
O produto final do processo de granulometria é a curva granulométrica, que é a representação gráfica dos dados de todo o processo.

A partir do resultado da granulometria é possível identificar as porcentagens de cada material e o solo é nomeado com base no material que tem maior porcentagem na sua composição, logo após são citados os nomes dos outros materiais que compõe o solo, porém em menor quantidade. Abaixo estão apresentados alguns exemplos:

- Silte arenoso;
- Areia argilosa com pedregulhos;
- Argila siltosa;
- Argila silto arenosa;
- Areia siltosa;
- Silte argiloso.

A tabela abaixo representa a curva granulométrica de um determinado solo.

Figura 7 – Curva Granulométrica



3.3 Investigação do solo

“Uma investigação adequada do terreno é uma atividade preliminar essencial à execução de um projeto da Engenharia Civil.” (KNAPPET; CRAIG, 2014, p. 155). As informações sobre o solo contribuem de maneira profunda para a elaboração de um projeto e otimiza o uso dos recursos econômicos. Com essas informações é possível evitar transtornos durante a execução da obra.

Segundo Knappet e Craig (2014), entre os principais objetivos da investigação do solo estão: determinar a sequência, as espessuras e a dimensão lateral dos estrados do solo e o nível do substrato rochoso; obter amostras representativas dos solos para identificação e classificação e também para uso em ensaios de laboratório, para determinação dos parâmetros corretos do solo, quando necessário e identificar as condições da água no subsolo.

Para aprofundar a investigação do subsolo é possível lançar mão de ensaios *in situ*. Knappet e Craig (2014, p. 155) dizem que “A investigação também pode inserir ensaios *in situ* para avaliar as características apropriadas do solo”.

Os resultados de uma investigação bem executada, devem fornecer as informações adequadas para, por exemplo, permitir que seja escolhido o tipo mais adequado de fundação para a estrutura a ser construída, e indicar as probabilidades de existirem problemas especiais no decorrer da obra.

A sondagem deve ser feita por meio de processos que serão prescritos de acordo com a natureza do solo. Segundo Knappet e Craig (2014), esses processos

envolverão de maneira geral furos de sondagem e poços de inspeção. As quantidades dos furos ou poços devem ser suficientes para determinar a estrutura geológica básica do terreno e detectar as irregularidades significativas na região do subsolo.

É muito importante que a investigação seja feita até uma profundidade correta. Tal profundidade depende do tipo e da dimensão do projeto, porém deve incluir todos os estrados que possam ser afetados, pela estrutura. A profundidade da investigação deve atingir um ponto abaixo dos estrados que possuam baixa resistência ao cisalhamento, para o assentamento das fundações ou que apresentem recalques significativos. Caso seja necessário o uso de fundações profundas, a investigação precisará ter uma profundidade significativa abaixo da superfície. Se for encontrada rocha, durante a investigação, devem ser feitos furos de, no mínimo 3 metros, em mais de um local, para confirmar o substrato rochoso.

3.3.1 Métodos de investigação do subsolo

Na investigação do subsolo serão utilizados métodos, que se adequarão à necessidade de cada terreno. De acordo com Gonçalves et al (2014), os métodos de investigação são diretos ou indiretos. A seguir serão citados os métodos mais comuns de investigação do subsolo.

3.3.2 Métodos diretos

Quando é possível coletar, observar diretamente o solo ou obter amostras ao longo de uma perfuração, o método de investigação é dito direto. Entre esses métodos estão os poços, furos de sondagem.

3.3.1.1 Poços de inspeção

Para Knappet e Craig (2014, p. 156), “[...] é um método simples de investigação, mas limita-se a uma profundidade máxima de 4m a 5 m. O solo é removido, em geral, por meio de uma concha ou escavadeira mecânica.”

Esses poços permitem o exame claro dos horizontes perfurados e a colheita de amostras, e podem ser feitos em todos os tipos de solo, incluindo os que contêm matacões e pedregulhos. Porém se o poço ultrapassar o lençol freático será

necessário a remoção da água nos solos mais permeáveis, um procedimento que aumentaria os custos da inspeção.

3.3.1.2 Sondagem à percussão

De acordo com Knappet e Craig (2014), esse processo consiste em perfurar o solo por meio de um equipamento de perfuração que consiste em uma torre de elevação (tripé), uma unidade de força e um guincho com um cabo de aço que passa por uma roldana no topo da torre de elevação. Muitas ferramentas de perfuração podem ser acopladas ao cabo. A perfuração ocorre pela ação de uma ferramenta que é elevada, a cerca de 1 a 2 m, e solta por meio da unidade do guincho. As ferramentas mais utilizadas são o barrilete amostrador e o cortador de argila. O barrilete amostrador é usado em solos grossos e areias e o cortador de argila em solos finos.

“A sondagem à percussão pode ser empregada na maioria dos tipos de solo, incluindo aqueles que contêm pedregulhos e matacões.” (KNAPPET; CRAIG, 2014, p. 158).

Apesar da abrangência do método de percussão para investigação de solos, há certas restrições para esse procedimento. Knappet e Craig (2014, p. 158) alertam que: “[...] alguma perturbação na camada inferior ao furo de sondagem do qual são retiradas as amostras, e é difícil detectar as camadas finas do solo e características geológicas menores com esse método. ”.

As sondagens à percussão podem ser executadas com trados. Um trado pode ser definido como um instrumento de aço de grande espessura, em forma de espiral, que possui a extremidade inferior pontiaguda, e que ao girar consegue perfurar madeira e terra, entre outras coisas. Os trados mais comuns são o helicoidal e o trado de caçamba.

Existem trados manuais e mecânicos. Nos manuais existe, na extremidade superior, uma peça chamada cruzeta que ao ser girada, provoca torque ao trado, proporcionando com isso sua penetração. Esses equipamentos escavam furos de sondagens de até 5 m de profundidade. Comumente os trados manuais são

usados apenas se as laterais do furo de sondagem não exigirem sustentação alguma e se não houver partículas do tamanho de areia grossa ou maiores.

Quando o trado manual não é suficiente, o trado mecânico pode ser utilizado. O trado mecânico é acoplado a um equipamento, comumente em um veículo motorizado, que o transporta. O equipamento acoplado ao trado o fornece a energia necessária para fazê-lo girar e penetrar o solo.

Gonçalves et al (2014) afirma que a na sondagem a percussão com uso de trados, a investigação é feita de maneira simples, rápida e econômica

Abaixo é possível visualizar imagens de trados:

Figura 8 - Trado Mecânico



Fonte: <http://www.fcfundacao.com.br/>

Figura 9 - Trado Manual



Fonte: <http://www.apl.eng.br/trado>

Entre os métodos de sondagem a percussão, há dois bastante importantes, que serão abordados nesse trabalho: SPT - Standard Penetration Test e CPT - Cone Penetration Test.

O SPT (Standard Penetration Test), é regido pela ABNT NBR 6484:1980, é também conhecido como sondagem dinâmica à percussão. Segundo essa norma, o método consiste em cravar, por meio de perfuração dinâmica, um amostrador normatizado, utilizando um peso de 65 kgf, que cai sobre a extremidade do aparato, a uma altura fixa de 0,75 m. Registra-se o número de golpes deferidos para que se escave 45 cm do amostrador em 3 grupos de golpes para cada 15 cm. O resultado do ensaio é dado por meio da observação do número de golpes necessários para escavar os últimos 30 cm do amostrador. Os 15 cm iniciais da penetração são

desprezados, ainda assim o número de golpes necessários para atingi-los é fornecido.

De acordo com Hachich et al (1998), a posição dos furos de sondagem é determinados em planta. Para projetos de edificações esses furos são locados em posições próximas aos limites de projeção das sondagens e nos pontos de maior concentração de carga. Deve-se evitar a locação de pontos de maneira alinhada, para permitir a avaliação de vários planos de corte.

A profundidade de cada furo depende do porte da obra que se pretende construir e das cargas que serão transmitidas ao terreno. A ABNT NBR 6484:1980 determina os critérios mínimos que orientam a profundidade da sondagem. Porém, sendo esses critérios mínimos, as características particulares do solo e da obra que será assentada sobre ele, podem exigir profundidades maiores que as estabelecidas como mínimas pela norma.

Segundo Hachich et al (1998), este ensaio serve para extrair uma amostra do solo a cada metro perfurado, determinar o índice de resistência à penetração, denotado por “N” e determinar a posição do nível ou dos níveis d’água, encontrados ao longo da penetração.

“A amostra retirada do amostrador [...] é deformada. Quando é necessário amostras indeformadas para ensaios de laboratório, são empregados amostradores especiais.” (VELOSO; LOPES, 2010, p. 38). No caso das argilas, mesmo sem a necessidade de amostras indeformáveis, são usados amostradores de parede fina, chamados de especiais.

Em relação à presença de água no solo, Hachich et al (1998, p. 121) afirma que “De primordial importância é a determinação do nível de água, quando ocorrer, seja por armazenamento de água de chuva ou presença do lençol freático.” Quando é notada a presença de água no solo, é necessário parar a penetração e anotar imediatamente a profundidade. É aconselhável esperar a estabilização da lamina d’água e, após estabilizada, verificar-se a profundidade da mesma.

As amostras de solo recolhidas durante o ensaio SPT devem ser recolhidas e conduzidas ao laboratório, para uma cuidadosa classificação tátil-visual. Devem ser também definidas as camadas de solo residual e as respectivas

espessuras ou horizontes de decomposição dos solos. As dúvidas relativas à composição do solo devem ser sanadas com o auxílio de outros ensaios, tais como o de granulometria.

O processo de classificação e estabelecimento das espessuras das camadas de solo é feito com cada uma das sondagens para traçar um perfil das mesmas. “De posse dos perfis individuais preliminares de cada sondagem [...] desenha-se [...] o perfil do subsolo de cada sondagem, ou de preferência seções do subsolo, abrangendo diversas sondagens.” (HACHICH et al, 1998, p. 121).

O ensaio CPT ocorre com a cravação estática lenta de um cone mecânico ou elétrico que coleta dados do solo a cada 20 cm de profundidade. Esses dados são armazenados em um computador. O cone é ligado a uma bomba hidráulica e penetrado no terreno a uma velocidade de 2 cm por segundo. O próprio equipamento crava o cone no terreno e funciona como uma prensa hidráulica. Após cravados os cones, os dados são coletados automaticamente e registrados continuamente ao longo da profundidade.

O CPT fornece resistência de ponta e a resistência de atrito lateral, fornece também uma correlação entre essas duas características que permitem a identificação do tipo de solo.

O ensaio de CPT é regulamentado pela norma ABNT NBR 12069:1991. De acordo com esta norma, as ponteiros do cone podem ser mecânicos ou elétricos. A ponteira mecânica mede os componentes de resistência à penetração por meio de hastes internas; já a ponteira elétrica faz essa aferição por meio de elementos elétricos também contidos dentro da própria ponteira.

Comumente é necessário que o terreno tenha condições de acesso para o recebimento do equipamento, o qual pode estar montado sobre um caminhão.

Deve se apresentar, ao final do ensaio, todos os dados do processo. O relatório deve conter a descrição dos trabalhos da aparelhagem, a apresentação dos resultados de aferição do sistema de medição de esforços, a planta de locação detalhada dos pontos de penetração, contendo dados planialtimétricos e gráfico dos valores dos componentes de resistência em função da profundidade em escala apropriada.

3.3.3 Métodos indiretos

Existem situações de obra para as quais a utilização de métodos diretos não é suficiente para a investigação adequada do subsolo. Nessas situações se faz necessário o uso de métodos indiretos de investigação. Segundo Chiossi (1975), os métodos indiretos baseiam-se em interpretações de vertas medidas físicas do solo. Estas medidas são as feições topográficas, morfológicas e as propriedades físicas dos terrenos. Tais medidas servirão para determinar, de maneira indireta, a distribuição e o posicionamento dos corpos geológicos e suas características físicas e tecnológicas. Entre os métodos indiretos os principais são o os métodos geofísicos e o sensoriamento remoto.

3.3.3.1 Métodos geofísicos

De acordo com Chiossi (1975), os métodos geofísicos constituem a ciência da Geofísica aplicada, que procura verificar se as estruturas geológicas que são ou podem ser favoráveis para a acumulação de petróleo, de água e depósitos de minérios, e também determina os tipos de rochas e as estruturas geológicas do subsolo, para fins de engenharia civil. Para a engenharia civil, os métodos geofísicos visam a identificar, em subsolo, as rochas e suas camadas, suas formações, idades e tudo pertinente a elas desde o seu surgimento através de propriedades físicas dessas rochas.

Segundo Knappet e Craig (2014), podem ser bastante úteis na investigação do terreno, em particular no reconhecimento. Porém esses métodos não são apropriados para todas as condições do terreno, além das limitações para as informações que podem ser obtidas. Tais métodos devem ser considerados suplementares, pois sempre haverá a necessidade de comparação com métodos diretos.

3.3.3.2 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto baseia-se na análise de fotos aéreas e imagens orbitais da superfície terrestre, tiradas por satélites ou aeronaves comuns. Essa fotointerpretação avalia a tonalidade e a textura das imagens para determinar os tipos de solo, formas de relevo, redes de drenagem e tipo de vegetação, da superfície. Esse método é utilizado por áreas da geologia, meteorologia, agricultura, indústria entre outras.

Esse trabalho utilizará, em sua análise, um método direto. Dessa forma, nesse texto, não serão expostas informações aprofundadas sobre métodos indiretos.

Todos esses procedimentos de classificação e investigação do solo proporcionam ao engenheiro de fundações as ferramentas iniciais para um dimensionamento seguro das fundações da edificação. Evitando problemas posteriores a execução das mesmas. Problemas dessa natureza geram custos muito altos para a obra, e requerem mão de obra muito especializada.

4 CAPACIDADE DE CARGA

4.1 Definição

As fundações de uma edificação devem resistir aos esforços transmitidos pela mesma e se acomodar sobre as camadas do solo previamente conhecidas. Por isso, em projetos geotécnicos de fundações é necessário avaliar se a resistência do solo é suficiente para suportar esses esforços e também as deformações causadas por eles, os recalques. Essas deformações devem estar dentro de limites previamente calculados.

Para Das (2011), os recalques são rebaixamentos do solo causados pelo aumento das tensões pela construção de fundações ou de outras cargas que exercem compressão sobre ele.

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), se considerarmos uma sapata retangular de concreto armado de dimensões B e L, introduzida no maciço de solo a uma profundidade h em relação à superfície, e uma solicitação P vertical de compressão no topo da sapata, serão geradas tensões resistentes no maciço do solo. Estas tensões são normais à base da sapata, no contato sapata-solo.

As tensões resistentes geradas pelo solo à base da sapata, pelo princípio da ação e reação, são aplicadas pela sapata no solo. O elemento isolado de fundação por sapata caracteriza um sistema sapata-solo, que é composto pela sapata (o elemento estrutural) e pelo maciço de solo (elemento geotécnico).

O valor médio das tensões na base da sapata tem valor σ e pode ser calculado pela expressão:

$$\sigma = \frac{P}{BL} \quad (4.1)$$

“Na iminência da ruptura, teremos a mobilização da resistência máxima do sistema sapata-solo, que denominaremos capacidade de carga do elemento de fundação por sapata [...]” (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p. 22). A resistência mobilizada na iminência da ruptura é a resistência ao cisalhamento, que acionada em várias regiões do maciço de solo pelo carregamento imposto ao elemento de

fundação. Para Cintra, Aoki e Albiero (2011) a capacidade de carga é a tensão que provoca a ruptura do maciço de solo em que está apoiada.

4.2 Modos de Ruptura

Os efeitos dos carregamentos sobre a sapata provocam recalques que podem chegar à ruptura do solo. Essa ruptura ocorre de maneiras diferentes, dependendo dos efeitos do carregamento. E a relação entre a carga e recalque pode originar diferentes mecanismos de ruptura.

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011) há dois tipos característicos de mecanismos de ruptura. Em um deles a sapata sofre um giro, em relação a horizontal, que provoca um levantamento de uma porção de solo para cima da superfície do terreno, esse mecanismo é chamado de ruptura geral. No outro mecanismo, há um deslocamento significativo da sapata para baixo, sem que esta se desaprume. Este mecanismo é chamado de ruptura por punção.

A ruptura geral ocorre em solos mais resistentes, pois esses solos são menos deformáveis, e com sapatas suficientemente rasas. Nesses casos a superfície de ruptura é contínua, e vai desde a borda da sapata à superfície do terreno, em um dos lados desta. A ruptura é brusca e leva a sapata ao tombamento. A carga de ruptura ocorre para pequenos valores de recalque.

Já a ruptura por punção ocorre em solos menos resistentes, ou seja, mais deformáveis. Essa ruptura não provoca o tombamento da sapata, nela a sapata penetra no solo devido à compressão da superfície abaixo da base da sapata. A carga de ruptura para esse mecanismo ocorre para valores de recalque mais elevados que os da ruptura geral. Nesse valor de carga os recalques são contínuos.

“Além desses dois casos de ruptura [...], Vesic (1975) considera também uma ruptura local, que ocorre em solos de média capacidade ou consistência (areias mediantemente compactadas e argilas médias), [...]” (VESIC, A.S, 1975 apud CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p. 25). A ruptura local apresenta-se como um mecanismo de ruptura intermediária entre os dois extremos, o de ruptura geral e o de ruptura por punção.

Segundo Velloso e Lopes (2010), o modelo de ruptura local desenvolve uma cunha de superfícies de deslizamento. Essa cunha tem início nas bordas da fundação, similarmente ao caso da ruptura geral. O solo ao lado das bordas da fundação apresenta empolamento, porém a compressão vertical da fundação não permite que as superfícies de deslizamento atinjam a superfície do terreno, as forçando a terminar dentro do maciço de solo. O contato entre essas duas superfícies só ocorrerá depois de um significativo deslocamento vertical, para baixo, da sapata. Porém, não haverá colapso por tombamento da fundação. Esta permanecerá embutida no terreno.

Nota-se que o tipo de ruptura que ocorre no solo, dependerá da compressibilidade do mesmo. Caso seja um solo quase incompressível com resistência limitada ao cisalhamento, ocorrerá ruptura geral. Em contrapartida, ocorrendo num solo de boa resistência ao cisalhamento e muito compressível, a ruptura será por puncionamento. Já nas areias mediamente compactadas e em argilas médias, ocorrerá a ruptura local.

4.3 Métodos teóricos para determinação da capacidade de carga

A formulação de teorias sobre a capacidade de cargas gerou formulas capazes de estimar com precisão o valor dessa grandeza. Entre os teóricos mais significativos sobre capacidade de carga estão Terzaghi, Skempton, Meyerhof e Hansen. Os métodos desenvolvidos por esses pesquisadores proporcionam uma estimativa precisa do valor da capacidade de carga do solo, e com isso um projeto de fundações seguro e confiável. Nesse trabalho será explorado, com mais profundidade, o método de Terzaghi. Ainda assim serão explanados os métodos desenvolvidos pelos outros autores citados.

4.3.1 Métodos de Terzaghi

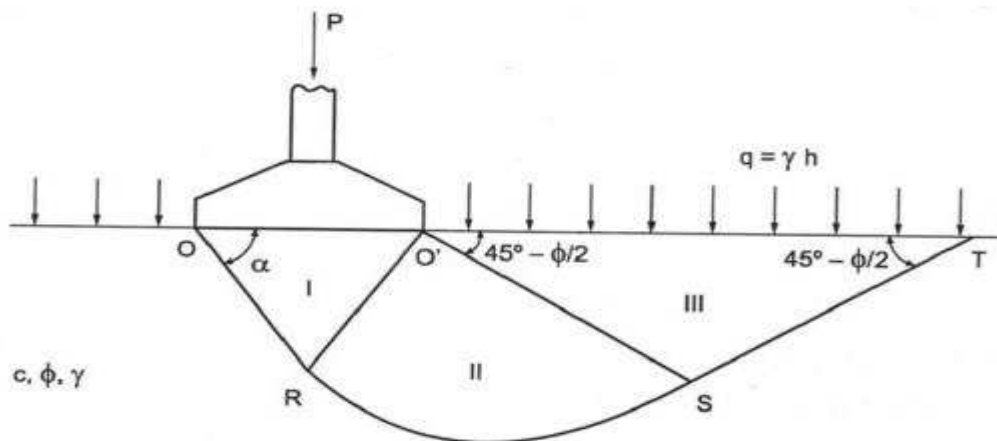
Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), Karl Terzaghi, precursor da Mecânica dos Solos, foi o primeiro a desenvolver uma teoria acerca da capacidade de carga para um sistema sapata-solo. Em sua formulação Terzaghi (1943) admite três hipóteses básicas:

1. A sapata é corrida, por tanto tem o comprimento L maior que a largura B ($L \geq 5B$). Dessa forma o problema se torna bidimensional;

2. A profundidade de embutimento da sapata é inferior à largura da mesma ($h \leq B$). Com isso é possível desprezar a resistência ao cisalhamento da camada situada acima da cota de apoio da sapata. Essa camada de solo, que possui espessura h e peso específico γ , será substituída por uma sobrecarga $q = \gamma h$;
3. O maciço abaixo da base da sapata é de solo resistente, pouco deformável, caracterizando com isso um caso de ruptura geral.

Com base nessas premissas Terzaghi esquematizou o problema de acordo com a figura abaixo:

Figura 12 – Superfície potencial de ruptura



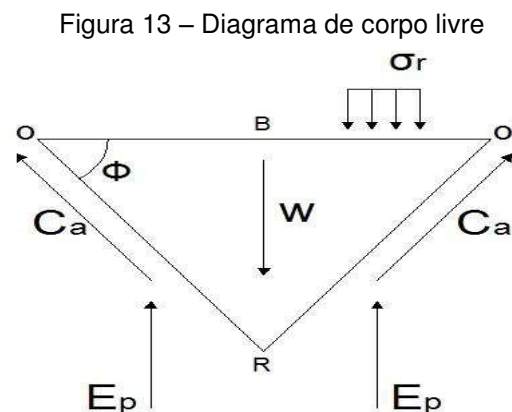
Fonte: CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p.27

No esquema exposto pela figura, "[...] a superfície potencial de ruptura ORST é composta pelos trechos retos OR e ST e por uma espiral logarítmica nos trechos intermediários RS [...]" (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p. 26). Percebe-se a formação de três zonas: I, II, III. Essas zonas do maciço de solo possuem as características de resistência do mesmo; coesão (c), peso específico (γ), e ângulo de atrito (Φ). O efeito acima exposto, pode ocorrer naturalmente para o lado esquerdo da sapata a partir do ponto O' .

De acordo com Cintra, Aoki e Albiero (2011), a figura ainda é possível ver que os segmentos $O'S$ e ST têm uma inclinação de $45^\circ - \Phi/2$ com a horizontal e os segmentos OR e $O'R$ fazem, com a base da sapata um ângulo α com a base da sapata. Este ângulo α , varia entre Φ e $45^\circ - \Phi/2$.

Terzaghi (1943) analisa a cunha sob a sapata, na qual é aplicada uma tensão σ_r ao solo. A cunha é representada na figura pela região I. Sendo uma parte do maciço de solo, a cunha tem seu peso próprio, que será representado por W . Nas faces laterais do elemento atuarão o empuxo passivo, denotado por E_p e as forças de coesão representadas por C_a .

A figura abaixo representa o diagrama de corpo livre da cunha de maciço de solo, abaixo da base da sapata:



Fonte: CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p.27

Observando o equilíbrio de forças verticais, é possível elaborar a seguinte equação:

$$\sigma_r B + W - 2E_p - 2C_p \operatorname{sen} \Phi = 0 \quad (4.2)$$

com:

$$C_a = c \frac{B/2}{\cos \Phi} \quad (4.3)$$

e:

$$W = \frac{\gamma}{4} B^2 \operatorname{tg} \Phi \quad (4.4)$$

Ao substituir os valores de C_a e W na equação, o resultado será:

$$\sigma_r = 2 \frac{E_p}{B} + c \operatorname{tg} \Phi - \frac{\gamma}{4} B \operatorname{tg} \Phi \quad (4.5)$$

A equação 2, representaria a solução do problema, caso o termo E_p fosse conhecido. Porém, Terzaghi (1943) percebeu que não há solução geral que leve em conta o peso do solo nem a influência da sobrecarga. Por conta disso resolveu utilizar outra metodologia, a de considerar casos particulares, alguns hipotéticos, e somente depois da avaliação desses casos generalizar a solução através de uma superposição de efeitos. A seguir serão expostos os casos particulares.

4.3.1.1 Solo sem peso e sapata à superfície

Na figura 5 a região I, com formato de cunha, desloca-se para baixo e provoca o movimento lateral da região II. A região II empurra para cima a região III. O ângulo α o seu valor máximo de $45^\circ + \Phi/2$. “Esse caso já havia sido resolvido por Prandtl (1921, apud Terzaghi e Peck, 1967), que encontrou para a capacidade de carga a expressão: $\sigma_r = cN_c$ ” (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p.28).

Nessa expressão o termo N_c , é um fator de capacidade de carga dependente de Φ , e dado pela expressão:

$$N_c = \cotg \Phi [e^{\pi \tg \Phi} \tg \left(45^\circ + \frac{\Phi}{2} \right) - 1] \quad (4.6)$$

4.3.1.2 Solo não coesivo sem peso

“O modelo de ruptura permanece o mesmo e a capacidade de carga é dada pela solução de Reissner (1924, apud Terzaghi e Peck, 1967): $\sigma_r = qN_q$ ” (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p.28). Nessa expressão o termo N_q é fator de capacidade de carga e está em função de Φ :

$$N_q = \cotg \Phi [e^{\pi \tg \Phi} \tg \left(45^\circ + \frac{\Phi}{2} \right)] \quad (4.7)$$

Os fatores N_c e N_q , podem se relacionar segundo a seguinte expressão:

$$N_c = (N_q - 1) \cotg \Phi \quad (4.8)$$

4.3.1.3 Solo não coesivo e sapata à superfície

Quando a sapata está apoiada na superfície de um maciço de areia pura, a capacidade de carga é representada pela expressão:

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (4.9)$$

Nessa expressão o fator de capacidade de carga N_γ é dado por:

$$N_\gamma = \frac{4E_p}{\gamma B^2} \cos(\alpha - \Phi) \quad (4.10)$$

4.3.1.4 Superposição de Efeitos

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), quando é feita uma superposição de efeitos para os casos citados anteriormente, é possível elaborar uma equação que determine aproximadamente a capacidade de carga do sistema sapata-solo. A equação é mostrada a seguir:

$$\sigma_r = cN_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (4.11)$$

As parcelas do segundo membro da equação representam as contribuições da coesão, sobrecarga e peso específico, nesta ordem. Os fatores de capacidade de carga N_c , N_q e N_γ , não possuem dimensão e dependem diretamente de Φ , dessa forma não é possível determinar solução analítica para N_γ .

4.3.1.5 Efeitos de forma da sapata

O problema da estimativa da capacidade de carga para fundações em solos propensos a ruptura geral, foi resolvido tendo como elemento de fundação uma sapata corrida. Porém é necessário também estabelecer essa estimativa para sapatas isoladas. Para isso Terzaghi e Peck (1967) usaram os resultados de experimentos feitos em sapatas isoladas, circulares e quadradas, para elaborar equações que pudessem calcular a capacidade de carga para esses elementos de fundação.

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), Terzaghi e Peck (1967) apresentam equações semiempíricas para sapatas circulares e sapatas quadradas. Essas equações são apresentadas a seguir:

1. Equação para sapata circular com diâmetro B embutida em solo compacto ou rijo:

$$\sigma_r = 1,2cN_c + qN_q + 0,6\frac{\gamma}{2}BN_\gamma \quad (4.12)$$

2. Equação para sapata quadrada de lado B embutida em solo compacto ou rijo:

$$\sigma_r = 1,2cN_c + qN_q + 0,8\frac{\gamma}{2}BN_\gamma \quad (4.13)$$

Posteriormente as equações acima foram agrupadas em uma única equação para determinação da capacidade de carga na ruptura geral. Essa equação considera a forma da sapata:

$$\sigma_r = cN_cS_c + qN_qS_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma S_\gamma \quad (4.14)$$

Nessa equação os termos S_c , S_q e S_γ são denominados fatores de forma da sapata. Esses fatores têm seus valores correspondentes expressos na tabela abaixo:

Tabela 1 – Fatores de Forma

Sapata	S_c	S_q	S_γ
Corrida (Lado B)	1	1	1
Quadrada (B=L)	1,2	1	0,8
Circular (B = Diâmetro)	1,2	1	0,6

De acordo com a equação acima, verifica-se que a capacidade de carga dependerá sempre de três variáveis, em particular: os parâmetros do solo, as dimensões da base da sapata e o embutimento da sapata no solo. Assim sendo o

elemento de fundação representa um sistema interativo sapata-solo, logo a capacidade de carga será, não só do solo, mas sim do sistema.

4.3.2 Outros métodos de determinação da capacidade de carga

Após o desenvolvimento do método de Terzaghi para a determinação da capacidade de carga, outros pesquisadores estabeleceram aprimoramentos da determinação da capacidade de carga. Esses pesquisadores fizeram esse aprimoramento mudando hipóteses pioneiras ou avaliando casos específicos. Essas ações culminaram na geração de outros métodos de determinação da capacidade de carga. Três desses métodos serão citados a seguir.

4.3.2.1 Método de Skempton

Skempton (1951) analisou as teorias para cálculo de capacidade de carga das argilas, com base em inúmeros casos de ruptura de fundações, e propôs a seguinte equação para o caso das argilas na condição não drenada ($\phi = 0^\circ$), tem-se $N_q = 1$ e $N_\gamma = 0$. Nessas condições a equação de capacidade de carga de Terzaghi é simplificada, tomando a seguinte forma:

$$\sigma_r = cN_c S_c + q \quad (4.15)$$

Skempton (1951) define que o fator de forma S_c da expressão é dado por:

$$S_q = 1 + 0,2 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (4.16)$$

E o fator N_c fica em função de h/B , onde h é a profundidade de embutimento da sapata e B a dimensão da mesma.

4.3.2.2 Método de Meyerhof

O cientista Meyerhof (1953) aperfeiçoou a teoria de Terzaghi (1943), sobre a determinação da capacidade de carga. Em suas conclusões Meyerhof (1953) “[...] considera que a superfície de ruptura se prolonga na camada superficial do terreno e que, portanto, há contribuição não só da sobrecarga, como também da resistência ao cisalhamento do solo nessa camada.” (CINTRA; AOKI ; ALBIERO , 2011, p.35)

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), nos casos em que a carga é vertical excêntrica na sapata, Meyerhof (1953) sugere que as dimensões reais da sapata (B, L) sejam trocadas, no cálculo da capacidade de carga por novos valores B' e L', dados por:

$$B' = B - 2e_B \quad (4.17)$$

e:

$$L' = L - 2e_L \quad (4.18)$$

onde e_B e e_L são as excentricidades das cargas nas direções dos lados B e L da sapata,

Esse artifício é uma simplificação que favorece a segurança, pois considera uma área de apoio efetiva, dada por $A' = B' \times L'$, que tem centro de gravidade coincidindo com o centro de aplicação da carga.

4.3.2.3 Método de Brinch Hansen

Para Hansen (1970) a capacidade de carga sofre dois efeitos, em particular: o acréscimo por conta da profundidade de assentamento e a diminuição, por conta de uma eventual carga inclinada. De acordo com Cintra, Aoki e Albiero (2011), levando em conta tais efeitos Hansen acrescentou dois tipos de fatores à equação de capacidade de carga, os fatores de profundidade (d_c, d_q e d_γ) e os de inclinação (i_c, i_q e i_γ).

Com o acréscimo desses valores a equação da capacidade de carga será escrita da seguinte maneira:

$$\sigma_r = cN_c S_c d_c i_c + qN_q S_q d_q i_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad (4.19)$$

5 TENSÃO ADMISSÍVEL

Em se tratando de projeto de fundações rasas para uma edificação, é de extrema importância a determinação da capacidade de carga do solo. A capacidade de carga “[...] corresponde ao valor de tensão que provoca uma ruptura no maciço de solo no qual está embutida a sapata.” (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p.107).

Para Cintra, Aoki e Albiero (2011), se todos os elementos de fundação direta forem levados em consideração, assim como a heterogeneidade do maciço de solo, o valor da capacidade de carga sofrerá variações. Dessa forma, existirão vários valores de capacidade de carga, dos quais é possível extrair uma média. Esse valor médio será representativo para as fundações.

Caso o terreno possua dimensões e características que proporcionem uma variabilidade muito grande do valor da capacidade de carga, de acordo com a NBR 6122/2010, é possível dividi-lo em regiões representativas, a fim de diminuir essa variabilidade. Dessa forma, haverá um valor médio de capacidade de carga para cada região do terreno.

Para priorizar a segurança é necessário lançar mão de um fator de segurança para delimitar o valor da capacidade de carga, de maneira que essa delimitação gere um valor de tensão que não cause a ruptura do solo, tão menos recalques muito grandes. “Obtida a tensão média de ruptura (da obra ou de cada região representativa) precisamos estabelecer que fração desse valor poderá atuar no solo com segurança mínima à ruptura.” (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p.107).

A NBR 6122/2010 define tensão admissível da seguinte forma:

Tensão adotada em projeto, que aplicada ao terreno pela fundação superficial ou pela base do tubulão atende com coeficientes de segurança predeterminados, aos estados-limites últimos (ruptura) e de serviço (recalques, vibrações, etc.). (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6120, 2010, p. 05)

A essa fração da tensão média de ruptura, que deve atuar no solo, sem rompê-lo ou causar rebaixamentos excessivos, é dado o nome de tensão admissível do solo. Esse valor é calculado utilizando-se a expressão:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{r\text{méd}}}{F_s} \quad (5.1)$$

onde:

σ_a - Tensão admissível do solo.

$\sigma_{r\ med}$ - Tensão média de ruptura.

F_s - Fator de segurança.

O fator de segurança é um valor numérico que varia a partir de 1 e também é chamado de Fator de Segurança Global.

Cintra, Aoki e Albiero (2011), previnem que após a análise da carga de ruptura para a obra ou por região representativa, ainda é preciso analisar se haverão recalques acima do valor admissível para tais rebaixamentos. Caso a tensão cause recalques abaixo do valor admissível, será adotada como tensão admissível. Porém, se essa tensão causar recalques com valores maiores que o admissível, será reduzida até que os recalques causados por ela, estejam iguais ou inferiores aos admissíveis.

No dimensionamento geométrico de fundações superficiais por sapatas a tensão admissível determina a área da base da sapata, esta por sua vez determina a tensão admissível, o que gera um dilema a ser resolvido. Para Cintra, Aoki e Albiero (2011), tal dilema é solucionado estabelecendo-se um intervalo para a dimensão B da sapata e a tensão admissível no solo e analisa-los no intuito de determinar um valor para a tensão admissível a ser adotada no projeto, para a obra ou para a região da prova representativa da mesma.

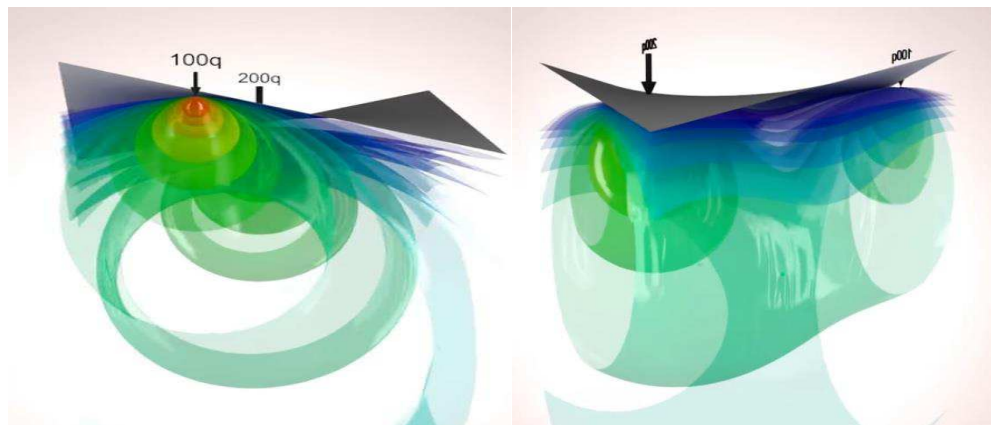
“Além das dimensões da base das sapatas [...], a tensão admissível também é função dos parâmetros do solo e da cota escolhida para a base das sapatas [...]” (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p.109). Assim sendo tem-se mais dois fatores além das dimensões da base da sapata que são peças fundamentais na determinação da tensão admissível, justificando a heterogeneidade dessa característica em uma mesma obra, porém com área muito ampla.

5.1 Bulbo de tensões

Quando tensões verticais são aplicadas no solo, essas tensões se propagam até certa profundidade nesse solo. Experiências do início do estudo da mecânica dos solos demonstram que o acréscimo de tensões no maciço, a certa profundidade, excede a área de projeção da área carregada, que o somatório dos acréscimos de tensões verticais é constante em profundidade e que, como a área de atuação aumenta, o valor das tensões verticais diminui com a profundidade.

Para melhor visualizar esses acréscimos de tensão existem os bulbos de tensão no solo, também chamados de isóbaras de tensão. Esses bulbos são superfícies que unem pontos de mesmo acréscimo de tensões, ao longo da profundidade do solo.

Figura 14 – Bulbos de tensão pela aplicação de cargas verticais



Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), para efeito de projeto, a Mecânica dos Solos estabelece que devem ser considerados os acréscimos de tensão até o bulbo que contenha 10% do valor da tensão externa. Ou seja, a superfície mais afastada do ponto de aplicação da tensão externa σ , é o bulbo que contém o acréscimo de 10% dessa tensão, $\Delta\sigma = 10\% \sigma$.

Em se tratando de sapatas, Cintra, Aoki e Albiero (2011) estabelecem uma maneira simplificada de calcular o acréscimo $\Delta\sigma$ de tensões no solo. Esse cálculo ocorre considerando que a tensão σ , aplicada ao solo pela base da fundação, se propague mediante a uma inclinação de 1:2, correspondendo a um ângulo de aproximadamente 27° com a vertical. Segundo essa consideração, a base da sapata se projeta ao longo da profundidade do solo, dando às dimensões A e B,

originais, um acréscimo z , que também é a distância da base da sapata até a superfície da segunda camada, onde se considera a projeção da base.

Para o cálculo desse acréscimo de tensão usa-se a expressão:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma BA}{(B+z)(A+z)} \quad (5.2)$$

Considerando-se uma sapata quadrada de lado B , estabelecendo-se que $z = 2B$, e substituindo-se na expressão tem-se $\Delta\sigma = \frac{\sigma}{9} \cong 10\%\sigma$. Dessa forma, o bulbo de tensões a ser considerado vai até a profundidade $z = 2B$, sendo B a menor dimensão da base da sapata.

Para Cintra, Aoki e Albiero (2011 apud Simons e Menezes, 1998) cálculos mais arrojados para sapatas flexíveis geram os seguintes valores para a profundidade do bulbo de tensões, dependendo do formato da base da sapata:

- Sapata circular: $z = 1,5 B$;
- Sapata quadrada $z = 2,5 B$;
- Sapata corrida $z = 4,0 B$;

Para efeitos práticos em fundações superficiais, Cintra, Aoki e Albiero (2011) recomendam considerar:

Sapata circular ou quadrada ($L = B$): $z = 2B$

Sapata retangular ($L = 2a4B$): $z = 3B$

Sapata corrida ($L \geq 5B$): $z = 4B$

Diante desses resultados "[...] no caso de sapatas quadradas, por exemplo, para efeito de cálculo de capacidade de carga, não importa o solo que estiver além da profundidade de $z = 2B$." (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p.38). Essa abordagem pode ser estendida para as sapatas retangulares, não quadradas.

5.2 Tensão admissível em fundações por sapatas

Segundo a NBR 6122 (2010), a determinação da tensão admissível em fundações por sapatas é feita com base na análise dos estados de limite últimos da

fundação. Esta norma prescreve três tipos de procedimentos: prova de carga sobre placa, métodos teóricos e métodos semiempíricos.

5.2.1 Prova de carga sobre placa

A prova de carga em placa, segundo Menegotto (2004), é feita em um ensaio de compressão, que é executado diretamente na superfície do solo, ou em determinada profundidade deste, por uma placa metálica rígida. Esse ensaio reproduz a maneira como a fundação agirá segundo as ações oriundas da superestrutura. A cota de realização do ensaio é determinada segundo a necessidade do projeto. No Brasil, esse ensaio é regido pela NBR 6489, que estabelece que a interpretação dos resultados deve considerar a relação modelo-protótipo, e também as camadas de influência do solo.

A prova de carga sobre placa requer o uso de um fator de segurança. “Em relação ao fator de segurança aplicado à capacidade de carga obtida no ensaio de placa, a norma é omissa, indicando apenas a redução de 3,0 para 2,0 [...]”. (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p.114)

Segundo Taylor (1948), as provas de carga sobre placa são comumente realizadas em áreas pequenas em relação às áreas que serão de fato carregadas pela superestrutura. Por conta disso os efeitos das diferenças no tamanho entre a placa e as fundações devem ser apropriadamente levadas em conta, sob pena da prova de carga poder levar a uma falsa impressão da de segurança ou conduzir a um projeto antieconômico.

5.2.2 Métodos teóricos

De acordo com a NBR 6122 (2010), podem ser adotados métodos teóricos para a determinação da tensão admissível, desde que contemplem todas as peculiaridades do projeto, incluindo a natureza do carregamento. A norma estabelece como fator de segurança estabelecido para os métodos teóricos é no valor de 3, na ausência de prova de carga.

O método mais utilizado envolve a teoria de Terzaghi para cálculo da capacidade de carga do solo, estabelecendo o valor médio dessa tensão e dividindo tal valor pelo fator de segurança indicado.

5.2.3 Métodos empíricos

Segundo a NBR 6122 (2010), os métodos semiempíricos são métodos que estabelecem estimativas de propriedades do solo com base em correlações com resultados de ensaios físicos, como SPT e CPT, e em seguida são aplicadas fórmulas teóricas. Devem ser levadas em conta as limitações regionais e as dispersões de dados, relativas a cada método.

A determinação da tensão admissível em fundações diretas por meio de métodos semiempíricos é feito por meio do estabelecimento de correlações entre os índices de resistência à penetração, no caso do SPT e de resistência de ponta, no caso do CPT.

A correlação para o SPT, para a determinação da tensão admissível no solo, é dada pela expressão:

$$\sigma_a = \frac{N_{spt}}{50} + q(MPa), \text{ com } 5 \leq N_{spt} \leq 20 \quad (5.3)$$

De acordo com Cintra, Aoki e Albiero (2011), utilizando o método de Skempton (1951), Teixeira (1996) estabeleceu a seguinte correlação para o cálculo da tensão admissível a partir dos valores de SPT:

$$\sigma_a = \frac{SPT_{\text{médio}}}{50} (MPa) \quad (5.4)$$

em que $SPT_{\text{médio}}$ é o valor médio no bulbo de tensões e a parcela correspondente à sobrecarga q pode ser ou não considerada. “Essa formula foi demonstrada por Teixeira (1996) para condição particular de sapatas retangulares apoiadas na superfície de terrenos puramente argilosos [...]” (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011, p.112).

Berberian (1996) traz algumas considerações a cerca da tensão admissível determinada pela correlação com o SPT. Para o caso de uma argila, por exemplo, tem-se a expressão:

$$\sigma_a = \frac{SPT_{\text{médio}}}{70} (MPa) \quad (5.5)$$

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011) Mello (1975) relata o uso de outra correlação, na prática profissional, dada por:

$$\sigma_a = 0,1 \left(\sqrt{N_{spt}} - 1 \right) MPa, \text{ com } 4 \leq N_{spt} \leq 16 \quad (5.6)$$

Para as correlações com CPT, Teixeira e Godoy (1996), apresentaram as seguintes expressões:

$$\sigma_a = \frac{q_c}{10} \leq 4,0 MPa, \text{ para argilas} \quad (5.7)$$

$$\sigma_a = \frac{q_c}{15} \leq 4,0 MPa, \text{ para areias} \quad (5.8)$$

Em que q_c é o valor médio do bulbo de tensões, com $q_c \geq 1,5 MPa$.

6 DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO DE SAPATAS

6.1 Descrição do Processo de Dimensionamento

Para determinar as dimensões em planta das fundações superficiais é necessário conhecer, basicamente, a tensão admissível no solo e as cargas provenientes da estrutura. Para determinar a tensão admissível no solo é necessário conhecer o perfil do subsolo, os parâmetros de resistência e deformabilidade de cada camada, os recalques admissíveis para a estrutura, a profundidade de assentamento das sapatas e as dimensões das mesmas. A determinação da capacidade de carga do solo pode ser feita com fórmulas teóricas, como a fórmula oriunda da teoria de Terzaghi. Ainda pode ser determinada por meio de correlações empíricas, como por exemplo, com uso do SPT e CPT, e provas de carga sobre placas.

No caso de sapatas com cargas centradas, a ABNT NBR 6122:2010 orienta que “A área da fundação solicitada por cargas centradas deve ser tal que as tensões transmitidas ao terreno, admitidas uniformemente distribuídas, sejam menores ou iguais à tensão admissível [...]”

Para a determinação das dimensões A e B de uma sapata existem várias metodologias a adotar-se. Nas metodologias voltadas para o cálculo estrutural, o ponto de partida é a tensão admissível do solo. A partir desse dado o calculista faz uso de processos da sua escolha e encontra as dimensões da base da sapata. Já nas metodologias com predominância dos aspectos geotécnicos, as dimensões A e B da base da sapata são adotadas, e são feitos testes para a verificação. Esses testes consistem em verificar se a tensão aplicada no solo é menor ou igual à tensão admissível nele.

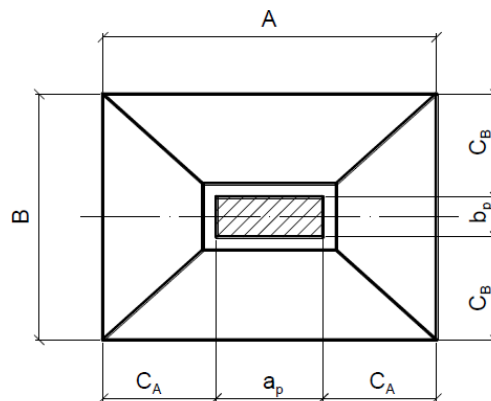
Neste trabalho serão utilizadas observações advindas das duas metodologias. Será estimado um valor para a menor dimensão da sapata e com este valor será determinado o alcance do bulbo de tensões, que ocorrerá até uma profundidade de duas vezes o valor da menor dimensão da sapata. Determinada a amplitude do bulbo de tensões, serão utilizadas correlações empíricas para a determinação da tensão admissível no solo por meio da expressão (5.4) ou (5.5), se

possível. É importante frisar que as expressões (5.6), (5.7) e (5.8) também poderiam ser empregadas, de acordo também com a disponibilidade de dados.

Bastos (2016) afirma que no intuito de obter momentos fletores solicitantes e armaduras de flexão com poucas diferenças, nas duas direções da sapata, trabalha-se para a determinação das dimensões A e B de maneira que os balaços sejam iguais ou semelhantes.

A figura abaixo mostra uma sapata, na qual c_A e c_B são distâncias da face do pilar à extremidade da sapata, em cada direção, A e B são as dimensões da base da sapata e a_p e b_p são as dimensões do pilar que está apoiado na sapata.

Figura 15 – Vista superior de sapata Isolada



Fazendo $c_A = c_B$, tem-se:

$$A - a_p = B - b_p \quad (6.1)$$

Com as observações acerca da proporcionalidade dos balanços da sapata atendida, a determinação do valor das dimensões A e B da base da sapata, podem ser calculadas por meio das relações abaixo:

$$A = \sqrt{S} + \frac{a_p - b_p}{2} \quad (6.2)$$

$$B = \sqrt{S} - \frac{a_p - b_p}{2} \quad (6.3)$$

Porém, o valor de B já foi adotado. Por conta disso, a expressão (6.3) pode ser manipulada para a determinação da área da base da sapata, gerando a expressão:

$$S = \left(B + \frac{a_p - b_p}{2} \right)^2 \quad (6.4)$$

De posse do valor de S, utiliza-se a expressão abaixo para determinar-se o valor da tensão aplicada ao solo pela base da sapata:

$$\sigma_{apl} = \frac{1,05P}{S} \quad (6.5)$$

onde:

S: Área da base da sapata;

P: Carga do pilar;

σ_{apl} : Tensão aplicada no solo.

O valor 1,05 na expressão tem como objetivo estimar o peso próprio da sapata e do solo sobre a sapata. A ABNT NBR 6122:2010 recomenda adotar o peso próprio da sapata como no mínimo 5% da carga vertical permanente. Campos (2015) recomenda 1,05 para sapatas flexíveis e de 1,05 a 1,10 para sapatas rígidas, e quando as parcelas relativas às ações permanentes e variáveis (cargas acidentais sobre as lajes, etc.) não forem conhecidas, adotar 1,05 como fator multiplicador da carga total.

De posse desses valores compara-se a tensão admissível no solo à tensão aplicada neste solo pela fundação, e verifica-se se esta última é menor que aquela primeira ($\sigma_{apl} \leq \sigma_a$). Caso essa condição seja atendida, o valor adotado inicialmente para a dimensão B da sapata está correto e pode ser adotado definitivamente, e posteriormente utilizar-se a expressão (6.2) para calcular o valor da dimensão A da fundação e finalizar o processo de dimensionamento.

Porém, se o valor da tensão aplicada no solo pela fundação for maior que o da tensão admissível no mesmo, o processo de dimensionamento deve ser retomado adotando-se outro valor para a dimensão B da sapata.

Após determinar um valor adequado para B, calcula-se os valores de A, além dos valores de H e h, as alturas da sapata, dadas por:

$$H = \frac{A - a_p}{3} = \frac{B - b_p}{3} \quad (6.6)$$

e:

$$h = \frac{H}{3} \geq 20cm \quad (6.7)$$

A expressão (6.6) consiste em considerar a sapata rígida, de acordo com a ABNT NBR 6118:2014. É importante frisar que a altura sapata deve ser maior que o espaço necessário para ancorar as barras dos pilar. Assim, é necessário calcular o comprimento de ancoragem de tais barras, sendo um dado necessário o diâmetro destas barras.

Esse processo estabelece valores para as dimensões A e B da sapata, as quais concederão segurança à edificação. No entanto, esse valor de B adotado inicialmente nem sempre é ideal, o que provoca a necessidade de retomar o calculo novamente, desde o início, objetivando uma nova solução. Tal solução também pode não ser a correta, o que implica na retomada do processo novamente. Um processo que pode se tornar exaustivo, demandando muito tempo.

6.2 Descrição do Processo de Dimensionamento por meio de Algoritmo

Objetivando a introduzir um método que determine as dimensões da base da sapata, será implementado, por meio de um algoritmo computacional, um processo que fará várias iterações, adotando valores diferentes para a dimensão B da sapata, e fazendo várias verificações entre a tensão aplicada e admissível, no intuito de determinar valores para as dimensões da base do elemento de fundação, adequados para sua execução. Na construção do algoritmo é utilizado o Método da Bissecção. O objetivo deste método será resolver a seguinte função:

$$f(B) = \sigma_a - \sigma_{apl} \geq 0 \quad (6.8)$$

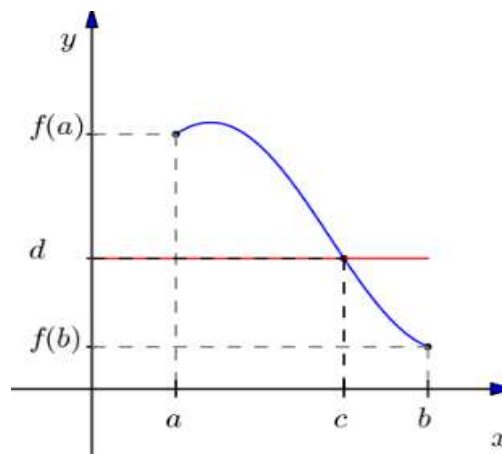
Sendo assim, o objetivo do método, descrito a seguir, é determinar o menor valor de B que satisfaça a equação (6.8).

6.2.1 Método da Bisseção

Esse método, serve para determinar aproximações de raízes de uma função f em um determinado intervalo $]a,b[$. Para isso, o intervalo $]a,b[$ é bissectado repetidamente, seleccionando um subintervalo de $]a,b[$, que contém a raiz de f . Para determinar o subintervalo no qual a raiz se encontra, é utilizado o Teorema do Valor Intermediário e o Teorema de Bolzano.

O Teorema do valor intermediário diz que se uma função f é contínua em um intervalo $[a,b]$, então qualquer valor d , tal que $f(a) < d < f(b)$ ou $f(a) > d > f(b)$, é da forma $f(c)$, para um valor c contido no intervalo $[a,b]$.

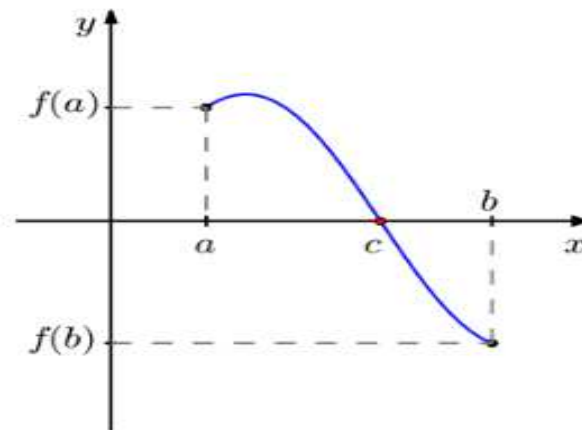
Figura 16 – Gráfico de função continua 1



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_da_bisse%C3%A7%C3%A3o

Já o teorema de Bolzano é um caso particular do teorema do valor intermediário, no qual $d = 0$. O teorema afirma que se há dois valores a e b , que obedecem a condição $f(a) \cdot f(b) < 0$, então existe pelo menos um ponto c , pertencente ao intervalo $]a,b[$, tal que $f(c) = 0$, ou seja, a função tem pelo menos uma raiz entre os valores a e b , que são extremos do intervalo.

Figura 17 – Gráfico de função contínua 2



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_da_bisse%C3%A7%C3%A3o

Esses dois teoremas são o ponto de partida do Método da Bissecção. A partir deles o intervalo $[a, b]$ é dividido ao meio, gerando um valor c , sendo $c = \frac{a+b}{2}$, ou seja c é o ponto médio do intervalo $[a, b]$. Estabelecido o valor de c , verifica-se em qual subintervalo encontra-se a raiz da função. Para tanto se faz o produto $f(a) \cdot f(c)$, se $f(a) \cdot f(c) < 0$, então a raiz de f estará no subintervalo $[a, c]$, caso contrário estará no subintervalo $[c, b]$.

Esse processo é repetido, ou seja, são feitas várias iterações até que se tenha a aproximação com a precisão desejada. A precisão da aproximação é denotada por ϵ e é estabelecida na resolução do problema, pelo operador do método, segundo as necessidades da solução.

O número de iterações é determinado pela expressão:

$$n > \frac{\log(b-a) - \log \epsilon}{\log 2} \quad (6.9)$$

Arredonda-se n para o primeiro inteiro maior que ele.

A cada iteração feita com o Método da Bissecção, o erro absoluto é reduzido pela metade, dessa forma o método converge, ou seja, aproxima-se do valor da raiz, de maneira linear. Por esse motivo, quando comparado a métodos numéricos como o de Newton ou o Método das Secantes é relativamente lento, sendo necessário um número relativamente grande de iterações para atingir a precisão desejada. Essa desvantagem pode ser superada com o uso de uma

ferramenta, um programa de computador que fará todas as iterações necessárias para a determinação da raiz. Além disso, estes dois últimos métodos podem não ser bem aplicáveis em funções que apresentam pontos de descontinuidade, que pode ser o caso a equação (6.8).

Para suprir essa necessidade é utilizada uma linguagem de programação chamada Python, para a criação de algoritmo que execute todo o processo característico do Método da Bisseção. Nesse caso o algoritmo determinará o valor mais adequado para cada uma das dimensões da sapata. Definidos esses valores a fundação, estará dimensionada geometricamente, tendo os critérios de segurança atendidos.

O ponto de partida do algoritmo são os dados de entrada, nos quais estão inclusos os valores máximo e mínimo da dimensão B da sapata, que delimitam o intervalo a ser bissectado nas iterações. Os dados de entrada são:

- Força Concentrada na Sapata (kN) – P;
- Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%) – pp;
- Resistência à Compressão Característica do Concreto do Pilar (MPa) – f_{ck} ;
- Dimensão máxima da Sapata (m) – máx;
- Dimensão mínima da Sapata (m) – mín;
- Profundidade de Assentamento Sapata (m) – h;
- Maior Dimensão do Pilar (m) – a;
- Menor Dimensão do Pilar (m) – b;
- Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50 A – d_{pilar} ;
- Valores da sondagem SPT;
- Tolerância da solução – tol.

Após o fornecimento dos dados de entrada pelo usuário, o algoritmo executa todo o processo de dimensionamento geométrico da sapata, apresentando como resultado final as dimensões A, B, H e h da fundação.

6.2.2 Exemplos

A seguir serão expostos dois exemplos de dimensionamento geométrico de sapatas. Os exemplos estão contidos na literatura, na obra “Fundações e contenções de edifícios, qualidade total na gestão de projetos e execução”, do autor Ivan Joppert Jr, publicado pela editora PINI no ano de 2007, na página 103.

As dimensões da sapata serão recalculadas por meio do algoritmo supracitado, elaborado em Python na versão 3.5, componente do trabalho de Abreu, Corrêa e Aguiar (2016), em elaboração. No referido livro essas dimensões encontradas são, no exemplo 1 e exemplo 2, respectivamente: A = 2,50m e B = 3,00m; A = 4,00m e B = 4,00m.

Exemplo 1A:

Entrada de dados

Força Concentrada na Sapata (kN) – $P = 3000\text{kN}$

Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%) – $pp = 5$

Resistência à Compressão Característica do Concreto do Pilar (MPa) – $f_{ck} = 20\text{MPa}$

Dimensão máxima da Sapata (m) – $máx = 4\text{m}$;

Dimensão mínima da Sapata (m) – $mín = 0,60\text{m}$;

Profundidade de Assentamento Sapata (m) – $h = 2\text{m}$;

Maior Dimensão do Pilar (m) – $a = 1\text{m}$;

Menor Dimensão do Pilar (m) – $b = 0,25\text{m}$;

Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A – $d_{\text{pilar}} = 10\text{mm}$;

SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35];

Tolerância da solução – tol = 0,001m.

1ª Iteração

i) Determinação do Bulbo de Tensões

Para B = 0,60m

$$Bulbo = 2 \cdot B = 2 \cdot 0,60 = 1,20m$$

ii) Cálculo do SPT Médio

$$SPT_{médio} = \frac{20+21}{2} = 20,5$$

iii) Cálculo da Tensão Admissível

$$\sigma_{adm} = \frac{20,5}{0,05} = 410 \text{ KPa}$$

iv) Cálculo da Área da Base da Sapata

$$S = (B + \frac{(a-b)}{2})^2 = (0,60 + \frac{(1-0,25)}{2})^2 = 0,95m^2$$

v) Cálculo da Tensão Aplicada

$$\sigma_{apl} = \frac{(1+pp)P}{S} = \frac{(1+0,05)3000}{0,95} = 3315,79 \text{ KPa}$$

vi) Verificação

$$f(B) = \sigma_{adm} - \sigma_{apl} = 410 - 3315,79 = -2905,79 \text{ KPa}$$

Verifica-se que a diferença entre as Tensões Admissível e Tensão Aplicada resulta em um valor menor que zero, ou seja, o valor da tensão aplicada é maior que o da tensão admissível. Com isso, o valor de B = 0,60m, não é adequado como medida para dimensão da base da fundação.

O processo deve recomeçar, porém agora com o Valor Máximo da dimensão da base da sapata.

2ª Iteração

i) Determinação do Bulbo de Tensões

Para $B = 4,00m$

$$Bulbo = 2 \cdot B = 2 \cdot 4 = 8 m$$

ii) Cálculo do SPT Médio

$$SPT_{médio} = \frac{20+21+19+20+20+21+19+20+24}{9} = 20,44$$

iii) Cálculo da Tensão Admissível

$$\sigma_{adm} = \frac{20,44}{0,05} = 408,89 KPa$$

iv) Cálculo da Área da Base da Sapata

$$S = (B + \frac{(a-b)}{2})^2 = (4 + \frac{(1-0,25)}{2})^2 = 19,14m^2$$

v) Cálculo da Tensão Aplicada

$$\sigma_{apl} = \frac{(1+pp)P}{S} = \frac{(1+0,05)3000}{19,14} = 164,57 KPa$$

vi) Verificação

$$f(B) = \sigma_{adm} - \sigma_{apl} = 420 - 164,58 = 244,32 KPa$$

Verifica-se que a diferença entre as Tensões Admissível e Tensão Aplicada, resulta em um valor maior que zero. O valor de $B = 4m$, é adequado como medida para dimensão da base da fundação. Porém será aplicado o método da bissecção para calcular um novo valor de B , pois o valor utilizado é o máximo valor dessa dimensão, então é possível que haja um valor menor que esse que seja solução para o problema.

Para adotar o valor de B , lança-se mão do Método da Bissecção, calculando o valor médio do intervalo entre $0,60m$ e $4m$. Esse valor intermediário do intervalo é o novo valor de B .

$$B = \frac{0,60+4}{2} = 2,3m$$

O processo se reinicia com $B = 2,3m$.

3ª Iteração

i) Determinação do Bulbo de Tensões

Para $B = 2,3 \text{ m}$

$$Bulbo = 2 \cdot B = 2 \cdot 2,3 = 4,6 \text{ m}$$

ii) Cálculo do SPT Médio

$$SPT_{\text{médio}} = \frac{20+21+19+20+20}{5} = 20$$

iii) Cálculo da Tensão Admissível

$$\sigma_{adm} = \frac{20}{0,05} = 400 \text{ KPa}$$

iv) Cálculo da Área da Base da Sapata

$$S = \left(B + \frac{(a-b)}{2}\right)^2 = \left(2,3 + \frac{(1-0,25)}{2}\right)^2 = 7,15 \text{ m}^2$$

v) Cálculo da Tensão Aplicada

$$\sigma_{apl} = \frac{(1+pp)P}{S} = \frac{(1+0,05)3000}{7,15} = 440,21 \text{ KPa}$$

vi) Verificação

$$f(B) = \sigma_{adm} - \sigma_{apl} = 400 - 440,55 = -40,21 \text{ KPa}$$

Verifica-se que a diferença entre as Tensões Admissível e Tensão Aplicada resulta em um valor menor que zero, logo o valor de $B = 2,3 \text{ m}$, não é adequado como medida para dimensão da base da fundação, por gerar uma tensão aplicada no solo maior que a tensão que esse solo suporta.

É necessário adotar outro valor para B , novamente. Para tanto, lança-se mão outra vez do Método da Bissecção, da mesma maneira que no início da iteração anterior, porém dessa vez deve-se observar os sinais das imagens dos valores de B , pela função $f(B)$. Verifica-se que quando para os valores de b iguais a 0,60, 4 e 2,3 as respectivas imagens são $f(0,60) = -2905,79$; $f(4) = 244,32$; $f(2,3) = -40,21$.

De acordo com o Método da bisseção, com base no Teorema de Bolzano, o valor procurado está entre os valores 2,3m e 4m, pois o produto das imagens desses valores gera um valor cujo sinal é negativo, ou seja, têm de sinais opostos.

Um subintervalo entre 0,60m e 4m é adotado. Os extremos do novo intervalo são 2,3 m e 4m. Um novo valor médio entre 2,3m e 4m é calculado e será o novo valor de B.

$$B = \frac{2,3+4}{2} = 3,15m$$

O processo recomeça com $B = 3,15m$

4ª Iteração

i) Determinação do Bulbo de Tensões

Para $B = 3,15m$

$$Bulbo = 2 \cdot B = 2 \cdot 3,15 = 6,3 m$$

ii) Cálculo do SPT Médio

$$SPT_{médio} = \frac{20+21+19+20+20+21+19}{7} = 20$$

iii) Cálculo da Tensão Admissível

$$\sigma_{adm} = \frac{20}{0,05} = 400 KPa$$

iv) Cálculo da Área da Base da Sapata

$$S = \left(B + \frac{(a-b)}{2}\right)^2 = \left(3,15 + \frac{(1-0,25)}{2}\right)^2 = 12,42m^2$$

v) Cálculo da Tensão Aplicada

$$\sigma_{apl} = \frac{(1+pp)P}{S} = \frac{(1+0,05)3000}{12,42} = 253,51 KPa$$

vi) Verificação

$$f(B) = \sigma_{adm} - \sigma_{apl} = 400 - 253,15 = 146,49 KPa$$

Verifica-se que a diferença entre as Tensões Admissível e Tensão Aplicada resulta em um valor maior que zero, logo o valor de $B = 3,15\text{m}$ é adequado como medida para dimensão. É necessário observar o extremo do intervalo, que possui imagem de sinal oposto a $f(3,15)$, para verificar-se a tolerância estabelecida, que é de 1mm. Ao analisar percebe-se que tal tolerância ainda não está satisfeita. Será necessário bissectar, ou seja, calcular o ponto médio, do intervalo entre 2,3m e 3,15m, pois suas imagens têm sinal contrário. Assim será adotado um novo valor para B e recomeçar o processo iterativo novamente. Esse processo se repete até que a tolerância adotada seja satisfeita.

Quando processo atinge valores que obedecem a tolerância, será adotado o último valor calculado e este arredondado para o mais próximo valor múltiplo de 5, com duas casas decimais. O processo de determinação do valor de B está finalizado. Será então calculado o valor da dimensão A da base da sapata e as alturas da mesma.

A seguir uma tabela mostra todas as iterações necessárias para a determinação do valor de B.

Tabela 2 - Iterações no algoritmo

VALOR DE B	ALCANSE DO BULBO	SPT MÉD	TENSÃO ADMISSÍVEL (σ_a)	VALOR DE S	TENSÃO APLICADA (σ_{apl})	$\sigma_{apl} - \sigma_a$
1ª ITERAÇÃO						
0,6	1,2	20,5	410	0,951	3313,609	- 2903,609
2ª ITERAÇÃO						
4	8	20,44	408,89	19,141	164,571	244,317
3ª ITERAÇÃO						
2,3	4,6	20	400	7,156	440,213	-40,213
4ª ITERAÇÃO						
3,15	6,3	20	400	12,426	253,508	146,492
5ª ITERAÇÃO						
2,725	5,45	20,17	403,33	9,61	327,784	75,550
6ª ITERAÇÃO						
2,513	5,03	20,17	403,33	8,338	377,804	25,529
7ª ITERAÇÃO						
2,406	4,81	20	400	7,735	407,221	-7,221

8ª ITERAÇÃO						
2,459	4,92	20	400	8,034	392,099	7,901
9ª ITERAÇÃO						
2,433	4,87	20	400	7,884	399,553	0,447
10ª ITERAÇÃO						
2,420	4,84	20	400	7,809	403,360	-3,360
11ª ITERAÇÃO						
2,426	4,85	20	400	7,847	401,450	-1,450
12ª ITERAÇÃO						
2,429	4,86	20	400	7,865	400,500	-0,500
13ª ITERAÇÃO						
2,431	4,86	20	400	7,874	400,026	-0,026
14ª ITERAÇÃO						
2,432	4,86	20	400	7,879	399,789	0,211

Os dois últimos extremos de intervalo; 2,431m e 2,432m, têm diferença de 0,001 mm, o que significa que a tolerância foi obedecida. O valor a ser utilizado é o valor 2,432 m, pois o mesmo gera uma tensão aplicada menor que a tensão admissível no terreno.

O valor de 2,432m é arredondado para 2,45m. Este será o valor de B, menor dimensão da sapata.

Para determinar o valor de A faz-se:

$$A = \sqrt{S} + \frac{(a-b)}{2} = \sqrt{7,879} + \frac{(1-0,25)}{2} = 3,15m$$

As altura H e h da sapata, são dadas por:

$$H = \frac{(A-a)}{3} = \frac{(3,20-1)}{3} = 0,75m$$

$$h = \frac{H}{3} = \frac{0,75}{3} = 0,25 \quad h = \frac{H}{3} = \frac{0,75}{3} = 0,25m$$

As dimensões necessárias para o dimensionamento geométrico da sapata estão determinadas, sendo:

- A = 3,20 m
- B = 2,45 m

- $H = 0,75 \text{ m}$
- $h = 0,25 \text{ m}$

Dessa forma o processo está completo e a sapata dimensionada geometricamente. Nesse exemplo para determinar o valor da tensão admissível utilizou-se a expressão: $\sigma_a = \frac{SPT_{médio}}{50} \text{ (MPa)}$, recomendada por Teixeira (1996).

Exemplo 1B

Este exemplo consiste nos mesmos dados apresentados no Exemplo 1, modificando apenas o cálculo da tensão admissível sendo este feito através da expressão $\sigma_a = \frac{SPT_{médio}}{70} \text{ (MPa)}$, recomendada por Berberian (1996).

Entrada de dados

Força Concentrada na Sapata (kN) – $P = 3000 \text{ kN}$

Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%) – $pp = 5$

Resistência à Compressão Característica do Concreto do Pilar (MPa) – $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$

Dimensão máxima da Sapata (m) – $máx = 4 \text{ m}$;

Dimensão mínima da Sapata (m) – $mín = 0,60 \text{ m}$;

Profundidade de Assentamento Sapata (m) – $h = 2 \text{ m}$;

Maior Dimensão do Pilar (m) – $a = 1 \text{ m}$;

Menor Dimensão do Pilar (m) – $b = 0,25 \text{ m}$;

Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A – $d \text{ pilar} = 10 \text{ mm}$;

SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35];

Tolerância da solução – $tol = 0,001 \text{ m}$.

Resultados obtidos com o algoritmo em Python 3.5:

As dimensões da sapata são:

- $A = 3,70\text{m}$
- $B = 2,95\text{m}$
- $H = 0,90\text{m}$
- $h = 0,30\text{m}$

Exemplo 1C

Este exemplo consiste nos mesmos dados apresentados no Exemplo 1A, sendo apenas desconsiderado o peso próprio da sapata.

Entrada de dados

Força Concentrada na Sapata (kN) – $P = 3000\text{kN}$

Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%) – $pp = 0$

Resistência à Compressão Característica do Concreto do Pilar (MPa) –
 $f_{ck} = 20\text{ MPa}$

Dimensão máxima da Sapata (m) – $m_{\text{máx}} = 4\text{m}$;

Dimensão mínima da Sapata (m) – $m_{\text{mín}} = 0,60\text{m}$;

Profundidade de Assentamento Sapata (m) – $h = 2\text{m}$;

Maior Dimensão do Pilar (m) – $a = 1\text{m}$;

Menor Dimensão do Pilar (m) – $b = 0,25\text{m}$;

Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A – $d_{\text{pilar}} = 10\text{mm}$;

SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35];

Tolerância da solução – $tol = 0,001\text{m}$.

Resultados obtidos com o algoritmo em Python 3.5:

As dimensões da sapata são:

- $A = 3,15 \text{ m}$
- $B = 2,40 \text{ m}$
- $H = 0,75 \text{ m}$
- $h = 0,25 \text{ m}$

Exemplo 2A:

Dados de Entrada

Força Concentrada na Sapata (kN) - $P = 6400\text{kN}$;

Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%) - $pp = 5$;

Resistência à Compressão Característica do Concreto do Pilar (MPa) –
 $f_{ck} = 20\text{MPa}$;

Dimensão máxima da Sapata (m) - $máx = 5\text{m}$;

Dimensão mínima da Sapata (m) - $mín = 0,6\text{m}$;

Profundidade de Assentamento Sapata (m) - $h = 2\text{m}$;

Maior Dimensão do Pilar (m) - $a = 2\text{m}$;

Menor Dimensão do Pilar (m) - $b = 1,5\text{m}$;

Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A - $d_{\text{pilar}} = 10\text{mm}$;

SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35];

Tolerância da solução - $tol = 0.001\text{m}$

Resultados obtidos com o algoritmo em Python 3.5:

As dimensões da sapata são:

- $A = 4,35\text{m}$
- $B = 3,85\text{m}$
- $H = 0,80\text{m}$
- $h = 0,30\text{m}$

Exemplo 2B:

Este exemplo consiste nos mesmos dados apresentados no Exemplo 2, modificando apenas o cálculo da tensão admissível sendo este feito através da expressão $\sigma_a = \frac{SPT_{\text{médio}}}{70}$ (MPa), recomendada por Berberian (1996).

Dados de Entrada

Força Concentrada na Sapata (kN) - $P = 6400\text{kN}$;

Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%) - $pp = 5$;

Resistência à Compressão Característica do Concreto da Sapata e do Pilar (MPa) – $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$;

Dimensão máxima da Sapata (m) - $m_{\text{máx}} = 6\text{m}$;

Dimensão mínima da Sapata (m) - $m_{\text{mín}} = 0,6\text{m}$;

Profundidade de Assentamento Sapata (m) - $h = 2\text{m}$;

Maior Dimensão do Pilar (m) - $a = 2\text{m}$;

Menor Dimensão do Pilar (m) - $b = 1.5\text{m}$;

Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A - $d_{\text{pilar}} = 10\text{mm}$;

SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35];

Tolerância da solução - $tol = 0.001\text{m}$

Resultados obtidos com o algoritmo em Python 3.5:

A dimensão máxima adotada para a sapata não suporta o carregamento aplicado.

Com esse resultado deve-se aumentar a maior dimensão da sapata para redimensiona-la. O valor adotado como máximo será $B = 6\text{m}$, e as novas dimensões calculadas são:

- $A = 5,10\text{ m}$
- $B = 4,65\text{ m}$
- $H = 1,05\text{ m}$
- $h = 0,35\text{ m}$

Exemplo 2C:

Este exemplo consiste nos mesmos dados apresentados no Exemplo 2A, sendo apenas desconsiderado o peso próprio da sapata.

Dados de Entrada

Força Concentrada na Sapata (kN) - $P = 6400\text{kN}$;

Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%) - $pp = 0$;

Resistência à Compressão Característica do Concreto do Pilar (MPa) – $f_{ck} = 20\text{ MPa}$;

Dimensão máxima da Sapata (m) - $máx = 5\text{m}$;

Dimensão mínima da Sapata (m) - $mín = 0,6\text{m}$;

Profundidade de Assentamento Sapata (m) - $h = 2\text{m}$;

Maior Dimensão do Pilar (m) - $a = 2\text{m}$;

Menor Dimensão do Pilar (m) - $b = 1,5\text{m}$;

Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A – $d_{\text{pilar}} = 10\text{mm}$;

SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35];

Tolerância da solução - $\text{tol} = 0.001\text{m}$

Resultados obtidos com o algoritmo em Python 3.5:

As dimensões da sapata são:

- $A = 4,30\text{ m}$
- $B = 3,80\text{ m}$
- $H = 0,80\text{ m}$
- $h = 0,30\text{ m}$

Ao comparar-se os exemplos 1A e 2A com os exemplos 1C e 2C, percebe-se que as dimensões da sapata sofrem uma redução de 0,05 m quando o percentual de contribuição do peso próprio é desconsiderado.

Quando os exemplos 1A e 2A são comparados aos exemplos 1B e 2B, nota-se um aumento significativo nas dimensões da sapata. Isso se deve a mudança na maneira de calcular a tensão admissível. Nos exemplos 1A e 2A a tensão admissível é calculada utilizando-se a expressão $\sigma_a = \frac{SPT_{\text{médio}}}{50}$, já nos exemplos 1B e 2B essa tensão é determinada pela expressão $\sigma_a = \frac{SPT_{\text{médio}}}{70}$. A variação no valor do denominador provoca uma diferença considerável nos valores das dimensões A e B ao final do processo.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs inicialmente um método de dimensionamento geométrico de fundações superficiais do tipo sapatas isoladas, submetidas apenas a cargas centradas, com base em correlações empíricas de sondagem SPT.

O método foi elaborado e transcrito para um algoritmo computacional em linguagem de programação Python, na versão 3.5 e fez uso do Método da bisseção na sua elaboração.

Foram utilizados, para desenvolver o processo, características como resistência do concreto a ser utilizado na execução da fundação, profundidade de assentamento da sapata, carga proveniente do pilar e dimensões do mesmo, além de outros parâmetros.

Nota-se que o algoritmo implementado se mostra capaz de determinar os valores das dimensões da sapata, com pequenas variações, para mais, em relação a métodos existentes na literatura a cerca do dimensionamento de fundações.

É necessário, porém, refinar o processo para que esses valores possam ser otimizados, objetivando assim o melhor custo benefício na construção e o mínimo de desperdício de material, visto que se reduzidas as dimensões do elemento de fundação por sapata o volume de concreto utilizado também pode ser reduzido.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

No intuito de dar continuidade a esse estudo e aumentar a abrangência do processo de dimensionamento, sugere-se para trabalhos futuros:

- Acrescentar na formulação do algoritmo outros esforços solicitantes, como momentos fletores e forças horizontais;
- Considerar recalques na formulação;
- Aplicação a métodos teóricos existentes, como o método de Terzaghi;
- Elaboração de um software com interface gráfica.

REFERÊNCIAS

ABREU, Rafael Otávio Alves; CORRÊA, José Vitor Araújo; AGUIAR, Eduardo Aurélio Barros. **Elaboração de Software para Dimensionamento Geométrico de Sapatas Isoladas Submetidas a Forças Concentradas através de Processo Iterativo**. 2016. Artigo Científico (No prelo).

AGUIAR, Ana Luiza S. de. **Capacidade de Carga de Fundação Superficial de Tanque de Armazenamento de Grande Diâmetro**. 2015. 106 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ALENCAR, Grasielle A. **Mecânica dos Solos: Análise Tátil e Visual**. Disponível em:< https://www.passeidireto.com/arquivo/5934547/mec_dos_solos_aula_05__analise_tatil_visual>. Acesso em 16 de outubro de 2016.

ALMEIDA, I. F. de; CAMPOS, M. C. B. de N. Análise Comparativa no Dimensionamento de Sapatas Isoladas. In: 58º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 2016. Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: Ibracon, 2016. p.1-16.

ALONSO, Urbano R. **Exercícios de Fundações**. São Paulo: Edgar Blucher, 1983.

ALVA, Gerson M. S. **Projeto Estrutural de Sapatas**. Santa Maria: UFSM, 2007. 39p.

ANDRADE, Alysso R. de. **Caracterização dos Elementos de Fundações aplicáveis em Edificações na região de Florianópolis**. 2003. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2003.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. v. 4. 3. ed. Rio Grande: Dunas, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6484**: Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6489**: Prova de carga sobre terreno de fundação - Procedimento. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181**: Análise Granulométrica- Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10520**: Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12069/MB3406**: Solo - Ensaio de penetração de cone in situ (CPT) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

BARROSO, Leônidas C. et al. **Cálculo Numérico com Aplicações**. 2. ed. Minas Gerais: Harbra, 1987.

BASTOS, Cezar. Prospecção Geotécnica do Subsolo. In: 58º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 2016. Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: Ibracon, 2016. p.1-16.

BASTOS, Paulo Sérgio dos S. **Estruturas de Concreto III: Sapatas de Fundação**. Bauru: UNESP, 2016. 125p.

Berberian, Dickran. **Engenharia de Fundações**. Brasília: Linha Gráfica Editora LTDA, 1996.

BRASIL. Instituto Politécnico. **Fundamentos de Mecânica dos Solos**. 15. ed. Belo Horizonte: IPUC, 2010.

CAVALCANTE, Erinaldo H. ; CASAGRANDE, Michéle Dal T. **Mecânica dos Solos**. Disponível em: < <http://www.engenhariaconcursos.com.br/arquivos/MecDosSolos/mecdossolosII.pdf>>. Acesso em: 13 de novembro de 2016.

CHIOSSI, Nivaldo J. **Geologia Aplicada à Engenharia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Grêmio, 1975.

CINTRA, José A. C.; AOKI, Nelson; ALBIERO. **Fundações diretas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

COSTA, Tiago F. **Construção Civil I: Fundações**. Goiânia: PUC, 2013. 45 p.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução por EZ2Translate. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

FABRÍCIO, Márcio M.; ROSSIGNOLO, João A. **Fundações: Tecnologia das Construções II**. Disponível em:<<http://docplayer.com.br/1991310-Fundacoes-sap0653-tecnologia-das-construcoes-iiprofessoresmarciofabriciojoaoaassignolo.html>>. Acesso em: 31 de outubro de 2016

FERNANDES, Manuel de M. **Mecânica dos Solos: conceitos e princípios fundamentais**. v. 1. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

FILHO, Júlio de M. **Modelos de citação com base nas normas da ABNT**. Disponível em:<<http://www.sorocaba.unesp.br/Home/Biblioteca/modelo-de-citacoes2.pdf>>. Acesso em: 03 de novembro de 2016.

FREITAS, Ivo Emiliano B. de. **Comportamento e Projeto de Fundações Superficiais em Edifícios de Alvenaria Estrutural**. 2010. 86 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

Gonçalves Heloisa H. S. et al (2014). **Mecânica dos Solos e Fundações: PEF 522**. Disponível em: <<http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/pef0522/Apostila.pdf>>. Acesso em: 16 de outubro de 2016.

HACHICH, Waldemar. et al. **Fundações: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998.

HANSEN, J. B. A revised and extended formula for bearing capacity. Bulletin nº28, p.3-11, Danish Geotechnical Institute, 1970.

JOPPERT JR, Ivan. **Fundações e Contensões de Edifícios**: qualidade total na gestão do projeto e execução. São Paulo: Pini, 2007.

KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. **Craig Mecânica dos Solos**. Tradução de Amir Kurban. 8. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2014.

MARANGNON, M. **Capacidade de Carga dos Solos**. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/09-MS-Unidade-07-Capacidade-de-Carga-2013.pdf>>. Acesso em: 14 de outubro de 2016.

MARANGNON, M. **Métodos Diretos para Cálculo da Capacidade de Carga por meio do SPT**. Disponível em: < <http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/GF06-CapCargaProf-por-meio-SPT-2009.pdf> >. Acesso em: 14 de outubro de 2016.

MARANGNON, M. **Previsão do Comportamento de Fundações**. Disponível em: < <http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/GF04-Considera%C3%A7%C3%B5es-sobre-funda%C3%A7%C3%B5es-diretas-20121.pdf> >. Acesso em: 14 de outubro de 2016.

MENEGOTTO, Mauro L. **Previsão da curva Tensão-Recalque de Ensaios de Placa em Solo Não Saturado**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MEYERHOF, G. G. **The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads**. 3 Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., Zurich, n.1, p.440-445, 1953.

NOGUCHI, L.T.; ALBUQUERQUE, P. J. R.; MUCHETI, A. S. **Confiabilidade de fundações superficiais executadas em São Caetano do Sul/SP**. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/geosul2012/2012noguchialbuquerque.pdf>>. Acesso em: 14 de outubro de 2106.

PINTO, Carlos Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos: exercícios resolvidos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2001.

PRASNIEVSKI, Júlia G. **Reconhecimento do nível da água subterrânea na área urbana do município de Pato Branco - Paraná**. 2014. 56 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

SANTOS, Valquíria C. **Propagação de Tensões no Solo**. Disponível em: <xa.yimg.com/kq/groups/19768393/491824803/name/10_Tensoes>. Acesso em: 13 de novembro de 2016.

SIMONS, N. E.; MENZIES, K. E. **Introdução à Engenharia de Fundações**. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

SKEMPTON, A. W. **The bearing capacity of clays**. Bulding Research Congress, v. 1, p. 180-189, 1951.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1948.

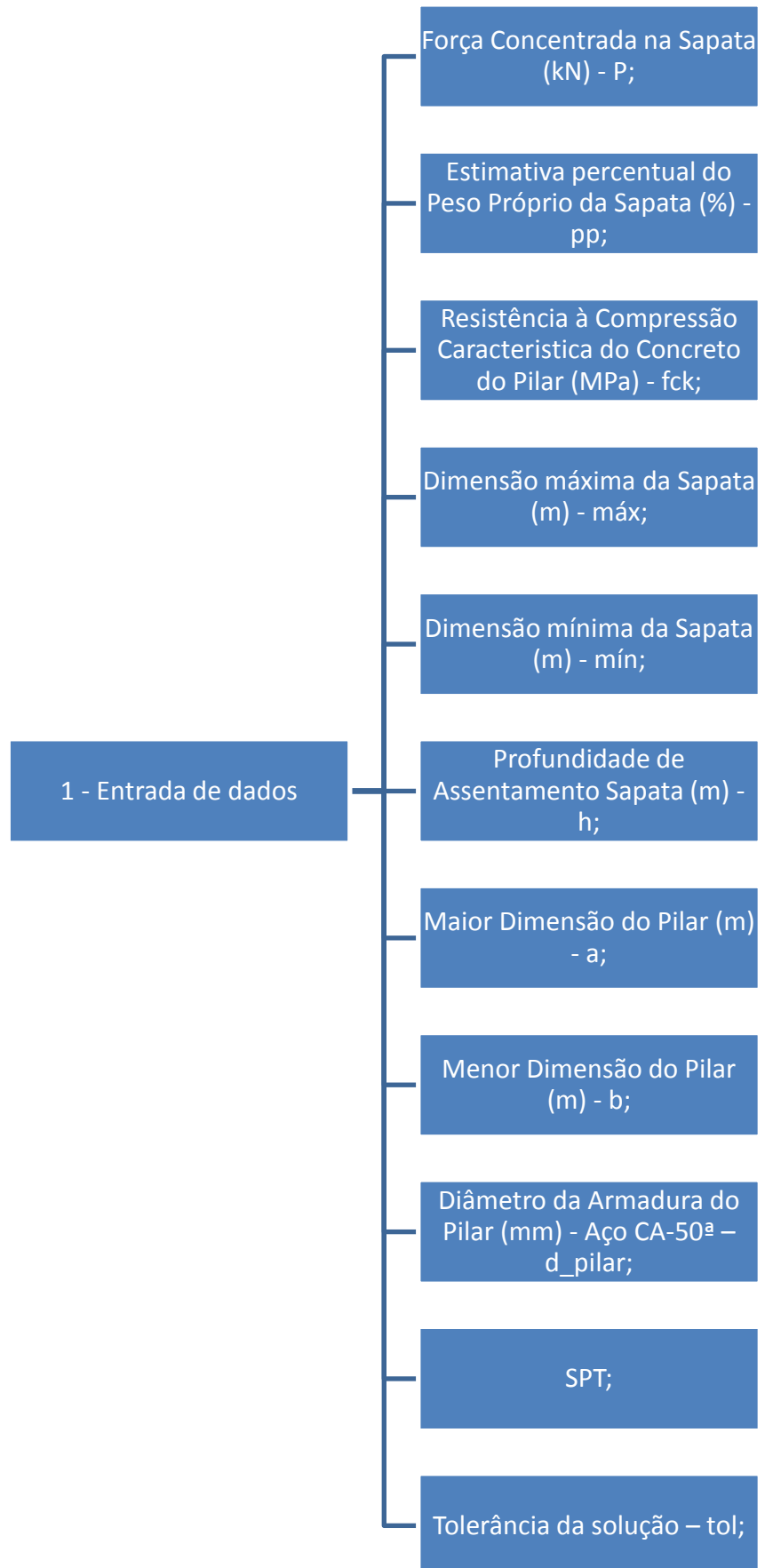
TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. **Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas**, in: HACHICH, W. et al. (ed.) *Fundações: teoria e prática*. São Paulo: Pini, Cap. 7, p.227-264,1996.

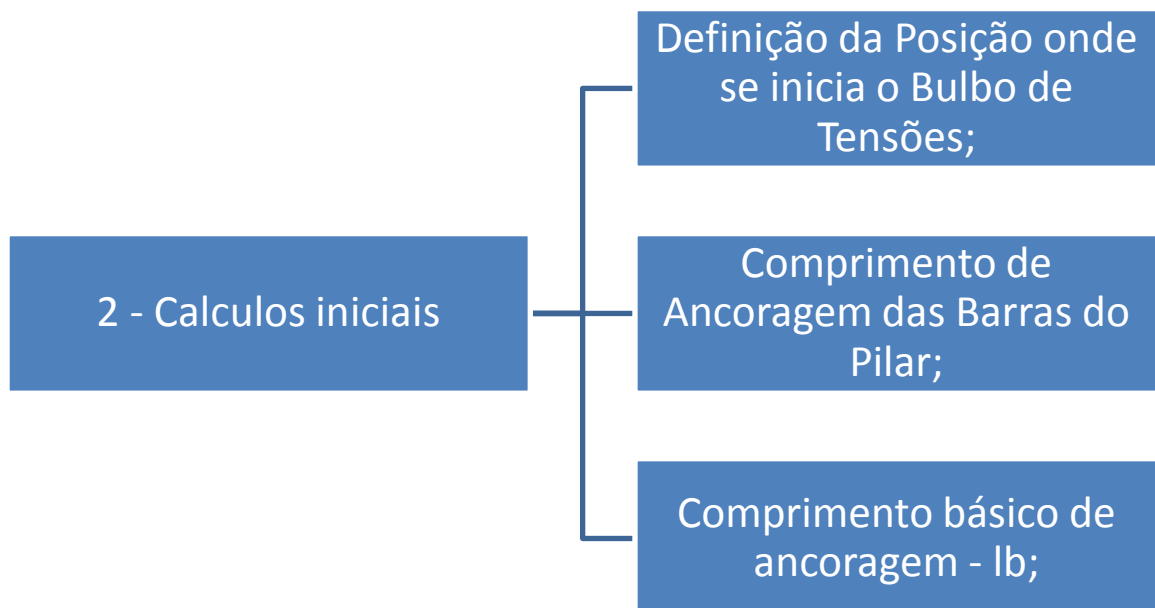
TERZAGHI, K.; PECK, R.B. **Soil mechanics in engineering practice**. New York: John Wiley and Sons, 1967.

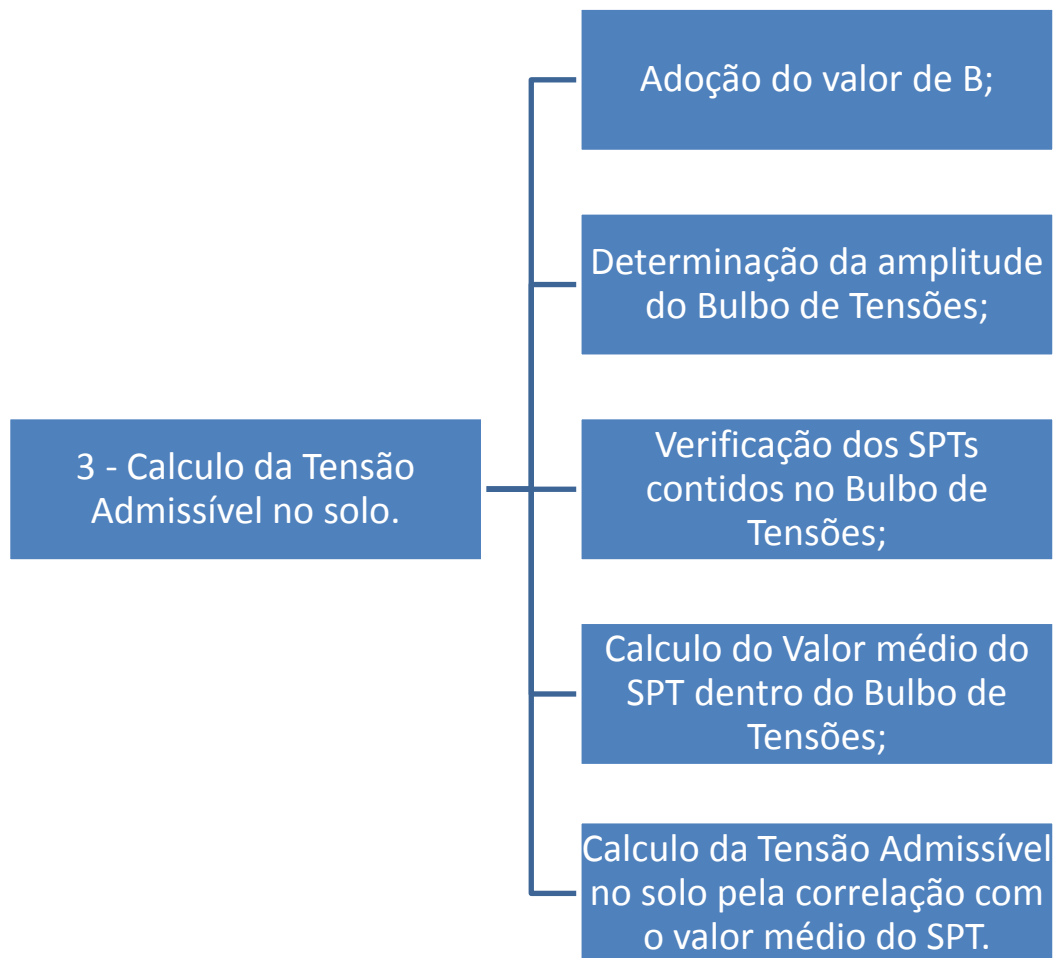
TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1943.

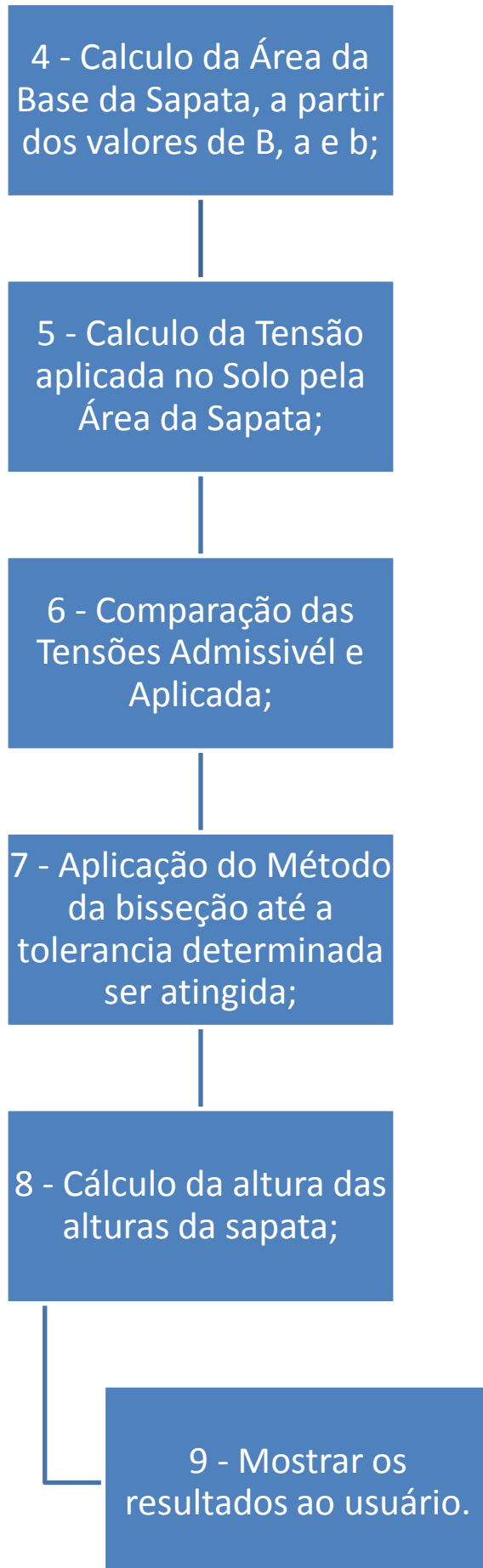
VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Resende. **Fundações: Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais, Fundações Profundas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VIEIRA, Wendel S. R. **Dimensionamento Geotécnico e Estrutural de Sapatas Rígidas**.2014. 83 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Apêndice A – Organograma do algoritmo







Anexo A – Algoritmo para os Exemplos

Exemplo 1A

```
#Dimensionamento Geométrico Sapatas Isoladas submetidas à Força
#Centrada - Processo iterativo aplicado à Método Semiempírico
import math

#Dados de Entrada
P = 3000 #Força Concentrada na Sapata (kN)
pp = 5 #Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%)
fck = 20 #Resistência à Compressão Característica do Concreto do
        #Pilar (MPa)
máx = 4 #Dimensão máxima da Sapata (m)
mín = 0.6 #Dimensão mínima da Sapata (m)
h = 2 #Profundidade de Assentamento Sapata (m)
a = 1 #Maior Dimensão do Pilar (m)
b = 0.25 #Menor Dimensão do Pilar (m)
d_pilar = 10 #Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A
SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35] #SPT do solo
tol = 0.001 #Tolerância da solução

#Cálculos Iniciais
#Definição da Posição onde se inicia o Bulbo de Tensões
início_bulbo = math.ceil(h - 1)
if h < 1: início_bulbo = 0
#Comprimento de Ancoragem das Barras do Pilar
fctd = 0.15*fck**(2/3)
if d_pilar < 32: n3 = 1
else: n3 = (132 - d_pilar)/100
fbd = 2.25*n3*fctd
lb = ((d_pilar/1000)/4)*(500/1.15)/fbd #Comprimento básico de
                                     #ancoragem

#Função utilizada para resolver o problema
def fun_comp_tensao(B, a, b, P, pp, SPT, h, início_bulbo):
    S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                           #dimensão dela e das dimensões do pilar
    tensão_apl = (1 + pp/100)*P/S #Tensão aplicada pela Sapata
    final_bulbo = math.floor(2*B + h) #Término do Bulbo de Tensões
    SPTbulbo = SPT[início_bulbo:final_bulbo] #SPTs contidos no Bulbo
                                              #de Tensões
    NSPT = sum(SPTbulbo)/len(SPTbulbo) #Valor médio do SPT dentro do
                                       #Bulbo de Tensões
    #Considerações a cerca dos limites permitidos para o Nspt
    if NSPT < 5: NSPT = 5
    if NSPT > 20: NSPT = 20
    tensão_adm = 20*NSPT #Tensão Admissível do Solo
    fun = tensão_adm - tensão_apl
    return fun

#Extremos do intervalo pesquisado
B_mín = mín
B_máx = máx
fun_inicial = fun_comp_tensao(B_mín, a, b, P, pp, SPT, h,
```

```

        início_bulbo)
fun_final = fun_comp_tensao(B_máx, a, b, P, pp, SPT, h,
        início_bulbo)

if fun_final < 0:
    print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
    dim = False
else:
    if fun_inicial > 0:
        B = B_mín #Menor dimensão da Sapata
        S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                                #dimensão dela e das dimensões do
                                #pilar
        A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da Sapata
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False
        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" %(A, B))
            dim = True
    else:
        #Pesquisa das Dimensões da Sapata
        B_anterior = -1 #Variável auxiliar
        while True:
            B_médio = (B_mín + B_máx)/2 #Processo da Bisseção
            fun_m = fun_comp_tensao(B_médio, a, b, P, pp, SPT, h,
                início_bulbo)
            if abs(B_médio - B_anterior) < tol:
                B = B_médio #Menor dimensão da Sapata
                S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da
                                        #menor dimensão dela e das
                                        #dimensões do pilar
                A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da
                                                #Sapata
                break #Interrupção do processo
            B_anterior = B_médio
            #Definição dos Novos Limites do Intervalo
            if fun_inicial*fun_m > 0:
                B_mín = B_médio
                fun_inicial = fun_m
            else:
                B_máx = B_médio
                fun_final = fun_m
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False

```

```

        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" % (A, B))
dim = True

if dim:
    H = (A - a)/3 #Altura para uma Sapata Rígida
    #Verificação da Altura da Sapata com relação ao comprimento de
    #ancoragem das barras do Pilar
    if H < 0.6*lb + 0.05: H = math.ceil(20*0.6*lb + 0.05)/20
    else: H = math.ceil(20*H)/20
    #Verificação quanto a profundidade da sapata
    if H > h and h != 0: print("Recomenda-se aprofundar a sapata")
    else:
        print("A altura para a sapata rígida é %.2fm" %H)
        #Cálculo da Altura h0 da Sapata
        if H/3 > 0.2:
            h0 = math.ceil(20*H/3)/20
        else:
            h0 = 0.2
        print("A altura menor para a sapata é %.2fm" %h0)

```

Exemplo 1B

```
#Dimensionamento Geométrico Sapatas Isoladas submetidas à Força
#Centrada - Processo iterativo aplicado à Método Semiempírico
import math

#Dados de Entrada
P = 3000 #Força Concentrada na Sapata (kN)
pp = 5 #Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%)
fck = 20 #Resistência à Compressão Característica do Concreto do
        #Pilar (MPa)
máx = 4 #Dimensão máxima da Sapata (m)
mín = 0.6 #Dimensão mínima da Sapata (m)
h = 2 #Profundidade de Assentamento Sapata (m)
a = 1 #Maior Dimensão do Pilar (m)
b = 0.25 #Menor Dimensão do Pilar (m)
d_pilar = 10 #Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A
SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35] #SPT do solo
tol = 0.001 #Tolerância da solução

#Cálculos Iniciais
#Definição da Posição onde se inicia o Bulbo de Tensões
início_bulbo = math.ceil(h - 1)
if h < 1: início_bulbo = 0
#Comprimento de Ancoragem das Barras do Pilar
fctd = 0.15*fck**(2/3)
if d_pilar < 32: n3 = 1
else: n3 = (132 - d_pilar)/100
fbd = 2.25*n3*fctd
lb = ((d_pilar/1000)/4)*(500/1.15)/fbd #Comprimento básico de
                                     #ancoragem

#Função utilizada para resolver o problema
def fun_comp_tensao(B, a, b, P, pp, SPT, h, início_bulbo):
    S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                          #dimensão dela e das dimensões do pilar
    tensão_apl = (1 + pp/100)*P/S #Tensão aplicada pela Sapata
    final_bulbo = math.floor(2*B + h) #Término do Bulbo de Tensões
    SPTbulbo = SPT[início_bulbo:final_bulbo] #SPTs contidos no Bulbo
                                             #de Tensões
    NSPT = sum(SPTbulbo)/len(SPTbulbo) #Valor médio do SPT dentro do
                                       #Bulbo de Tensões
    #Considerações a cerca dos limites permitidos para o Nspt
    if NSPT < 5: NSPT = 5
    if NSPT > 20: NSPT = 20
    tensão_adm = 100/7*NSPT #Tensão Admissível do Solo
    fun = tensão_adm - tensão_apl
    return fun

#Extremos do intervalo pesquisado
B_mín = mín
B_máx = máx
fun_inicial = fun_comp_tensao(B_mín, a, b, P, pp, SPT, h,
                              início_bulbo)
fun_final = fun_comp_tensao(B_máx, a, b, P, pp, SPT, h,
                             início_bulbo)
```

```

if fun_final < 0:
    print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
    dim = False
else:
    if fun_inicial > 0:
        B = B_mín #Menor dimensão da Sapata
        S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                                #dimensão dela e das dimensões do
                                #pilar
        A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da Sapata
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False
        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" %(A, B))
            dim = True
    else:
        #Pesquisa das Dimensões da Sapata
        B_anterior = -1 #Variável auxiliar
        while True:
            B_médio = (B_mín + B_máx)/2 #Processo da Bisseção
            fun_m = fun_comp_tensao(B_médio, a, b, P, pp, SPT, h,
                                    início_bulbo)
            if abs(B_médio - B_anterior) < tol:
                B = B_médio #Menor dimensão da Sapata
                S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da
                                        #menor dimensão dela e das
                                        #dimensões do pilar
                A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da
                                                #Sapata
                break #Interrupção do processo
            B_anterior = B_médio
            #Definição dos Novos Limites do Intervalo
            if fun_inicial*fun_m > 0:
                B_mín = B_médio
                fun_inicial = fun_m
            else:
                B_máx = B_médio
                fun_final = fun_m
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False
        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" %(A, B))
dim = True

```

```

if dim:
    H = (A - a)/3 #Altura para uma Sapata Rígida
    #Verificação da Altura da Sapata com relação ao comprimento de
    #ancoragem das barras do Pilar
    if H < 0.6*lb + 0.05: H = math.ceil(20*0.6*lb + 0.05)/20
    else: H = math.ceil(20*H)/20
    #Verificação quanto a profundidade da sapata
    if H > h and h != 0: print("Recomenda-se aprofundar a sapata")
    else:
        print("A altura para a sapata rígida é %.2fm" %H)
        #Cálculo da Altura h0 da Sapata
        if H/3 > 0.2:
            h0 = math.ceil(20*H/3)/20
        else:
            h0 = 0.2
        print("A altura menor para a sapata é %.2fm" %h0)

```

Exemplo 1C

```
#Dimensionamento Geométrico Sapatas Isoladas submetidas à Força
#Centrada - Processo iterativo aplicado à Método Semiempírico
import math

#Dados de Entrada
P = 3000 #Força Concentrada na Sapata (kN)
pp = 0 #Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%)
fck = 20 #Resistência à Compressão Característica do Concreto do
        #Pilar (MPa)
máx = 4 #Dimensão máxima da Sapata (m)
mín = 0.6 #Dimensão mínima da Sapata (m)
h = 2 #Profundidade de Assentamento Sapata (m)
a = 1 #Maior Dimensão do Pilar (m)
b = 0.25 #Menor Dimensão do Pilar (m)
d_pilar = 10 #Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A
SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35] #SPT do solo
tol = 0.001 #Tolerância da solução

#Cálculos Iniciais
#Definição da Posição onde se inicia o Bulbo de Tensões
início_bulbo = math.ceil(h - 1)
if h < 1: início_bulbo = 0
#Comprimento de Ancoragem das Barras do Pilar
fctd = 0.15*fck**(2/3)
if d_pilar < 32: n3 = 1
else: n3 = (132 - d_pilar)/100
fbd = 2.25*n3*fctd
lb = ((d_pilar/1000)/4)*(500/1.15)/fbd #Comprimento básico de
                                     #ancoragem

#Função utilizada para resolver o problema
def fun_comp_tensao(B, a, b, P, pp, SPT, h, início_bulbo):
    S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                           #dimensão dela e das dimensões do pilar
    tensão_apl = (1 + pp/100)*P/S #Tensão aplicada pela Sapata
    final_bulbo = math.floor(2*B + h) #Término do Bulbo de Tensões
    SPTbulbo = SPT[início_bulbo:final_bulbo] #SPTs contidos no Bulbo
                                             #de Tensões
    NSPT = sum(SPTbulbo)/len(SPTbulbo) #Valor médio do SPT dentro do
                                       #Bulbo de Tensões
    #Considerações a cerca dos limites permitidos para o Nspt
    if NSPT < 5: NSPT = 5
    if NSPT > 20: NSPT = 20
    tensão_adm = 20*NSPT #Tensão Admissível do Solo
    fun = tensão_adm - tensão_apl
    return fun

#Extremos do intervalo pesquisado
B_mín = mín
B_máx = máx
fun_inicial = fun_comp_tensao(B_mín, a, b, P, pp, SPT, h,
                              início_bulbo)
fun_final = fun_comp_tensao(B_máx, a, b, P, pp, SPT, h,
                             início_bulbo)
```

```

if fun_final < 0:
    print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
    dim = False
else:
    if fun_inicial > 0:
        B = B_mín #Menor dimensão da Sapata
        S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                                #dimensão dela e das dimensões do
                                #pilar
        A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da Sapata
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False
        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" %(A, B))
            dim = True
    else:
        #Pesquisa das Dimensões da Sapata
        B_anterior = -1 #Variável auxiliar
        while True:
            B_médio = (B_mín + B_máx)/2 #Processo da Bisseção
            fun_m = fun_comp_tensao(B_médio, a, b, P, pp, SPT, h,
                                    início_bulbo)
            if abs(B_médio - B_anterior) < tol:
                B = B_médio #Menor dimensão da Sapata
                S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da
                                        #menor dimensão dela e das
                                        #dimensões do pilar
                A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da
                                                #Sapata
                break #Interrupção do processo
            B_anterior = B_médio
            #Definição dos Novos Limites do Intervalo
            if fun_inicial*fun_m > 0:
                B_mín = B_médio
                fun_inicial = fun_m
            else:
                B_máx = B_médio
                fun_final = fun_m
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False
        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" %(A, B))
dim = True

```

```

if dim:
    H = (A - a)/3 #Altura para uma Sapata Rígida
    #Verificação da Altura da Sapata com relação ao comprimento de
    #ancoragem das barras do Pilar
    if H < 0.6*lb + 0.05: H = math.ceil(20*0.6*lb + 0.05)/20
    else: H = math.ceil(20*H)/20
    #Verificação quanto a profundidade da sapata
    if H > h and h != 0: print("Recomenda-se aprofundar a sapata")
    else:
        print("A altura para a sapata rígida é %.2fm" %H)
        #Cálculo da Altura h0 da Sapata
        if H/3 > 0.2:
            h0 = math.ceil(20*H/3)/20
        else:
            h0 = 0.2
        print("A altura menor para a sapata é %.2fm" %h0)

```

Exemplo 2A

```
#Dimensionamento Geométrico Sapatas Isoladas submetidas à Força
#Centrada - Processo iterativo aplicado à Método Semiempírico
import math

#Dados de Entrada
P = 6400 #Força Concentrada na Sapata (kN)
pp = 5 #Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%)
fck = 20 #Resistência à Compressão Característica do Concreto do
        #Pilar (MPa)
máx = 5 #Dimensão máxima da Sapata (m)
mín = 0.6 #Dimensão mínima da Sapata (m)
h = 2 #Profundidade de Assentamento Sapata (m)
a = 2 #Maior Dimensão do Pilar (m)
b = 1.5 #Menor Dimensão do Pilar (m)
d_pilar = 10 #Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A
SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35] #SPT do solo
tol = 0.001 #Tolerância da solução

#Cálculos Iniciais
#Definição da Posição onde se inicia o Bulbo de Tensões
início_bulbo = math.ceil(h - 1)
if h < 1: início_bulbo = 0
#Comprimento de Ancoragem das Barras do Pilar
fctd = 0.15*fck**(2/3)
if d_pilar < 32: n3 = 1
else: n3 = (132 - d_pilar)/100
fbd = 2.25*n3*fctd
lb = ((d_pilar/1000)/4)*(500/1.15)/fbd #Comprimento básico de
                                     #ancoragem

#Função utilizada para resolver o problema
def fun_comp_tensao(B, a, b, P, pp, SPT, h, início_bulbo):
    S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                          #dimensão dela e das dimensões do pilar
    tensão_apl = (1 + pp/100)*P/S #Tensão aplicada pela Sapata
    final_bulbo = math.floor(2*B + h) #Término do Bulbo de Tensões
    SPTbulbo = SPT[início_bulbo:final_bulbo] #SPTs contidos no Bulbo
                                             #de Tensões
    NSPT = sum(SPTbulbo)/len(SPTbulbo) #Valor médio do SPT dentro do
                                       #Bulbo de Tensões
    #Considerações a cerca dos limites permitidos para o Nspt
    if NSPT < 5: NSPT = 5
    if NSPT > 20: NSPT = 20
    tensão_adm = 20*NSPT #Tensão Admissível do Solo
    fun = tensão_adm - tensão_apl
    return fun

#Extremos do intervalo pesquisado
B_mín = mín
B_máx = máx
fun_inicial = fun_comp_tensao(B_mín, a, b, P, pp, SPT, h,
                              início_bulbo)
fun_final = fun_comp_tensao(B_máx, a, b, P, pp, SPT, h,
                             início_bulbo)
```

```

if fun_final < 0:
    print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
    dim = False
else:
    if fun_inicial > 0:
        B = B_mín #Menor dimensão da Sapata
        S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                                #dimensão dela e das dimensões do
                                #pilar
        A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da Sapata
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False
        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" %(A, B))
            dim = True
    else:
        #Pesquisa das Dimensões da Sapata
        B_anterior = -1 #Variável auxiliar
        while True:
            B_médio = (B_mín + B_máx)/2 #Processo da Bisseção
            fun_m = fun_comp_tensao(B_médio, a, b, P, pp, SPT, h,
                                    início_bulbo)
            if abs(B_médio - B_anterior) < tol:
                B = B_médio #Menor dimensão da Sapata
                S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da
                                        #menor dimensão dela e das
                                        #dimensões do pilar
                A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da
                                                #Sapata
                break #Interrupção do processo
            B_anterior = B_médio
            #Definição dos Novos Limites do Intervalo
            if fun_inicial*fun_m > 0:
                B_mín = B_médio
                fun_inicial = fun_m
            else:
                B_máx = B_médio
                fun_final = fun_m
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False
        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" %(A, B))
dim = True

```

```

if dim:
    H = (A - a)/3 #Altura para uma Sapata Rígida
    #Verificação da Altura da Sapata com relação ao comprimento de
    #ancoragem das barras do Pilar
    if H < 0.6*lb + 0.05: H = math.ceil(20*0.6*lb + 0.05)/20
    else: H = math.ceil(20*H)/20
    #Verificação quanto a profundidade da sapata
    if H > h and h != 0: print("Recomenda-se aprofundar a sapata")
    else:
        print("A altura para a sapata rígida é %.2fm" %H)
        #Cálculo da Altura h0 da Sapata
        if H/3 > 0.2:
            h0 = math.ceil(20*H/3)/20
        else:
            h0 = 0.2
        print("A altura menor para a sapata é %.2fm" %h0)

```

Exemplo 2B

```
#Dimensionamento Geométrico Sapatas Isoladas submetidas à Força
#Centrada - Processo iterativo aplicado à Método Semiempírico
import math

#Dados de Entrada
P = 6400 #Força Concentrada na Sapata (kN)
pp = 5 #Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%)
fck = 20 #Resistência à Compressão Característica do Concreto do
        #Pilar (MPa)
máx = 6 #Dimensão máxima da Sapata (m)
mín = 0.6 #Dimensão mínima da Sapata (m)
h = 2 #Profundidade de Assentamento Sapata (m)
a = 2 #Maior Dimensão do Pilar (m)
b = 1.5 #Menor Dimensão do Pilar (m)
d_pilar = 10 #Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A
SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35] #SPT do solo
tol = 0.001 #Tolerância da solução

#Cálculos Iniciais
#Definição da Posição onde se inicia o Bulbo de Tensões
início_bulbo = math.ceil(h - 1)
if h < 1: início_bulbo = 0
#Comprimento de Ancoragem das Barras do Pilar
fctd = 0.15*fck**(2/3)
if d_pilar < 32: n3 = 1
else: n3 = (132 - d_pilar)/100
fbd = 2.25*n3*fctd
lb = ((d_pilar/1000)/4)*(500/1.15)/fbd #Comprimento básico de
                                     #ancoragem

#Função utilizada para resolver o problema
def fun_comp_tensao(B, a, b, P, pp, SPT, h, início_bulbo):
    S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                          #dimensão dela e das dimensões do pilar
    tensão_apl = (1 + pp/100)*P/S #Tensão aplicada pela Sapata
    final_bulbo = math.floor(2*B + h) #Término do Bulbo de Tensões
    SPTbulbo = SPT[início_bulbo:final_bulbo] #SPTs contidos no Bulbo
                                             #de Tensões
    NSPT = sum(SPTbulbo)/len(SPTbulbo) #Valor médio do SPT dentro do
                                       #Bulbo de Tensões
    #Considerações a cerca dos limites permitidos para o Nspt
    if NSPT < 5: NSPT = 5
    if NSPT > 20: NSPT = 20
    tensão_adm = 100/7*NSPT #Tensão Admissível do Solo
    fun = tensão_adm - tensão_apl
    return fun

#Extremos do intervalo pesquisado
B_mín = mín
B_máx = máx
fun_inicial = fun_comp_tensao(B_mín, a, b, P, pp, SPT, h,
                              início_bulbo)
fun_final = fun_comp_tensao(B_máx, a, b, P, pp, SPT, h,
                             início_bulbo)
```

```

if fun_final < 0:
    print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
    dim = False
else:
    if fun_inicial > 0:
        B = B_mín #Menor dimensão da Sapata
        S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                                #dimensão dela e das dimensões do
                                #pilar
        A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da Sapata
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False
        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" %(A, B))
            dim = True
    else:
        #Pesquisa das Dimensões da Sapata
        B_anterior = -1 #Variável auxiliar
        while True:
            B_médio = (B_mín + B_máx)/2 #Processo da Bisseção
            fun_m = fun_comp_tensao(B_médio, a, b, P, pp, SPT, h,
                                    início_bulbo)
            if abs(B_médio - B_anterior) < tol:
                B = B_médio #Menor dimensão da Sapata
                S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da
                                        #menor dimensão dela e das
                                        #dimensões do pilar
                A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da
                                                #Sapata
                break #Interrupção do processo
            B_anterior = B_médio
            #Definição dos Novos Limites do Intervalo
            if fun_inicial*fun_m > 0:
                B_mín = B_médio
                fun_inicial = fun_m
            else:
                B_máx = B_médio
                fun_final = fun_m
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False
        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" %(A, B))
dim = True

```

```

if dim:
    H = (A - a)/3 #Altura para uma Sapata Rígida
    #Verificação da Altura da Sapata com relação ao comprimento de
    #ancoragem das barras do Pilar
    if H < 0.6*lb + 0.05: H = math.ceil(20*0.6*lb + 0.05)/20
    else: H = math.ceil(20*H)/20
    #Verificação quanto a profundidade da sapata
    if H > h and h != 0: print("Recomenda-se aprofundar a sapata")
    else:
        print("A altura para a sapata rígida é %.2fm" %H)
        #Cálculo da Altura h0 da Sapata
        if H/3 > 0.2:
            h0 = math.ceil(20*H/3)/20
        else:
            h0 = 0.2
        print("A altura menor para a sapata é %.2fm" %h0)

```

Exemplo 2C

```
#Dimensionamento Geométrico Sapatas Isoladas submetidas à Força
#Centrada - Processo iterativo aplicado à Método Semiempírico
import math

#Dados de Entrada
P = 6400 #Força Concentrada na Sapata (kN)
pp = 0 #Estimativa percentual do Peso Próprio da Sapata (%)
fck = 20 #Resistência à Compressão Característica do Concreto do
        #Pilar (MPa)
máx = 5 #Dimensão máxima da Sapata (m)
mín = 0.6 #Dimensão mínima da Sapata (m)
h = 2 #Profundidade de Assentamento Sapata (m)
a = 2 #Maior Dimensão do Pilar (m)
b = 1.5 #Menor Dimensão do Pilar (m)
d_pilar = 10 #Diâmetro da Armadura do Pilar (mm) - Aço CA-50A
SPT = [3, 20, 21, 19, 20, 20, 21, 19, 20, 24, 28, 35] #SPT do solo
tol = 0.001 #Tolerância da solução

#Cálculos Iniciais
#Definição da Posição onde se inicia o Bulbo de Tensões
início_bulbo = math.ceil(h - 1)
if h < 1: início_bulbo = 0
#Comprimento de Ancoragem das Barras do Pilar
fctd = 0.15*fck**(2/3)
if d_pilar < 32: n3 = 1
else: n3 = (132 - d_pilar)/100
fbd = 2.25*n3*fctd
lb = ((d_pilar/1000)/4)*(500/1.15)/fbd #Comprimento básico de
                                       #ancoragem

#Função utilizada para resolver o problema
def fun_comp_tensao(B, a, b, P, pp, SPT, h, início_bulbo):
    S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                           #dimensão dela e das dimensões do pilar
    tensão_apl = (1 + pp/100)*P/S #Tensão aplicada pela Sapata
    final_bulbo = math.floor(2*B + h) #Término do Bulbo de Tensões
    SPTbulbo = SPT[início_bulbo:final_bulbo] #SPTs contidos no Bulbo
                                             #de Tensões
    NSPT = sum(SPTbulbo)/len(SPTbulbo) #Valor médio do SPT dentro do
                                       #Bulbo de Tensões
    #Considerações a cerca dos limites permitidos para o Nspt
    if NSPT < 5: NSPT = 5
    if NSPT > 20: NSPT = 20
    tensão_adm = 20*NSPT #Tensão Admissível do Solo
    fun = tensão_adm - tensão_apl
    return fun

#Extremos do intervalo pesquisado
B_mín = mín
B_máx = máx
fun_inicial = fun_comp_tensao(B_mín, a, b, P, pp, SPT, h,
                              início_bulbo)
fun_final = fun_comp_tensao(B_máx, a, b, P, pp, SPT, h,
                             início_bulbo)
```

```

if fun_final < 0:
    print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
    dim = False
else:
    if fun_inicial > 0:
        B = B_mín #Menor dimensão da Sapata
        S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da menor
                                #dimensão dela e das dimensões do
                                #pilar
        A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da Sapata
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False
        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" %(A, B))
            dim = True
    else:
        #Pesquisa das Dimensões da Sapata
        B_anterior = -1 #Variável auxiliar
        while True:
            B_médio = (B_mín + B_máx)/2 #Processo da Bisseção
            fun_m = fun_comp_tensao(B_médio, a, b, P, pp, SPT, h,
                                    início_bulbo)
            if abs(B_médio - B_anterior) < tol:
                B = B_médio #Menor dimensão da Sapata
                S = (B + (a - b)/2)**2 #Área da Sapata em função da
                                        #menor dimensão dela e das
                                        #dimensões do pilar
                A = math.sqrt(S) + (a - b)/2 #Maior dimensão da
                                                #Sapata
                break #Interrupção do processo
            B_anterior = B_médio
            #Definição dos Novos Limites do Intervalo
            if fun_inicial*fun_m > 0:
                B_mín = B_médio
                fun_inicial = fun_m
            else:
                B_máx = B_médio
                fun_final = fun_m
        #Arredondamento das Dimensões
        A = math.ceil(20*A)/20
        B = math.ceil(20*B)/20
        #Verificação quanto a dimensão máxima da sapata conforme
        #informada pelo usuário
        if A > máx:
            print("A dimensão máxima não suporta a força aplicada")
            dim = False
        else:
            print("Dimensões da sapata: %.2fm e %.2fm" %(A, B))
dim = True

```

```

if dim:
    H = (A - a)/3 #Altura para uma Sapata Rígida
    #Verificação da Altura da Sapata com relação ao comprimento de
    #ancoragem das barras do Pilar
    if H < 0.6*lb + 0.05: H = math.ceil(20*0.6*lb + 0.05)/20
    else: H = math.ceil(20*H)/20
    #Verificação quanto a profundidade da sapata
    if H > h and h != 0: print("Recomenda-se aprofundar a sapata")
    else:
        print("A altura para a sapata rígida é %.2fm" %H)
        #Cálculo da Altura h0 da Sapata
        if H/3 > 0.2:
            h0 = math.ceil(20*H/3)/20
        else:
            h0 = 0.2
        print("A altura menor para a sapata é %.2fm" %h0)

```