



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

EZEQUIAS GOMES COSTA SILVA

ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO
DE SAPATAS ISOLADAS ENTRE A TEORIA DE TERZAGHI E O SOFTWARE
GEO5

Mossoró/RN
(2018)

EZEQUIAS GOMES COSTA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO
DE SAPATAS ISOLADAS ENTRE A TEORIA DE TERZAGHI E O SOFTWARE
GEO5**

Projeto apresentado ao Conselho do Curso
de Engenharia Civil da Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA
campos Mossoró, para obtenção do Título
de Graduação em Engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. John Eloi Bezerra -
UFERSA

MOSSORÓ
(2018)

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

S586a Silva, Ezequias Gomes Costa.
ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE
DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS ISOLADAS ENTRE A
TEORIA DE TERZAGHI E O SOFTWARE GE05 / Ezequias
Gomes Costa Silva. - 2018.
46 f. : il.

Orientador: John Eloi Bezerra.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2018.

1. Microsoft Office Excel. 2. Capacidade de
Carga do Solo. 3. Software GE05. I. Bezerra, John
Eloi, orient. II. Título.

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

EZEQUIAS GOMES COSTA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO
DE SAPATAS ISOLADAS ENTRE A TEORIA DE TERZAGHI E O SOFTWARE
GEO5**

Projeto apresentado ao Conselho de Curso
de Engenharia Civil da Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA
campos Mossoró, para obtenção do Título
de Graduação em Engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. John Eloi Bezerra -
UFERSA

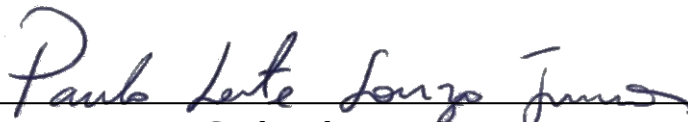
APROVADA EM: 17 / 09 / 2018.

BANCA EXAMINADORA



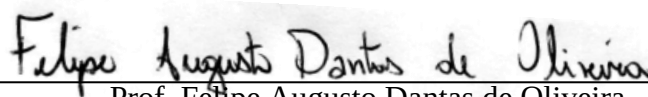
Prof. John Eloi Bezerra - UFERSA

Presidente



Eng. Civil Paulo Leite Souza Junior

Primeiro Membro



Prof. Felipe Augusto Dantas de Oliveira

Segundo Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre me deu força, saúde, inteligência, habilidades e perseverança para suportar momentos difíceis ao longo dessa caminhada e em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Jacilene da Costa Silva e Ezequiel Gomes da Silva, por me apoiar em todas as minhas escolhas, por dedicar boa parte do seu tempo me educando, mostrando o certo e o errado, por todo amor e atenção, e todos os esforços que fizeram para que eu chegasse a concluir mais uma etapa da minha vida.

Aos meus irmãos, Elivelton Gomes da Costa Silva e Elkysson Gomes da Costa Silva, pelo companheirismo e convivência e principalmente por ter paciência nos meus momentos de estresses.

A minha tia Maria de Fátima, meu tio Abel de Oliveira e meu primo Alan Vitor que foram como minha segunda família e me ajudaram em vários momentos, e todos os outros, avós, tios, tias, primos, primas que de uma forma ou outra me ajudaram nessa caminhada.

Aos meus amigos de Universidade João Paulo Silva do Nascimento, Leonardo Bruno, Alberto Manoel, Helvis Dias, Marcos Barbosa, Wanderson Emanuel, Isaac Esdras, Gleimeson Roney, Paulo Diego, Pedro Vinícius, Genilton Cláudio, Marina Macedo, Camila Gabrielle, Vanessa Karen e outros que não me veio a cabeça no momento, pelo companheirismo, convivência e ajudas nessa jornada exaustiva.

Além dos amigos da universidade, quero agradecer os meus amigos de infância Wanderson Gomes, Helvis Dias, esses estavam comigo até nos momentos mais difíceis.

Minha namorada Jamilly Maurício de Souza Fernandes, agradeço a você por todo o cuidado, carinho e amor dedicado a mim. Mesmo diante das adversidades estive ao meu lado me dando forças para continuar. Obrigado por me dar a certeza que sempre poderei contar com você. Deus certamente me presenteou com uns dos seus anjos..

Aos membros da bancada, o Professor Felipe Augusto Dantas de Oliveira e o Engenheiro Civil Paulo Leite Souza Junior, pela disponibilidade e atenção em participar deste trabalho.

O meu orientador, o professor Dr. John Eloi Bezerra, pela orientação dada e por todas as sugestões, incentivos, paciência e empenho, no qual foram fatores de fundamental importância para a realização desse trabalho.

Aos meus professores, desde minha alfabetização até os professores que conheci na Universidade, agradeço a ajuda, conselhos e ensinamentos que a mim foram passados, e afirmo que levarei para o resto da minha vida.

*Aos meus pais, **Ezequiel Gomes da Silva e Jacilene da Costa Silva**, que apesar de diversas dificuldades nunca desistiram de mim e sempre me deram conselhos, me apoiaram e deram atenção, além de sempre me incentivar a seguir o caminho dos estudos, isso foi de uma fundamental importância para eu estar onde estou.*

*Ao meu irmão **Elivelton Gomes da Costa Silva**, que sempre me apoiou, e me motivou com suas palavras, sempre falando que eu conseguiria realizar meus sonhos.*

“Mas, vocês devem ser fortes e não se desanimar, pois o trabalho de vocês será recompensado”

2 Crônicas 15:7

RESUMO

As fundações são elementos que tem por finalidade transferir as cargas de uma edificação para as camadas resistentes do solo, sem provocar nenhum tipo de ruptura no mesmo. Elas podem ser divididas de acordo com a distribuição de cargas, sendo elas, fundações diretas (rasas) ou fundações indiretas (profundas). O trabalho apresentado a seguir aborda apenas um tipo de fundação direta, a sapata isolada. O objetivo desse trabalho é desenvolver uma planilha eletrônica no *Microsoft Office Excel*® capaz de dimensionar com segurança, problemas de sapatas isoladas, além disso, utilizar o software GEO5 como método para comparar e validar os resultados. Para o desenvolvimento da planilha, foi necessário uma revisão bibliográfica a respeito das teorias e métodos usados para o processo de dimensionamento de sapatas. Entre as teorias e métodos citados, se destacam a Teoria de Terzaghi, usada para calcular a capacidade de carga do solo, o método das bielas, utilizado para calcular a armadura necessária da sapata e o método de Schmertmann, que foi aplicado para o cálculo de estimativa de recalques. As análises e comparações dos resultados foram feitas através de tabelas, por meio delas, foi possível chegar a conclusão que os resultados obtidos pela planilha são satisfatórios e sempre a favor da segurança.

Palavras-Chave: *Microsoft Office Excel*. Capacidade de Carga do solo; Software GEO5.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais tipos de fundações superficiais	14
Figura 2: Detalhes construtivos para sapatas	17
Figura 3: Modelo de ruptura generalizada.....	17
Figura 4: Modelo de ruptura por puncionamento	18
Figura 5: Modelo de ruptura localizada	18
Figura 6: Sapata apoiada em uma determinada profundidade	19
Figura 7: Análise de capacidade de carga de Terzaghi.....	19
Figura 8: Diagrama de corpo livre da cunha abc (zona I).....	20
Figura 9: Geometria da sapata	25
Figura 10: Distribuição da carga do pilar na base da sapata	25
Figura 11: Representação das características geométrica de uma sapata	26
Figura 12: Modelo de Schmertmann para estimativa de recalque.....	28
Figura 13: Tela inicial da planilha de dimensionamento de sapata	34
Figura 14: Dados de entrada que devem ser fornecido pelo usuário	35
Figura 15: Dados necessários para estimativa de recalque	36
Figura 16: Aba de “soluções” apresentada na planilha.....	36
Figura 17: Aba “banco de dados” apresentado na planilha.....	37
Figura 18: Cálculo feito pela planilha utilizando a equação de Terzaghi.....	38
Figura 19: Cálculo da área de aço utilizando o método das bielas.....	38
Figura 20: Estimativa de recalque utilizando o método de Schmertmann.....	39
Figura 21: Resultados encontrado pela planilha.....	40
Figura 22: Dados de entrada do problema 1	41
Figura 23: Dados de entrada do problema 2	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de seguranças globais mínimos	15
Tabela 2: Fatores de capacidade de carga.....	23
Tabela 3: Fatores de forma de Terzaghi	23
Tabela 4: Valores de K para diferentes tipos de solos	30
Tabela 5: Comparação dos resultados entre o GEO5 e a planilha desenvolvida	42
Tabela 6: Comparação dos resultados entre o Software GEO5 e a planilha desenvolvida para o problema	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	DEFINIÇÕES	14
2.2	USO DE FATORES DE SEGURANÇA	15
2.3	DETALHES CONSTRUTIVOS DE UMA SAPATA.....	15
2.4	CAPACIDADE DE CARGA DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS.....	17
2.5	EQUAÇÃO DE TERZAGHI PARA CAPACIDADE DE CARGA DO SOLO.....	18
2.6	DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DA SAPATA.....	24
2.6.1	Rigidez das sapatas	24
2.6.2	Método das bielas.....	25
2.7	ESTIMATIVA DE RECALQUE.....	27
2.7.1	Método de Schmertmann	28
2.8	SOFTWARE GEO5.....	30
2.8.1	Análise de capacidade de carga desenvolvida pelo GEO5	31
2.8.2	Dimensionamento de estruturas de concreto realizado pelo GEO5	32
3	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	33
3.1	APRESENTAÇÃO DA PLANILHA	33
3.1.1	Dados de entrada	35
3.1.2	Roteiro de cálculo desenvolvido pela planilha	36
3.1.3	Solução encontrada.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	PROBLEMA 1:	41
4.2	PROBLEMA 2	43

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

As fundações são elementos estruturais na qual sua principal função é transferir as cargas atuantes na estrutura para a camada resistente do solo. Cabe a um projetista de fundações escolher qual será o melhor tipo de fundação para determinadas situações, ou seja, essa escolha deve visar a segurança e a economia da obra.

As fundações de uma edificação deve garantir de forma segura a estabilidade da obra que suporta. O projeto de uma fundação deve sempre ter como parâmetro a capacidade de suporte do solo que servirá de apoio. Além disso, é fundamental um detalhamento correto da armadura para conferir a estabilidade necessária, boa funcionalidade e durabilidade da edificação.

Para qualquer projeto de fundações é essencial o conhecimento na área de geotecnia e cálculo estrutural; a geotecnia abrange a geologia da engenharia, mecânica dos solos e mecânicas das rochas; o cálculo estrutural abrange a parte de análise e dimensionamento de estrutura de concreto armado. É através dos conhecimentos geotécnicos que se pode obter dados necessários para o dimensionamento das fundações.

As fundações são convencionalmente separadas em dois grandes grupos: fundações superficiais (diretas ou rasas) e fundações profundas. Segundo a ABNT NBR 6122: 2010 fundações profundas são aquelas cujas bases estão implantadas a uma profundidade superior a duas vezes sua menor dimensão, e a pelo menos 3 m de profundidade.

Neste trabalho iremos abordar apenas a fundação superficial, especificamente, a sapata isolada. Mas além dela existem vários tipos de sapatas, são elas: a sapata corrida na qual suporta muros ou paredes, sapatas combinadas ou associadas que suportam dois ou mais pilares em número reduzido, sapatas contínuas que suportam vários pilares alinhados.

A sapata isolada pode ser do tipo rígida ou flexível, isso depende das suas dimensões, mas a sua principal diferença é que a mesma tem capacidade para suportar apenas um pilar.

As sapatas um dos tipos mais frequentes de fundação, são elementos estruturais de concreto armado com altura pequena relativamente á sua base e destinam-se a receber cargas de muro (concreto ou alvenaria), pilares isolados, conjuntos de pilares, etc. São adequados em situações em que o solo apresenta uma boa capacidade de suporte (CHUST; MIRANDA, 2013).

Vários fatores influenciam no dimensionamento da sapata, o principal é a capacidade de carga do solo, além desse, a profundidade da fundação, dimensões e forma do elemento, entre outros.

Um dos maiores problemas do dimensionamento de sapatas em software são as várias idealizações que eles fazem. Para um profissional de engenharia não basta apenas colocar os dados de entrada e obter o resultado, é necessário também saber como o software gerou determinados resultados.

Um dos grandes diferenciais de um engenheiro é o seu embasamento no conteúdo, ou seja, é através das teorias estudadas que o mesmo pode ir tomando suas decisões. Neste trabalho iremos desenvolver uma planilha não muito complexa mas que obtenha resultados satisfatórios.

No decorrer desse trabalho será mostrado as considerações utilizadas para cálculos de capacidade de cargas para fundações superficiais, e os métodos utilizados para o dimensionamento das sapatas isoladas.

Com os conhecimentos adquiridos a respeito de capacidade de carga e os métodos utilizado para o dimensionamento da sapata, foi desenvolvido uma planilha eletrônica no software excel para dimensionar automaticamente uma sapata isolada. Os resultados obtidos na planilha foram comparados e analisados com o resultado de dimensionamento feito pelo software GEO 5.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma planilha eletrônica capaz de dimensionar com segurança, problemas de sapatas isoladas. Como método para validação dos resultados, utilizar o software GEO5 para analisar e comparar as soluções obtidas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver planilha para dimensionamento de sapatas isoladas;
- Elaborar tabelas comparativas entre dimensionamentos realizados com o software Geo5 e a planilha desenvolvida no Excel;
- Analisar e comparar os resultados obtidos.

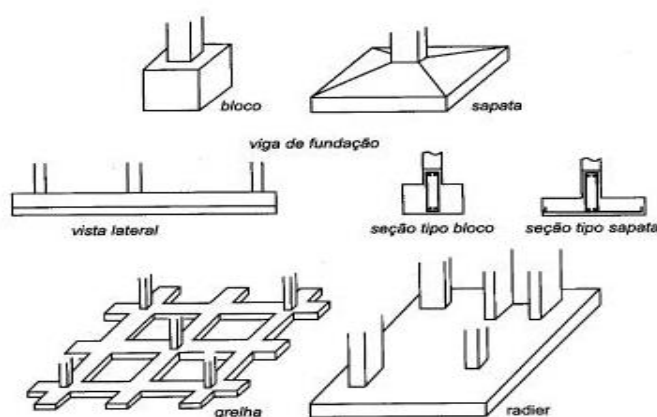
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DEFINIÇÕES

As fundações superficiais ou diretas compreendem basicamente as sapatas e radieres, que por serem indicadas para regiões em que o solo apresenta boa ou média capacidade de carga, podem ser executadas sem custo elevado e comportam-se de maneira bastante eficiente. (CHUST; MIRANDA, 2013)

Fundação superficial são elementos de fundação, em que a carga é transmitida ao terreno, predominantemente pelas pressões distribuídas sob a base da fundação, e em que a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. Incluem-se neste tipo de fundação as sapatas, os blocos, o radier, as sapatas associadas, as vigas de fundação e as sapatas corridas (ABNT NBR 6122; 2010). A Figura 1 mostra algumas fundações superficiais.

Figura 1: Principais tipos de fundações superficiais



Fonte: Alencar e Resende (2010)

De acordo com a ABNT NBR 6122 (2010) a sapata é um elemento de fundação superficial de concreto armado, dimensionado de modo que as tensões de tração nele produzidas não sejam resistidas pelo concreto, mas sim pelo emprego da armadura. Pode possuir espessura constante ou variável, sendo sua base e, planta normalmente quadrada, trapezoidal ou retangular.

2.2 USO DE FATORES DE SEGURANÇA

Em projetos de fundações é de fundamental importância a utilização de fatores de segurança, isso se dar devido a heterogeneidade do solo e a não exatidão dos resultados obtidos nos ensaios.

A ABNT NBR 6122 (2010) estabelece que as fundações devem ser verificadas pela análise de estados limites últimos (além do estado limite de utilização). Adiante será tratada mais especificamente da verificação do estado limite de ruptura por perda de capacidade de carga (ruptura do solo que suporta a fundação).

Para cálculo da resistência de um elemento de fundação, o valor característico pode ser obtido por métodos teóricos, semiempírico ou empírico ou através de resultados de provas de cargas. No caso de uso de fator de segurança, o valor de resistência admissível é encontrado dividindo a resistência característica pelo fator de segurança adotado (ALENCAR; REZENDE, 2010).

Para fundações superficiais a ABNT NBR 6122 (2010) fornece uma tabela com os valores de fatores de segurança globais. A Tabela 1 mostra os seguintes valores de fatores de segurança:

Tabela 1: Fatores de seguranças globais mínimos

Condição	Fator de segurança
Capacidade de cargas de fundações superficiais	3,0
Capacidade de cargas de estacas ou tubulões sem prova de carga	2,0
Capacidade de cargas de estacas ou tubulões com prova de carga	1,6

Fonte: ABNT NBR 6122 (2010)

2.3 DETALHES CONSTRUTIVOS DE UMA SAPATA

Segundo a ABNT NBR 6122 (2010) as sapatas isoladas não devem ter dimensões inferiores a 60 cm, porém para sapatas de edifícios é recomendado dimensões maiores que 80 cm. Além disso, a norma ainda cita que, nas divisas com terrenos vizinhos, salvo quando a

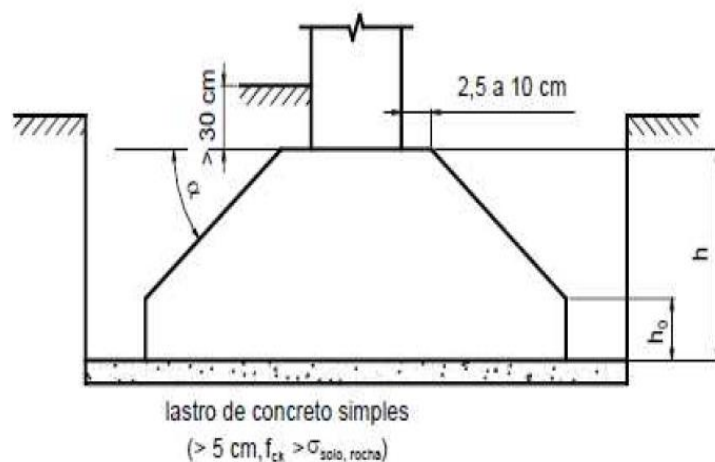
fundação for assente sobre rocha, tal profundidade não deve ser inferior a 1,5 m. Em casos de obras cujas sapatas ou blocos estejam majoritariamente previstas com dimensões inferiores a 1,0 m, essa profundidade mínima pode ser reduzida.

Todas as partes da fundação superficial (rasa ou direta) em contato com o solo (sapatas, vigas de equilíbrio etc.) devem ser concretadas sobre um lastro de concreto não estrutural com no mínimo 5 cm de espessura, a ser lançado sobre toda a superfície de contato solo-fundação (ABNT NBR 6122; 2010).

No caso de rocha, esse lastro deve servir para regularização da superfície e, portanto, pode ter espessura variável, no entanto observado um mínimo de 5,0 cm (ABNT NBR 6122; 2010).

A altura da sapata deve ser determinada de tal modo que ela seja rígida. Para Bastos (2016), ao se adotar um valor mínimo para h_0 de acordo com a figura 2 e executando-se as faces extremas em superfície vertical, evita-se a possível ruptura dos lados da sapata. Diversos autores indicam valores diferentes para h_0 . Neste trabalho será utilizado o valor proposto por Bastos (2016), uma vez que pode ser considerado um valor médio baseado nos demais autores, $h_0 \geq \begin{cases} 15 \text{ cm} \\ h/3 \end{cases}$ (ARCENO, 2018).

O ângulo de inclinação da sapata α , conforme mostra a figura 2, é conveniente ser adotado o valor em torno de 30° , pois segundo Carvalho e Pinheiro (2009) e Bastos (2016), esse é o ângulo de atrito interno do concreto (ângulo de talude natural). Ou seja evita-se o uso de formas na construção da face inclinada da sapata, sendo necessário apenas nas laterais com altura h_0 (ARCENO, 2018).

Figura 2: Detalhes construtivos para sapatas**Fonte:** ARCENO (2018)

2.4 CAPACIDADE DE CARGA DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS

Segundo (Terzaghi (1943), Apud Alencar; Rezende, 2010) existiam dois tipos de ruptura do solo, a ruptura generalizada e a ruptura localizada. Já em 1943 veio a contribuição de Vesic, na qual foi acrescentado mais um tipo de ruptura, além das duas citadas por Terzaghi ainda foi adicionada a ruptura por punção.

A ruptura geral ou generalizada caracteriza-se pela existência de um mecanismo de ruptura bem definido e constituído por uma superfície de deslizamento que vai do bordo da fundação à superfície do terreno (ALENCAR; REZENDE, 2010). A Figura 3 mostra o gráfico com as variáveis carga e recalque, para uma ruptura generalizada.

Figura 3: Modelo de ruptura generalizada**Fonte:** Alencar e Resende (2010)

A ruptura por punção é caracterizada por um mecanismo de difícil observação. À medida que a carga cresce, o movimento vertical da fundação é acompanhado pela compressão do solo imediatamente abaixo. A penetração da fundação é possibilitada pelo

cisalhamento vertical em torno do perímetro da fundação. O solo fora da área carregada praticamente não participa do processo (ALENCAR; REZENDE, 2010). A Figura 4 mostra o gráfico com as vareáveis carga e recalque, para uma ruptura por puncionamento.

Figura 4: Modelo de ruptura por puncionamento



Fonte: Alencar e Resende (2010)

A ruptura localizada caracteriza-se por um modelo que é bem definido apenas imediatamente abaixo da fundação. Esse modelo consiste de uma cunha e de superfícies de deslizamento que se iniciam junto às bordas da fundação, como no caso da ruptura generalizada. Há uma tendência visível de empolamento do solo aos lados da fundação. Entretanto, a compressão vertical sob a fundação é significativa, e as superfícies de deslizamento terminam dentro do maciço, sem atingir a superfície do terreno. (ALENCAR; REZENDE, 2010). A Figura 5 mostra o gráfico com as variáveis carga e recalque, para uma ruptura localizada.

Figura 5: Modelo de ruptura localizada



Fonte: Alencar e Resende (2010)

2.5 EQUAÇÃO DE TERZAGHI PARA CAPACIDADE DE CARGA DO SOLO

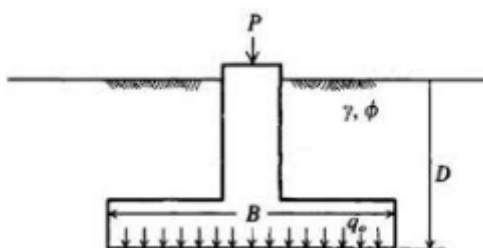
Diversos autores apresentaram fórmulas para o cálculo da capacidade de carga do solo, o primeiro autor a apresentar foi Terzaghi (1925), Apud (Alencar; Rezende, 2010). Posteriormente, Terzaghi (1943), citado por (Alencar; Rezende, 2010) deu ao problema um tratamento racional (ALENCAR; REZENDE, 2010).

Além de Terzaghi outros autores contribuíram, entre eles, Meyerhof (1951), Balla(1962), Vesic (1973, 1975), Hansen (1961, 1970) e De Beer (1970). Na planilha desenvolvida, foi usado para o cálculo de capacidade de carga do solo as fórmulas e teorias propostas por Terzaghi.

Para Terzaghi (1943), citado por (Alencar; Rezende, 2010) uma fundação superficial é aquela cuja a largura B , é igual ou maior que a profundidade D da base da fundação. Satisfeita essa condição, pode-se desprezar a resistência ao cisalhamento do solo acima do nível da base da fundação, substituindo por uma sobrecarga $q = \gamma.D$ (ALENCAR; REZENDE, 2010).

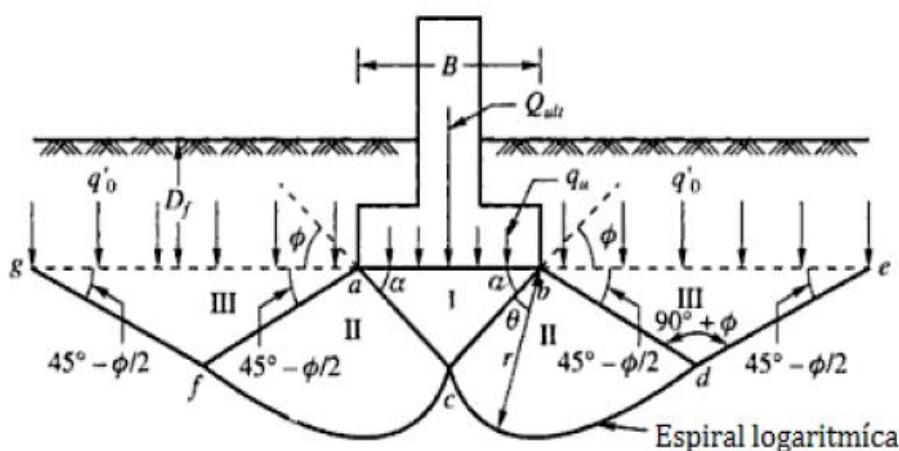
O mecanismo de ruptura adotado por Terzaghi para calcular a capacidade de carga última do solo (ruptura geral por cisalhamento) no caso de uma sapata corrida rugosa, a uma profundidade D , medida a partir da superfície do solo, é mostrado nas Figuras 6 e 7.

Figura 6: Sapata apoiada em uma determinada profundidade



Fonte: Ana Luiza (2015)

Figura 7: Análise de capacidade de carga de Terzaghi



Fonte: Isaac Gabriel (2010)

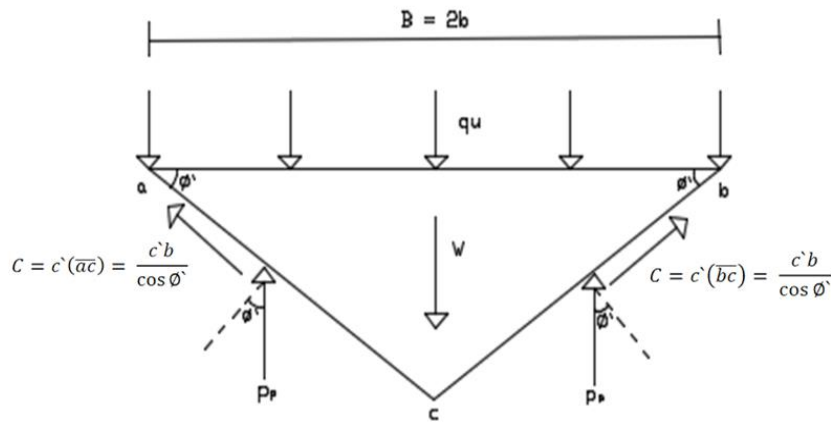
De acordo com Das (2014) Terzaghi dividiu o solo abaixo da fundação em três zonas, como representado na Figura 7, a zona ABC (zona I) é uma zona elástica. Ambas as linhas,

AC, e BC, formam um ângulo ϕ' com a horizontal. As zonas II (ACF e BCD) são zonas de cisalhamento radial, e as zonas III (BDE e AFG) são zonas passivas de Rankine.

Se a carga por área unitária, q_u , for aplicada a sapata e ocorrer uma ruptura geral por cisalhamento, o empuxo passivo p_p estará atuando em cada face da cunha do solo ABC. Esse conceito será mais facilmente entendido se imaginarmos que AC e BC são dois muros que empurram as cunhas do solo ACFG e BCDE, respectivamente, causando uma ruptura passiva.

A Figura 8 mostra o diagrama de corpo livre da zona I ou seja, da cunha AB.

Figura 8: Diagrama de corpo livre da cunha abc (zona I)



Fonte: Adaptada de DAS (2018)

Observando o diagrama, podemos fazer a equação de equilíbrio, que fica da seguinte forma:

$$(q_u)(2b)(1) = -W + 2C\text{sen}\phi' + 2p_p \quad (2.5.1)$$

Onde:

W = Peso da cunha do solo ABC = $\gamma b^2 \text{tg}\phi'$

b = $B/2$

C = Força coesiva que atua ao longo de cada face, AC e BC, que é igual a coesão unitária do solo multiplicada pelo comprimento de cada face = $\frac{c'b}{\cos\phi'}$.

Logo temos:

$$2bq_u = 2p_p + 2bc'tg\phi - \gamma b^2 tg\phi \quad (2.5.2)$$

Isolando q_u , temos

$$q_u = \frac{p_p}{b} + c'tg\phi - \frac{\gamma b}{2} tg\phi \quad (2.5.3)$$

O empuxo passivo (P_p) é a soma da contribuição do peso solo γ da coesão c' e da sobrecarga q . assim, temos:

$$p_p = \frac{1}{2}\gamma(btg\phi)^2 K_\gamma + c'(btg\phi)K_c + q(btg\phi)K_q \quad (2.5.4)$$

Onde, K_γ , K_c e K_q são coeficiente s de empuxo de terra, que são as funções do ângulo de atrito do solo ϕ .

Combinando as equações (2.5.3) e (2.5.4), temos:

$$q_u = c'N_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad (2.5.5)$$

Sendo que:

$$N_c = tg\phi(K_c + 1) \quad (2.5.6)$$

$$N_q = K_q tg\phi \quad (2.5.7)$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2}tg\phi(K_\gamma tg\phi - 1) \quad (2.5.8)$$

Os valores de N_c , N_q e N_γ são respectivamente, as contribuições da coesão, sobrecarga e peso específico do solo. Para facilitar o cálculo da capacidade de carga ultima do solo, q_u , terzaghi fez as seguinte aproximações.

I – se $c' = 0$ e a sobrecarga (q) = 0 (isto é, $D = 0$), então

$$q_u = q_\gamma = \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad (2.5.9)$$

II – se $\gamma = 0$ (solo sem peso) e $q = 0$, então

$$q_u = q_c = c'N_c \quad (2.5.10)$$

III – se $\gamma = 0$ (solo sem peso) e $c' = 0$, então

$$q_u = q_q = qN_q \quad (2.5.11)$$

Utilizando o método da superposição, temos:

$$q_u = q_c + q_q + q_\gamma = c'N_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad (2.5.12)$$

Substituindo:

$$q = \gamma D$$

$$q_u = q_c + q_q + q_\gamma = c'N_c + \gamma DN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad (2.5.13)$$

Os termos N_c , N_q e N_γ são conhecidos como fatores de carga, e essa equação ficou conhecida como equação de capacidade de carga de Terzaghi.

A equação (2.5.13) foi feita assumindo que o módulo de ruptura seja geral, para o módulo de ruptura local, podemos assumir:

$$c' = \frac{2}{3}c \quad (2.5.14)$$

$$tg\phi' = \frac{2}{3}tg\phi \quad (2.5.15)$$

Assim a equação para o modo de ruptura local fica da seguinte forma:

$$q'_u = c'N'_c + qN'_q + \frac{1}{2}\gamma BN'_\gamma \quad (2.5.16)$$

A Tabela 2 mostra os fatores de carga desenvolvido por Terzaghi, seja para ruptura local ou geral.

Tabela 2: Fatores de capacidade de carga

FATORES DE CAPACIDADE DE CARGA (TERZAGUI)						
	Ruptura Global			Ruptura Local		
ϕ	Nc	Nq	$N\gamma$	Nc'	Nq'	$N\gamma'$
0	5,7	1	0	5,7	1	0
5	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2
10	9,6	2,7	1,2	8	1,9	0,5
15	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9
20	17,7	7,04	5	11,8	3,9	1,7
25	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2
30	37,2	22,5	19,7	19	8,3	5,7
34	52,6	36,5	35	23,7	11,7	9
35	57,8	41,4	42,4	25,2	12,6	10,1
40	95,7	81,3	100,4	34,9	20,5	18,8
45	172,3	173,3	297,5	51,2	35,1	37,7
48	258,3	287,9	780,1	66,8	50,5	60,4
50	347,5	415,1	1153,2	81,3	65,6	87,1

Fonte: Adaptada de Alencar e Resende (2010)

Existem várias formas de fundações, entre elas, as circulares, quadradas e retangulares, cada uma delas distribui tensões de formas diferente no solo, logo foi visto a necessidade de fatores de correção de forma, a Tabela 3 mostra os fatores de forma desenvolvido por Terzaghi.

Tabela 3: Fatores de forma de Terzaghi

Tabela de Fatores de Forma			
Fundação	Sc	Sq	Sg
Quadrada	1,3	1	0,8
Circular	1,3	1	0,6
Retangular	1,2	1	0,9

Fonte: Notas de aula Prof. John Eloi (2018)

Com os fatores de formas introduzidos na equação, temos a seguinte equação:

$$q_u = c'N_cS_c + \gamma DN_qS_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma S_\gamma \quad (2.5.17)$$

Onde:

q_u = Tensão máxima suportada pelo solo

c' = Coesão do solo

- γ = Peso específico do solo
 D = Profundidade no nível da base da sapata
 B = Menor dimensão da sapata
 N_c, N_q e N_γ = Fatores de capacidade de carga
 S_c, S_q e S_γ = Fatores de forma

2.6 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DA SAPATA

2.6.1 Rigidez das sapatas

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 podemos distinguir as sapata rígidas e flexíveis de acordo com o seu comportamento estrutural.

Sapatas Rígidas:

- a) Trabalha a flexão nas duas direções, admitindo-se que, para cada uma delas, a tração na flexão seja uniformemente distribuída na largura correspondente da sapata. Essa hipótese não se aplica á compressão na flexão, que se encontra mais na região do pilar que se apoia na sapata e não se aplica também ao caso de sapatas muito alongadas em relação a forma do pilar;
- b) Trabalha ao cisalhamento também em duas direções, não apresentando ruptura por tração diagonal, e sim por compressão diagonal. Isso ocorre porque a sapata rígida fica inteiramente dentro do cone hipotético de punção, não havendo, portanto, possibilidade física de punção.

Sapatas Flexíveis:

- a) Trabalha a flexão nas duas direções, não sendo possível admitir tração na flexão uniformemente distribuída na largura correspondente da sapata. A concentração de flexão junto ao pilar deve ser em princípio, avaliada.
- b) Trabalha ao cisalhamento que pode ser descrito pelo fenômeno da punção. A distribuição plana de tensões no contato sapata-solo deve ser verificada.

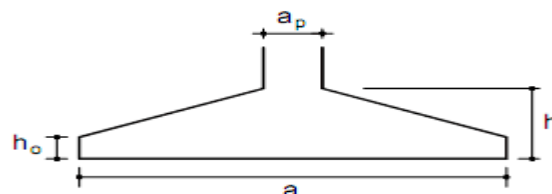
Segundo a NBR 6118: 2014, uma sapata é considerada rígida quando:

$$h \geq (a - a_p)/3 \quad (2.6.1)$$

Caso a condição anterior não seja atendida, a sapata é considerada flexível.

A Figura 9 mostra os dados geométricos de uma sapata vista de perfil:

Figura 9: Geometria da sapata



Fonte: Autoria Própria (2018)

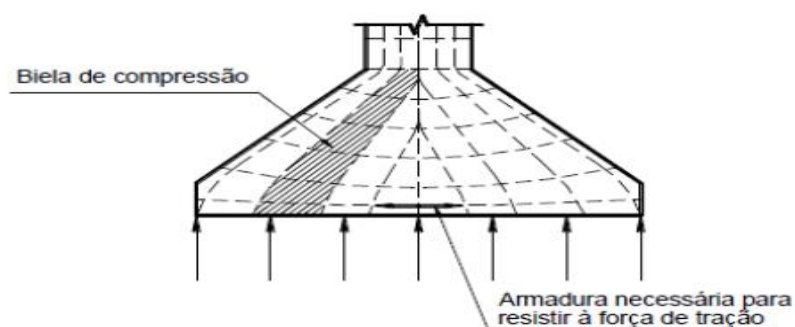
onde:

- h = Altura da sapata
- a = Direção da sapata em uma determinada direção
- a_p = Direção do pilar na mesma direção

2.6.2 Método das bielas

Segundo Arceno (2018), no método das bielas pode-se dizer que a carga do pilar é transferida para a base da sapata por meio de bielas de concreto comprimidas, na qual induzem tensões de tração na base da sapata, que devem ser resistidas por armaduras. A Figura 10 mostra a ilustração das distribuições de tensões do pilar para a sapata.

Figura 10: Distribuição da carga do pilar na base da sapata



Fonte: ARCENO (2018)

Mostraremos agora o passo a passo de dimensionamento de uma sapata isolada pelo método das bielas.

- Adotar uma altura mínima (h) para se ter uma peça rígida

$$h = d + d' \quad (2.6.2)$$

h = altura da sapata

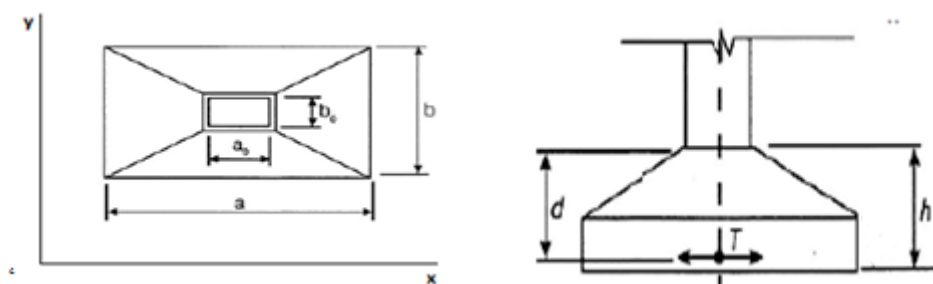
d = altura útil da sapata

d' = distância da base da sapata ao centro de gravidade da armadura (adota-se 5 cm)

Para que a sapata seja rígida, encontra-se a altura útil mínima, sendo a maior das três condições apresentadas.

$$d \geq \begin{cases} \frac{a - a_0}{4} \\ \frac{b - b_0}{4} \\ 1,44 \sqrt{\frac{p}{\sigma_a}} \end{cases} \quad \text{sendo que } \sigma_a = 0,85 \frac{f_{ck}}{1,96}$$

A Figura 11 mostra a representação das características geométricas de uma sapata vista de perfil e de uma vista superior:



Fonte: Notas de aula prof. Jhon Eloí

- Determinar os esforços de tração nas duas direções

$$T_x = \frac{p(a - a_0)}{8d} \quad (2.6.3)$$

$$T_y = \frac{p(b - b_0)}{8d} \quad (2.6.4)$$

- Determinar a área de aço necessária para combater os esforços de tração nas duas direções.

$$A_{sx} = \frac{1,61T_x}{f_{yk}} \quad (2.6.5)$$

$$A_{sy} = \frac{1,61T_y}{f_{yk}} \quad (2.6.6)$$

2.7 ESTIMATIVA DE RECALQUE

De acordo com a ABNT NBR 6122:1996 o recalque é definido pelo movimento vertical descendente de um elemento estrutural.

Recalque em fundações acontece quando o contato entre fundação e solo se rompe, fazendo assim com que a fundação afunde mais do que o projetado. Quando ocorre em toda a fundação é chamado de recalque total, quando ocorre em apenas um trecho é chamado de recalque diferencial (MILITITSKY, 2005).

Em toda obra ocorre recalque em fundações, sendo os recalques admissíveis parte importante nas análises e projetos de fundações, definindo um limite a partir do qual se considera problemática a segurança ou o desempenho da estrutura (MILITITSKY, 2005).

Com finalidade de dar uma noção de ordem de grandeza dos valores, pode-se usar as relações entre recalques máximos e recalques diferenciais máximos admissíveis, sendo para fundações isoladas 25 mm para recalques diferencial 40 mm para recalque total; para radiers recalques máximos da ordem de 50 mm e para fundações em solos argilosos recalques máximos de 40 mm (MILITITSKY, 2005).

A previsão de recalque é um dos exercícios mais difíceis da geotecnia, e os resultados obtidos, por mais sofisticado que sejam, deve ser encarados como uma estimativa.

Os métodos de previsão de recalques podem ser separados em três grandes categorias :

- Métodos racionais;
- Métodos semiempíricos;
- Métodos empíricos.

Nos métodos racionais, os parâmetros de deformabilidade, obtidos em laboratório ou *in situ*, são combinados a modelos para previsão de recalques teoricamente exatos (ALENCAR; REZENDE, 2010).

Nos métodos semiempíricos, os parâmetros de deformabilidade – obtidos por correlação com ensaios *in situ* de penetração (estática, CPT, ou dinâmica, SPT) – são combinados a modelos para previsão de recalques teoricamente exatos ou adaptação deles (ALENCAR; REZENDE, 2010).

Pode-se chamar de métodos empíricos o uso de tabelas de valores típicos de tensões admissíveis para diferentes solos. Embora as tabelas não forneçam recalques, as tensões ali indicadas estão associadas a recalques usualmente aceitos em estruturas convencionais (ALENCAR; REZENDE, 2010).

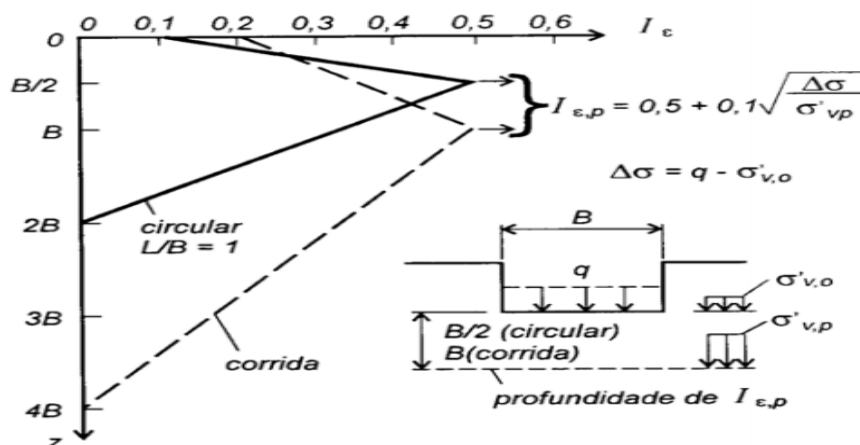
Os cálculos de previsão de recalques realizado na planilha foram baseados nos métodos semiempíricos, especificamente no método de Schmertmann.

2.7.1 Método de Schmertmann

Schmertmann (1970) compilou perfis de deformação específica (ε_z) medidos debaixo de placas de prova e observou que esses perfis mostravam um pico a uma profundidade da ordem de $B/2$ e que a deformação se anulava a cerca de $2B$. Criou, então, um índice de deformação específica, definido como $I_\varepsilon = \varepsilon_z E / q$ (ALENCAR; REZENDE, 2010).

O modelo de Schmertmann está representado na figura 12:

Figura 12: Modelo de Schmertmann para estimativa de recalque



Fonte: Alencar e Resende (2010)

A equação 2.7.1 determina o índice de deformação específica de pico, esse pico se dá há uma profundidade de $B/2$, no qual B é o menor lado da sapata.

$$I_{\varepsilon,p} = 0,5 + 0,1 \sqrt{\frac{\Delta\sigma}{\sigma'_{vp}}} \quad (2.7.1)$$

Sendo que:

$$\Delta\sigma = q - \sigma'_{v,0} \quad (2.7.2)$$

Onde:

- q = Tensão atuante na sapata
- $\sigma'_{v,0}$ = Tensão geostática na profundidade da base da sapata
- σ'_{vp} = Tensão geostática na profundidade $B/2$ a partir da base da sapata

Com o perfil do índice de deformação específica, e conhecido o E , o recalque pode ser calculado com:

$$w = \int_0^H \varepsilon_z dz = q \int_0^{2B} \frac{I_{\varepsilon}}{E} dz = q \sum_{i=1}^n \frac{I_{\varepsilon,i}}{E_i} \Delta z \quad (2.7.3)$$

Schmertmann (1970) previu, ainda, duas correções, que alteram o recalque segundo:

$$w_f = w C_1 C_2 \quad (2.7.4)$$

A primeira correção se deve ao embutimento e vale:

$$C_1 = 1 - 0,5 \frac{\sigma'_{v,0}}{q} \quad (2.7.5)$$

Sendo que $C_1 \geq 0,5$

A segunda correção se deve a deformações viscosas (*creep*) e vale:

$$C_2 = 1 + 0,2 \log \frac{t}{0,1} \quad (2.7.6)$$

Como queremos saber o recalque de imediato, consideramos $C_2 = 1$.

O módulo de elasticidade para sapatas de forma quadrada, circular e retangular pode ser obtido usando a seguinte equação:

$$E_i = 2,5q_c \quad (2.7.7)$$

Sendo que:

$$q_c = K N s_{pt} \quad (2.7.8)$$

Os valores de K é diferente para cada tipo de solo, a Tabela 4 mostra os tipos de solos com seus respectivos valores.

Tabela 4: Valores de K para diferentes tipos de solos

Tipo de Solo (descrição)	K(kpa)
Areia com pedregulhos	1100
Areia	900
Areia siltosa	700
Areia argilosa	550
Silte arenoso	450
Silte	350
Argila arenosa	300
Silte argiloso	250
Argila siltosa (escura)	200
Argila (vermelha)	250

Fonte: Notas de aula Prof, Jhon Eloi (2018)

2.8 SOFTWARE GEO5

O GEO5 é um pacote de programas que fornece a solução para a maioria dos problemas geotécnicos. Os programas do GEO 5 possuem a mesma interface e se comunicam entre si. Cada programa realiza uma complexa verificação de um tipo de estrutura.

O *software* contém programas para a análise de fundações superficiais. O mesmo permite não só verificar a capacidade de carga e assentamento, como também as armaduras de estruturas em concreto armado. Dentro das fundações superficiais, encontra-se o modulo para dimensionamento de sapatas, com esse módulo é possível dimensionar e analisar uma sapata isolada ou sapatas associadas.

As análises realizadas no *software* são baseadas em um grande número de teorias e normas.

2.8.1 Análise de capacidade de carga desenvolvida pelo GEO5

De acordo com a análise feita no GEO5 para dimensionamento de sapatas, a capacidade de suporte vertical do solo de fundação é verificada, de acordo com a teoria dos estados limite, através da equação 2.8.1.

$$\sigma \leq \frac{R_d}{\gamma_{RV}} \quad (2.8.1)$$

Ou de acordo com o fator de segurança:

$$\frac{R_d}{\sigma} \geq SF_v \quad (2.8.2)$$

Onde:

- R_d = Capacidade de suporte de dimensionamento do solo de fundação
- σ = Tensão de contato extrema de dimensionamento na base da fundação
- γ_{RV} = Coeficiente da capacidade de suporte da fundação
- SF_v = Fator de segurança para a capacidade de suporte vertical

A tensão de contato extrema de dimensionamento na base da fundação é obtida por:

$$\sigma = \frac{V}{A_{ef}} \quad (2.8.3)$$

Onde:

V = Carga vertical para dimensionamento

A_{ef} = Área efetiva da fundação

No GEO5, o R_d , capacidade de suporte vertical do solo de fundação, é determinado baseando-se na seguinte teoria:

No caso do subsolo drenado, o software obtém sua solução baseada na teoria de J. Brinch – Hansen, em que a capacidade de suporte do solo de fundação é dada por:

$$R_d = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot b_c \cdot g_c + q_0 \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q + \frac{B}{2} \cdot \gamma \cdot N_b \cdot s_b \cdot d_b \cdot i_b \cdot b_b \cdot g_b \quad (2.8.4)$$

Onde:

c	= coesão do solo
q_0	= carga uniforme para considerar a influência da profundidade da fundação
B	= menor dimensão da fundação
γ	= peso específico do solo
N_e, N_d, N_b	= coeficientes para capacidade de suporte
s_e, s_d, s_b	= coeficientes para a forma da fundação
d_e, d_d, d_b	= coeficientes para a influência da profundidade da fundação
i_e, i_d, i_b	= coeficientes para a influência da inclinação da carga
b_e, b_d, b_b	= coeficientes para a inclinação da base da fundação
g_e, g_d, g_b	= coeficientes para influência do talude do terreno

2.8.2 Dimensionamento de estruturas de concreto realizado pelo GEO5

O software GEO5 dimensiona as estruturas de concreto baseado em diversas normas, entre elas, a ABNT NBR 6118: 2014, antes de iniciar o dimensionamento configura-se o programa para dimensionar segundo as normas brasileiras.

No nosso caso o software foi configurado para obedecer as normas brasileiras. No dimensionamento de armaduras longitudinais da sapata é usado os mesmos critérios para cálculo de armadura longitudinal para lajes.

O dimensionamento de armaduras é realizado para cargas devido a momentos fletores M_{sd} . Assim o programa consegue fornecer a área necessária para armaduras de tração e compressão (se necessário).

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Inicialmente foi feito um levantamento e uma revisão bibliográfica sobre fundações, visando aprimorar todas as teorias e cálculos que foram utilizados para desenvolvimento do trabalho, dando ênfase nas fundações superficiais, especificamente, as sapatas isoladas.

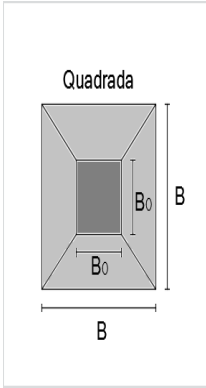
A planilha desenvolvida neste trabalho tem como objetivo principal verificar se uma sapata com determinadas dimensões, atende ou não as restrições de tensões admissíveis oferecidas pelo solo. Para o desenvolvimento dessa planilha foi utilizado o *Microsoft Excel®* (*Excel*).

3.1 APRESENTAÇÃO DA PLANILHA

A planilha se limita ao dimensionamento de uma sapata isolada, ou seja, sapata que suporta apenas um pilar. Na planilha tem uma aba “tela inicial”, na qual, do seu lado esquerdo, os usuários vão digitar os dados de entrada. Nos dados de entrada o usuário vai fornecer algumas informações, entre elas, as características geométricas da sapata e as características dos solos. Logo ao lado, terá uma tabela para o cálculo de estimativa de recalques, assim o usuário entra com mais algumas informações para obter o recalque final. A Figura 13 mostra a aba “tela inicial” da planilha.

Figura 13: Tela inicial da planilha de dimensionamento de sapata

DADOS DE ENTRADA	
GEOMETRIA DA SAPATA	
Forma da sapata	Quadrada
Largura da sapata (B)	2,00 m
profundidade da sapata (D)	4,00 m
DIMENSÕES DO PILAR	
Largura do pilar (B ₀)	0,40 m
Comprimento do pilar (L ₀)	0,40 m
CARACTERÍSTICAS DO SOLO	
Peso específico (γ)	17,00 kN/m ³
Ângulo de atrito (φ)	25 °
Coesão (c)	5,00 kN/m ²
Modo de ruptura do solo	global
CARGAS ATUANTES NA SAPATA	
Carga Vertical (V)	1000,00 kN
Momento na direção de x (M _x)	0,00 kN.m
Momento na direção de (M _y)	0,00 kN.m
DADOS COMPLEMENTARES	
Resistência característica do concreto (Mpa)	20,00 Mpa
Tensão de escoamento do aço	Aço CA-50
Fator de segurança	3



Quadrada

B₀

B

DADOS INICIAIS			
Profundidade (m)	Δz (m)	Nspt	Tipo de solo
4	1	12	Areia
5	1	24	Areia
6	1	45	Silte arenoso
7	1	32	Areia siltosa
8	1	13	Silte
9	1	23	Silte
10	1	67	Silte
11	1	46	Silte argiloso
12	1	23	Areia siltosa
13	1	15	Silte

RESULTADOS	
Recalque final (w)	6,05 mm

**VERIFICAR
RESULTADO**

Fonte: Autoria Própria (2018)

3.1.1 Dados de entrada

Na tela inicial o usuário deve fornecer alguns dados de entradas que serão necessários para o dimensionamento da sapata, observa-se na Figura 14 as informações necessárias.

Figura 14: Dados de entrada que devem ser fornecido pelo usuário

DADOS DE ENTRADA		
GEOMETRIA DA SAPATA		
Forma da sapata	Quadrada	
Largura da sapata (B)	2,00 m	
profundidade da sapada (D)	4,00 m	
DIMENSÕES DO PILAR		
Largura do pilar (B0)	0,40 m	
Comprimento do pilar (L0)	0,40 m	
CARACTERÍSTICAS DO SOLO		
Peso específico (γ)	17,00 KN/m ³	
Ângulo de atrito (ϕ)	25 °	
Coesão (c)	5,00 KN/m ²	
Modo de ruptura do solo	global	
CARGAS ATUANTES NA SAPATA		
Carga Vertical (V)	1000,00 KN	
Momento na direção de x (Mx)	0,00 KN.m	
Momento na direção de (My)	0,00 KN.m	
DADOS COMPLEMENTARES		
Resistência característica do concreto (Mpa)	20,00 Mpa	
Tensão de escoamento do aço	Aço CA-50	
Fator de segurança	3	

Fonte: Autoria Própria (2018)

Para obter o resultado da estimativa de recalque, além dos dados já inseridos, será necessário preencher mais alguns, como o N_{spt} e o tipo de solo, no qual é mostrado na Figura 15.

Figura 15: Dados necessários para estimativa de recalque

ESTIMATIVA DE RECALQUE			
DADOS INICIAIS			
Profundidade (m)	Δz (m)	Nspt	Tipo de solo
3	1	12	Areia
4	1	24	Areia
5	1	45	Silte arenoso
6	1	32	Areia siltosa
7	1	13	Silte
8	1	23	Silte
9	1	67	Silte
10	1	46	Silte argiloso
11	1	23	Areia siltosa
12	1	15	Silte
RESULTADOS			
Recalque final (w)		4.10 mm	

Fonte: Autoria Própria (2018)

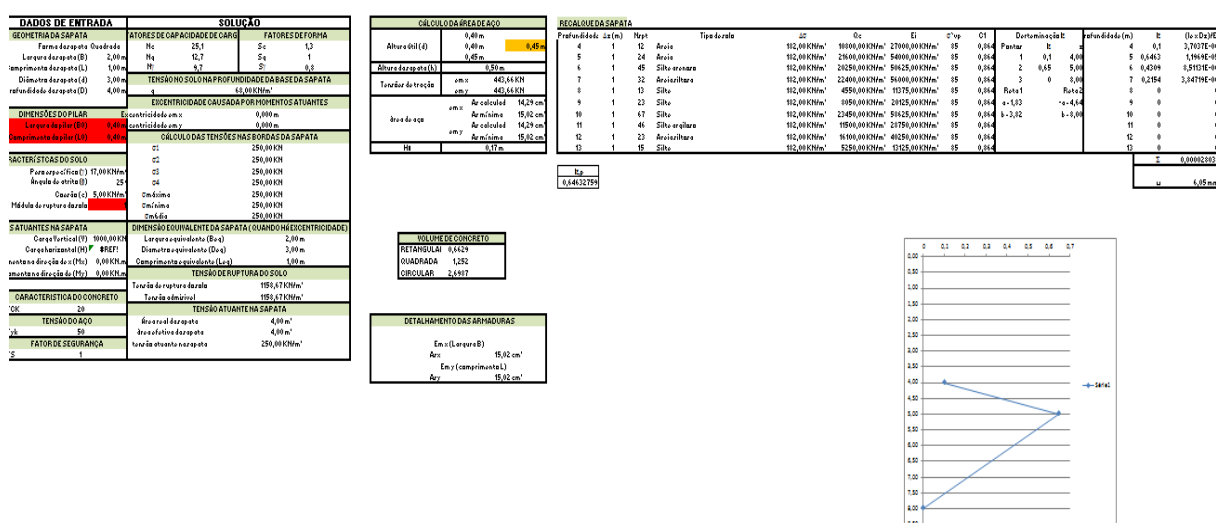
3.1.2 Roteiro de cálculo desenvolvido pela planilha

Com os dados de entrada devidamente informados, o usuário deve clicar no botão “VERIFICAR”, logo em seguida a planilha começará a realizar os cálculos necessários para obtenção dos resultados.

Além da aba “Tela inicial” existe uma aba chamada “solução”, outra denominada “Bancos de dados”, e por fim, uma aba de “Resultado”. Na aba “Solução” ocorrem todos os procedimentos necessários para o dimensionamento estrutural da sapata e estimativa de recalques. Na aba “Banco de dados” estão algumas tabelas que serão utilizadas nos cálculos efetuados.

As Figuras 16 e 17 mostram a aba “Solução” e em seguida a aba “Banco de dados”

Figura 16: Aba de “soluções” apresentada na planilha



Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 17: Aba “banco de dados” apresentado na planilha

FATORES DE CAPACIDADE DE CARGA (TERZAGUI)							
Ruptura Global				Ruptura Local			
#	Nc	Nq	N _γ	Nc'	Nq'	N _γ '	
0	5,7	1	0	5,7	1	0	0
5	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2	0,2
10	9,6	2,7	1,2	8	1,9	0,5	0,5
15	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9	0,9
20	17,7	7,04	5	11,8	3,9	1,7	1,7
25	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2	3,2
30	37,2	22,5	19,7	19	8,3	5,7	5,7
34	52,6	36,5	35	23,7	11,7	9	9
35	57,8	41,4	42,4	25,2	12,6	10,1	10,1
40	95,7	81,3	100,4	34,9	20,5	18,8	18,8
45	172,3	173,3	297,5	51,2	35,1	37,7	37,7
48	258,3	287,9	780,1	66,8	50,5	60,4	60,4
50	347,5	415,1	1153,2	81,3	65,6	87,1	87,1

módulo de ruptura global 1 Local 2	barras (mm) barras (cm²) #5 0,2 #6,3 0,32 #8 0,5 #10 0,8 #12,5 1,25 #16 2 #20 3,15 #22 3,8 #25 5 #32 8	barras (mm) barras (m) #5 0,005 #6,3 0,0063 #8 0,008 #10 0,01 #12,5 0,0125 #16 0,016 #20 0,02 #22 0,022 #25 0,025 #32 0,032	Aço CA-25 25 Aço CA-50 50 Aço CA-60 60	Classe Tipo de Solo (descrição) K(kpa) 1 Areia com pedregulhos 1100 2 Areia 900 3 Areia silteosa 700 4 Areia argilosa 550 5 Silte arenoso 450 6 Silte 350 7 Argila arenosa 300 8 Silte argiloso 250 9 Argila silteosa (escura) 200 10 Argila (vermelha) 250
---	---	--	--	---

Fonte: Autoria Própria (2018)

Para o cálculo da tensão admissível do solo foi utilizado a teoria de Terzaghi. Para isso, foi utilizado a equação (2.5.17). No momento em que trocamos o modo de ruptura e a forma da sapata nos dados de entrada, automaticamente a planilha modifica os fatores de cargas e fatores de forma, respectivamente. Assim o valor atualizado é inserido na equação de Terzaghi. A tensão geostática na profundidade da base da sapata é sempre atualizada no momento em que a profundidade é modificada nos dados de entrada. A largura da sapata (B), o peso específico do solo (γ) e a coesão (c) também são fornecidos nos dados de entrada, assim a planilha consegue fazer o cálculo da tensão de ruptura do solo. Para encontrar a tensão admissível, a planilha divide a tensão de ruptura por um fator de segurança inserido pelo usuário.

Em seguida é calculado a tensão atuante na sapata, a mesma é calculada dividindo a carga vertical (V) pela área efetiva da sapata.

Por fim, é verificada se a tensão atuante na sapata é menor ou igual a tensão admissível do solo, caso isso ocorra, a planilha parte para o cálculo da armadura necessária. A Figura 18 mostra o quadro de soluções no qual foi realizado o processo citado:

Figura 18: Cálculo feito pela planilha utilizando a equação de Terzaghi

SOLUÇÃO			
FATORES DE CAPACIDADE DE CARGA		FATORES DE FORMA	
Nc	25,1	Sc	1,3
Nq	12,7	Sq	1
Nγ	9,7	Sγ	0,8
TENSÃO NO SOLO NA PROFUNDIDADE DA BASE DA SAPATA			
q	68,00 kN/m ²		
EXCENRICIDADE CAUSADA POR MOMENTOS ATUANTES			
Excentricidade em x	0,000 m		
Excentricidade em y	0,000 m		
CÁLCULO DAS TENSÕES NAS BORDAS DA SAPATA			
σ1	250,00 kN		
σ2	250,00 kN		
σ3	250,00 kN		
σ4	250,00 kN		
σmáxima	250,00 kN		
σmínima	250,00 kN		
σmédia	250,00 kN		
DIMENSÃO EQUIVALENTE DA SAPATA (QUANDO HÁ EXCENRICIDADE)			
Largura equivalente (Beq)	2,00 m		
Diametro equivalente (Deq)	3,00 m		
Comprimento equivalente (Leq)	1,00 m		
TENSÃO DE RUPTURA DO SOLO			
Tensão de ruptura do solo	1158,67 kN/m ²		
Tensão admissível	1158,67 kN/m ²		
TENSÃO ATUANTE NA SAPATA			
Área real da sapata	4,00 m ²		
àrea efetiva da sapata	4,00 m ²		
tensão atuante na sapata	250,00 kN/m ²		

Fonte: Autoria Própria (2018)

O cálculo da armadura de aço foi baseado nos métodos das bielas, caso a área de aço calculada seja menor que a mínima, a planilha automaticamente atribui a área mínima como área necessária. A Figura 19 mostra como isso foi desenvolvido na planilha.

Figura 19: Cálculo da área de aço utilizando o método das bielas

CÁLCULO DA ÁREA DE AÇO			
Altura útil (d)		0,40 m	
		0,40 m	0,45 m
		0,45 m	
Altura da sapata (h)		0,50 m	
Tensões de tração	em x	443,66 kN	
	em y	443,66 kN	
àrea de aço	em x	As calculado	14,29 cm²
		As mínima	15,02 cm²
	em y	As calculado	14,29 cm²
		As mínima	15,02 cm²
Ho		0,17 m	

Fonte: Autoria Própria (2018)

O cálculo da estimativa de recalque foi realizado seguindo o método de Schmertmann, a Figura 20 está mostrando todo o processo feito para a obtenção da estimativa de recalque.

Figura 20: Estimativa de recalque utilizando o método de Schmertmann

RECALQUE DA SAPATA																	
Profundidade	Δz (m)	Nspt	Tipo de solo	$\Delta\sigma$	Q_c	E_i	σ'_{vp}	C1	Determinação I_c			Profundidade (m)	I_c	$(I_c \times D_z)/E_i$			
4	1	12	Areia	182,00 KN/m ²	10800,00 KN/m ²	27000,00 KN/m ²	85	0,864	Pontos	I_c	z	4	0,1	3,7037E-06			
5	1	24	Areia	182,00 KN/m ²	21600,00 KN/m ²	54000,00 KN/m ²	85	0,864				1	0,1	4,00	5	0,646328	1,1969E-05
6	1	45	Silte arenoso	182,00 KN/m ²	20250,00 KN/m ²	50625,00 KN/m ²	85	0,864				2	0,65	5,00	6	0,430885	8,51131E-06
7	1	32	Areia siltosa	182,00 KN/m ²	22400,00 KN/m ²	56000,00 KN/m ²	85	0,864	Reta 1	Reta 2		7	0,215443	3,84719E-06			
8	1	13	Silte	182,00 KN/m ²	4550,00 KN/m ²	11375,00 KN/m ²	85	0,864				3	0	8,00	8	0	0
9	1	23	Silte	182,00 KN/m ²	8050,00 KN/m ²	20125,00 KN/m ²	85	0,864				a = 1,83	-a = 4,64	9	0	0	
10	1	67	Silte	182,00 KN/m ²	23450,00 KN/m ²	58625,00 KN/m ²	85	0,864	b = 3,82	b = 8,00		10	0	0			
11	1	46	Silte argiloso	182,00 KN/m ²	11500,00 KN/m ²	28750,00 KN/m ²	85	0,864				11	0	0			
12	1	23	Areia siltosa	182,00 KN/m ²	16100,00 KN/m ²	40250,00 KN/m ²	85	0,864				12	0	0			
13	1	15	Silte	182,00 KN/m ²	5250,00 KN/m ²	13125,00 KN/m ²	85	0,864				13	0	0			
													Σ	0,000028031			
													$I_{c,p}$				
													0,646327594	w	6,05 mm		

I_c, p
0,646327594

Fonte: Autoria Própria (2018)

3.1.3 Solução encontrada

Na aba de resultados será mostrada a solução encontrada pela planilha, além dos valores como, área de aço, tensão admissível, a planilha também irá mostrar um desenho com as dimensões e detalhamento das armadura, assim facilitando um maior entendimento do usuário. A Figura 21 mostra a aba de resultados desenvolvida na planilha.

Figura 21: Resultados encontrado pela planilha

RESULTADOS		
TENSÃO MÁXIMA E MÍNIMA NA BORDA DA SAPATA		
$\sigma_{m\acute{a}xima}$	256,67	KN/m ²
$\sigma_{m\acute{i}nima}$	176,67	KN/m ²
TENSÃO GEOSTÁTICA NA PROFUNDIDADE DA BASE DA SAPATA		
Tensão geostática (q)	57,00	KN/m ²
TENSÃO ADMISSÍVEL DO SOLO		
Tensão admissível (σ_{adm})	224,62	KN/m ²
TENSÃO ATUANTE NA SAPATA		
Tensão atuante na sapata	230,87	KN/m ²
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA SAPATA		
Altura útil (d)	45,00	cm
Altura total da sapata (H)	50,00	cm
Altura da base da sapata (H ₀)	17,00	cm
ARMADURA LONGITUDINAL		
	DIREÇÃO (B)	DIREÇÃO (L)
Área de aço calculada	11,25	cm ²
Diâmetro (mm)	φ 12,5	φ 16
Número de barras	9	8
Área de aço efetiva	11,25	cm ²
Espaçamentos	16,00	cm
Comprimento (cm)	146,00	168,00
VOLUME DE CONCRETO (m³)		
Volume de concreto	0,92 m³	

DETALHAMENTO

H₀= 17cm

H= 50cm

14 118,00 cm 14

9N1 φ12,5 c/16 C= 146

140 140 14

8N1 φ16 c/18 C= 168

VOLTAR PARA
DADOS DE ENTRADA

Fonte: Autoria Própria (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a planilha finalizada, podemos fazer uma análise comparativa entre os resultados obtidos na mesma e o software GEO5, para isso, será necessário inserir os mesmo valores para as características do solo e dimensões da sapata. Feito isso, conseguimos ver a possível discrepância entre os resultados. Logo abaixo será exposto dois exemplos de dimensionamento de sapatas.

4.1 PROBLEMA 1

No primeiro caso, foram inseridos os seguintes dados na planilha, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22: Dados de entrada do problema 1

DADOS DE ENTRADA	
GEOMETRIA DA SAPATA	
Forma da sapata	Quadrada
Largura da sapata (B)	2,00 m
profundidade da sapada (D)	2,00 m
DIMENSÕES DO PILAR	
Largura do pilar (B0)	0,40 m
Comprimento do pilar (L0)	0,40 m
CARACTERÍSTICAS DO SOLO	
Peso específico (γ)	17,00 KN/m ³
Ângulo de atrito (ϕ)	25 °
Coesão (c)	5,00 KN/m ²
Modo de ruptura do solo	global
CARGAS ATUANTES NA SAPATA	
Carga Vertical (V)	500,00 KN
Momento na direção de x (Mx)	0,00 KN.m
Momento na direção de (My)	0,00 KN.m
DADOS COMPLEMENTARES	
Resistência característica do concreto (Mpa)	20,00 Mpa
Tensão de escoamento do aço	Aço CA-50
Fator de segurança	3

Fonte: Autoria própria (2018)

No GEO5 foram inseridos os mesmos valores de entrada da planilha, incluindo ainda a altura total da sapata (H) e a altura da base da sapata (H0) obtidos no dimensionamento da

planilha. Com os resultados da planilha e os resultados gerado no software GEO5 podemos construir uma tabela comparativa entre os dois. A Tabela 5 mostra os valores gerados pelo software GEO5 e os valores gerados na planilha.

Tabela 5: Comparação dos resultados entre o GEO5 e a planilha desenvolvida

Resultados	Software GEO5		Planilha eletrônica	
Tensão de ruptura do solo	778,03 KN/m ²		726,05 KN/m ²	
Tensão atuante na sapata	125,00 KN/m ²		125,00 KN/m ²	
área de aço necessária	x (B)	y (L)	x (B)	y (L)
	11,75 cm ²	11,75 cm ²	15,00 cm ²	15,00 cm ²

Fonte: Autoria própria (2018)

Podemos observar que há valores iguais e valores diferentes, no caso da tensão de ruptura do solo, o valor distinto é devido a forma de análise, o GEO5 dimensiona segundo a teoria de Brinch – Hansen, já a planilha dimensiona de acordo com a teoria de Terzaghi, ou seja, o método de dimensionamento do GEO5 considera outros fatores além dos fatores de forma e fatores de carga. Observa-se que a área de aço também é diferente, isso ocorre devido planilha determinar a área de aço baseado nos métodos da bielas, e o software dimensiona as armaduras usando o mesmo critério utilizado para dimensionamento de laje, ou seja, o dimensionamento é realizado para cargas devido a momento fletores.

4.2 PROBLEMA 2

Considerando novos valores para os dados iniciais da planilha, conforme mostrados na Figura 23, temos:

Figura 23: Dados de entrada do problema 2

DADOS DE ENTRADA	
GEOMETRIA DA SAPATA	
Forma da sapata	Retangular
Largura da sapata (B)	1,50 m
Comprimento da sapata (L)	2,00 m
profundidade da sapada (D)	3,00 m
DIMENSÕES DO PILAR	
Largura do pilar (B0)	0,20 m
Comprimento do pilar (L0)	0,40 m
CARACTERÍSTICAS DO SOLO	
Peso específico (γ)	19,00 KN/m ³
Ângulo de atrito (ϕ)	20 °
Coesão (c)	10,00 KN/m ²
Modo de ruptura do solo	global
CARGAS ATUANTES NA SAPATA	
Carga Vertical (V)	650,00 KN
Momento na direção de x (Mx)	30,00 KN.m
Momento na direção de (My)	0,00 KN.m
DADOS COMPLEMENTARES	
Resistência característica do concreto (Mpa)	20,00 Mpa
Tensão de escoamento do aço	Aço CA-50
Fator de segurança	3

Fonte: Autoria própria (2018)

Com os mesmo valores inseridos no GEO5, acrescentando apenas a altura da base da sapata (H0) e a altura total (H) obtidos no dimensionamento da planilha, podemos construir uma nova tabela para analisar e comparar os resultados A Tabela 6 mostra os valores gerados pelo software GEO5 e os valores gerados na planilha.

Tabela 6: Comparação dos resultados entre o Software GEO5 e a planilha desenvolvida para o problema

Resultados	Software GEO5		Planilha eletrônica	
Tensão de ruptura do solo	730,58 KN/m ²		673,86 KN/m ²	
Tensão atuante na sapata	230,87 KN/m ²		230,87 KN/m ²	
área de aço necessária	x (B)	y (L)	x (B)	y (L)
	8,81 cm ²	11,75 cm ²	11,25 cm ²	15,00 cm ²

Fonte: Autoria própria (2018)

Como no exemplo anterior, o resultado foi diferente em relação a tensão de ruptura do solo e a área de aço necessária. Como citado anteriormente, a diferença é devido as formas distintas de análises. Podemos observar ainda que as diferenças dos resultados permanecem basicamente nas mesmas proporções.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, constatou-se que a planilha eletrônica realizada neste trabalho obteve resultados satisfatórios nas condições que foram testadas. Apesar dos resultados distintos comparado com o software GEO5, podemos concluir que as soluções encontrada na planilha está a favor da segurança, ou seja, nos cálculos das tensões de ruptura do solo, o valor da planilha é um pouco menor que o resultado obtido pelo GEO5, já no cálculo da área de aço, o valor da planilha é um pouco maior.

Vale salientar que além de resultados satisfatórios, a planilha é mais simplificada e de fácil manuseio. Em contrapartida o software GEO5 exige um pouco mais de conhecimento e domínio da ferramenta, além disso, pode possuir um custo de aquisição muito elevado. É importante destacar a possibilidade de utilizar esta ferramenta com fins pedagógicos, devido a mesma ser de acesso gratuito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCENO, Matheus Furtado. **Dimensionamento Estrutural de Sapatas e Blocos de Concreto** . 2018. 200 f. Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. – NBR 6122: **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. – NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238p.

ALENCAR, Dirceu; REZENDE, Francisco. **Fundações** : critérios de projetos, Investigação do subsolo, Fundações superficiais, Fundações profundas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 567 p.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Sapatas de fundação**. Bauru, 2016. Notas de Aula do Curso de Estruturas de Concreto III da Faculdade de Engenharia da UNESP.

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

CHUST, Roberto; MIRANDA, Libânio. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado** . 2ª. ed. São Paulo: Pini Ltda, 2013. 617 p. v. 2.

DAS, Braja M. **Fundamentos da engenharia geotécnica**. 8ª. ed. Khaled Sobhan; tradução Noveritis do Brasil; revisão técnica Roberta Boszczowski. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHINAID, F. **Patologias das Fundações**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2005. 191p.

MOACYR, Gerson. **Projeto estrutural de sapatas** . 2007. 38 p. (Departamento de estruturas e construção civil)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SALGUEIRO, Ana Luiza. **Capacidade de Carga de Fundação superficial de Tanque de Armazenamento de Grande Diâmetro**. 106 f. (Graduação em Engenharia Civil)- UFRJ, UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.