



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

CARLOS KALWENDY SANTOS DAMASCENO

**ESTUDO DE CASO DE SAPATAS ISOLADAS ASSENTADAS EM SOLO
GRANULAR NO MUNICÍPIO DE ASSÚ/RN**

ANGICOS

2021

CARLOS KALWENDY SANTOS DAMASCENO

**ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE CARGA DE SAPATAS ASSENTADAS EM
SOLO GRANULAR NO MUNICÍPIO DE ASSÚ/RN**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Arthur Gomes Dantas de
Araújo.

ANGICOS

2021

©Todos os direitos estão reservados à 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 tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D155e Damasceno, Carlos Kalwendy Santos .
ESTUDO DE CASO DE SAPATAS ISOLADAS ASSENTADAS
EM SOLO GRANURAR NO MUNICÍPIO DE ASSÚ/RN / Carlos
Kalwendy Santos Damasceno. - 2021.
66 f. : il.

Orientador: Arthur Gomes Dantas de Araújo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2021.

1. Capacidade de carga. 2. Método teórico. 3.
Recalque imediato. I. Araújo, Arthur Gomes Dantas
de , 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.

CARLOS KALWENDY SANTOS DAMASCENO

**ESTUDO DE CASO DE SAPATAS ISOLADAS ASSENTADAS EM SOLO
GRANULAR NO MUNICÍPIO DE ASSÚ/RN**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 01 / 06 / 2021.

BANCA EXAMINADORA



Arthur Gomes Dantas de Araújo, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Kleber Cavalcanti Cabral, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Paulo Leite Souza Júnior, Eng. Me. (Prefeitura do Assú/RN)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força e sabedoria, todas as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho e minha graduação, todas as pessoas que ele colocou ao meu redor que contribuíram diretamente ou indiretamente na minha formação como cidadão.

Agradeço a minha família por todos os conselhos e ajuda durante a graduação, todo incentivo em continuar e buscar a tão sonhada formatura.

Agradeço ao orientador Arthur Gomes, pela objetiva e fundamental orientação necessária na elaboração deste trabalho.

Agradeço a minha companheira, Laisa de Melo, por todo apoio e incentivo, e todo conforto nas horas difíceis. Ao meu sogro e minha sogra, por toda assistência e condições, que contribuíram diretamente para conclusão desse trabalho.

Agradeço ao grupo dos “Nerds”, que foi tão importante para a produção deste trabalho e para minha formação, tal qual ao grupo Lenovo, onde estão grandes amigos que levarei para a vida.

“Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certo para o sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais.”

Thomas Edilson

RESUMO

Fundações é o elemento estrutural responsável por transmitir as tensões da superestrutura para o solo, sem que o valor limite definido como a capacidade de carga não seja alcançado, vetando a possibilidade da ruptura do solo. O presente trabalho, tem como objetivo estimar a capacidade de carga através do método teórico de Vesic, encontrar a tensão admissível por modelos semiempíricos e calcular a estimativa do recalque imediato pelo método de Schmertmann, utilizando a planilha eletrônica desenvolvida pelo autor no software Excel. A validação do método de Vesic foi feita utilizando dados de uma sondagem à percussão realizada no município de Assú/RN, região onde foi construído uma creche, na qual três sapatas do projeto foram analisadas utilizando o modo de ruptura geral e comparados com os métodos semiempíricos. Por fim, o modelo teórico de Vesic se mostrou prático obtendo valores semelhantes aos métodos semiempíricos. A estimativa de recalques obteve valores próximos de 1/5 do limite aceitável, considerados satisfatórios. Por fim é chegado na conclusão que as sapatas de projeto, poderiam ter dimensões menores com os fatores de segurança mínimos atendidos, considerando o modelo proposto por Vesic.

Palavras-chave: Capacidade de carga. Método teórico. Recalque imediato.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	-	Fundação profunda e rasa.....	20
Figura 2	-	Fundação superficial do tipo bloco.....	20
Figura 3	-	Fundação superficial do tipo radier.	21
Figura 4	-	Fundação superficial do tipo sapata.	21
Figura 5	-	Sapata isolada	25
Figura 6	-	Sapata associada ou combinada.....	25
Figura 7	-	Sapata em divisa.	26
Figura 8	-	Ruptura geral.	27
Figura 9	-	Ruptura por punção.....	28
Figura 10	-	Superfície potencial de ruptura.....	29
Figura 11	-	Fatores da capacidade de carga.	30
Figura 12	-	Fundação de base inclinada e terreno inclinado.	34
Figura 13	-	Bulbo de tensão em sapata isolada.	36
Figura 14	-	Deformação do solo, modelo de Schmertmann.....	37
Figura 15	-	Mapa de localização do município de Assú/RN.....	39
Figura 16	-	Quadro de legenda cores.....	46
Figura 17	-	Quadro de instruções.	46
Figura 18	-	Dimensões e geometria da sapata.....	47
Figura 19	-	Características do solo.	47
Figura 20	-	Esforços atuantes na sapata.	48
Figura 21	-	Resistência do concreto a compressão e resistência característica do aço ao escoamento na tração.....	48
Figura 22	-	Fatores de forma.	48
Figura 23	-	Fatores de profundidade de acordo com Brinch Hansen (1970).	49
Figura 24	-	Fatores de inclinação da carga.....	50
Figura 25	-	Tensão máxima na excentricidade unidirecional.....	52
Figura 26	-	Considerações de cálculo.....	53
Figura 27	-	Mapa das sapatas, e zona das sondagens	54
Figura 28	-	Dimensões da S32 pelo projeto.	61
Figura 29	-	Dimensões da S32, planilha no modo de ruptura geral.	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	-	Perfil Geotécnico da sondagem.	41
-----------	---	-------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Fatores de forma.	31
Tabela 2	-	Fatores de forma por De Beer (1967) melhorada por Vesic (1970).	31
Tabela 3	-	Dados dos furos realizados na sondagem.	40
Tabela 4	-	Peso específico da argila.	42
Tabela 5	-	Peso específico da areia.	42
Tabela 6	-	Sapatas de projeto com profundidade alterada.	54
Tabela 7	-	Peso específico em função do N_{spt} e profundidade.	55
Tabela 8	-	Ângulo de atrito interno em função do N_{spt} e profundidade.	55
Tabela 9	-	Cálculo dos bulbos de tensão.	57
Tabela 10	-	Determinação do peso específico.	57
Tabela 11	-	Ângulo de atrito interno em cada furo da sondagem.	58
Tabela 12	-	Tensão de ruptura Geral e Puncionamento.	58
Tabela 13	-	Tensão admissível para capacidade de carga.	59
Tabela 14	-	Dimensões em planta das sapatas.	60
Tabela 15	-	Alturas das sapatas.	60
Tabela 17	-	Volume de concreto das sapatas.	61
Tabela 18	-	Recalques diferencias.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Concreto Armado
MPa	Mega pascal
NBR	Norma Técnica Brasileira
Nspt	Índice de resistência a penetração
SPT	Sondagem à Percussão

LISTA DE SÍMBOLOS

h_0	Altura da base rígida
H	Altura total
ϕ	Ângulo de atrito interno
ϕ'	Ângulo de atrito interno corrigido
F_v	Carga vertical
C	Coesão
c'	Coesão corrigido
L	Comprimento da sapata
L'	Comprimento efetivo da sapata
Δz	Espessura da i-ésima camada
e_y	Excentricidade de carga na direção longitudinal
e_x	Excentricidade de carga na direção transversal
C_1	Fator de correção para recalque imediato
C_2	Fator de correção para recalque por adensamento
I_z	Fator de influência na deformação à meia altura da i-ésima camada
N_c, N_q e N_γ	Fatores de capacidade de carga em função do ângulo de atrito (ϕ);
b_c, b_q e b_γ	Fatores de correção da inclinação da base da sapata
i_c, i_q e i_γ	Fatores de correção da inclinação de carga
d_c, d_q e d_γ	Fatores de correção do efeito de profundidade
g_c, g_q e g_γ	Fatores de correção para a inclinação da superfície terreno
S_c, S_q e S_γ	Fatores de forma
α	Inclinação da base
ω	Inclinação do terreno
B	Largura da sapata
B'	Largura efetivo da sapata
E_s	Módulo de deformabilidade da i-ésima camada
γ_s	Peso específico do solo
d	Profundidade de assentamento
z	Profundidade do bulbo de tensão
m	Relação de B/L
F_{yk}	Resistência característica do aço ao escoamento na tração

F_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
q	Sobrecarga
ρ_d	Soma do recalque imediato e adensamento
t	Tempo em anos
σ_r	Tensão de ruptura
σ^*	Tensão líquida
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima na base da sapata quando houver excentricidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	CLASSIFICAÇÃO DAS FUNDAÇÕES.	19
3.1.1	<i>Tipos de fundação superficial.</i>	20
3.2	SAPATAS	21
3.2.1	<i>Classificação das sapatas</i>	22
3.2.1.1	<i>Quanto a rigidez</i>	22
3.2.1.2	<i>Quanto à forma</i>	24
3.2.2	<i>Sapata associada ou combinada</i>	25
3.3	CAPACIDADE DE CARGA DE SAPATAS	26
3.3.1	<i>Modos de rupturas</i>	26
3.3.2	<i>Modelo teórico de Terzaghi</i>	28
3.3.3	<i>Fatores de correção</i>	32
3.3.4	<i>Bulbos de tensão</i>	35
3.4	RECALQUES DE SAPATAS	36
3.4.1	<i>Método de Schmertmann</i>	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	REGIÃO ESTUDADA	39
4.2	PERFIL DO SUBSOLO (SONDAGEM SPT)	39
4.3	DADOS DE ENTRADA PARA EXECUÇÃO DA PLANILHA	41
4.3.1	<i>Formato da sapata</i>	41
4.3.2	<i>Peso Específico</i>	42
4.3.3	<i>Ângulo de atrito interno</i>	42
4.3.4	<i>Coesão</i>	43
4.3.5	<i>Modo de ruptura</i>	43
4.3.6	<i>Dados de projeto</i>	43
4.3.7	<i>Dados do recalque</i>	44
4.4	A PLANILHA.	44
4.5	EXECUÇÃO DA PLANILHA	53
5	RESULTADOS E ANÁLISES	57
5.1	DETERMINAÇÃO DO BULBO DE TENSÕES	57
5.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SOLO	57
5.3	CAPACIDADE DE CARGA DO SISTEMA SOLO-SAPATA	58
5.4	DETERMINAÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL	58
5.5	DIMENSÕES FINAIS DAS SAPATAS	59
5.6	DETERMINAÇÃO DAS ALTURAS	60
5.7	VOLUME DE CONCRETO	61
5.8	RECALQUES	62

6	CONCLUSÕES.....	63
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A – INFORMAÇÕES ÚTEIS DA SAPATA S32 (01)	66

1 INTRODUÇÃO

A estrutura de um edifício gera tensões resultantes de ações como o peso próprio ou reação a esforços externos, direcionando para a infraestrutura, o qual repassa para o solo por sua superfície de contato lateral ou sua base, permitindo-se que o sistema como um todo se mantenha estável. (Aoki, Cintra e Albiero, 2012)

A infraestrutura instável apresenta problemas na edificação podendo ser patologias que prejudiquem a arquitetura ou em casos mais extremos atinja o sistema estrutural, podendo vetar o uso do edifício. A instabilidade pode ser resultado de diversos fatores, os mais comuns são a escolha do tipo da fundação errada, tipo do solo não homogêneo ou desconhecidos quando não existir ensaios geotécnicos, recalques diferenciais ou excessivos e mal dimensionamentos da geometria da fundação.

Para a criação de um projeto eficiente e confiável, a fundação de uma estrutura deve ser bem elaborada e estudada, para que exerça sua função sem causar danos a edificação. A Norma Técnica Brasileira (NBR 6118, 2014) fala que as estruturas de concreto executadas, sob as condições previstas na época do projeto, ao serem utilizadas conforme previsto, atenda os fatores de segurança no prazo correspondente à sua vida útil. Em uma edificação com fundações superficiais do tipo sapata, cada elemento recebe cargas e momentos diferentes, tornando obrigatório a verificação da sua geometria e condições como a verificação de força normal, força cortante, momento fletor e momento torsor.

Para obter informações do solo, é realizado, o ensaio de sondagem à percussão (standard penetration test – SPT), o mesmo, é o método mais utilizado no Brasil, e com o emprego de métodos semiempíricos, é possível determinar a capacidade de carga, e por fim, pode-se avaliar o desempenho por provas de carga. A teoria da capacidade de carga do solo para fundações superficiais, foi estudada por Terzaghi, sendo o primeiro a desenvolver a teoria de resistência do solo na interação sapata-solo. (Aoki, Cintra e Albiero, 2012)

Neste trabalho foi feito um estudo de caso em sapatas isoladas em solo arenoso, desenvolvendo para isso uma planilha eletrônica destinada para o cálculo da capacidade de carga e estimativa de recalque imediato, por fim, é comparado com a tensão admissível encontrada por diferentes métodos semiempíricos.

2 OBJETIVOS

Análise do projeto de fundação superficial tipo sapata através do método teórico de Vesic.

2.1 Objetivo geral

Determinar a capacidade de carga pelo método teórico de Vesic, tensão admissível por métodos semiempíricos e estimar recalque imediato pelo método de Schmertmann.

2.2 Objetivos específicos

O trabalho tem como objetivos específicos:

- Analisar a sondagem SPT (standard penetration test – SPT).
- Determinar a capacidade de carga por métodos teórico e tensão admissível por métodos semiempíricos.
- Calcular a estimativa do recalque imediato no sistema solo-sapata.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Fundação pode ser definido como o ato de apoiar a estrutura, de modo que as cargas resultantes que transmite entre os elementos estruturais, chegue até a sua base ou fuste em contato com solo, e seja distribuído sem causar recalques inadmissíveis na estrutura (CAPUTO, 1988). Segundo Costa e Paz (2018), as fundações quando dimensionadas, devem ser capazes de resistir os esforços provenientes da estrutura, sendo que o dimensionamento considera as características do solo onde será construída, devido a isso, o solo deve ser estudado para se obter informações necessárias, evitando-se deformações extremas e futuras patologias.

3.1 Classificação das fundações.

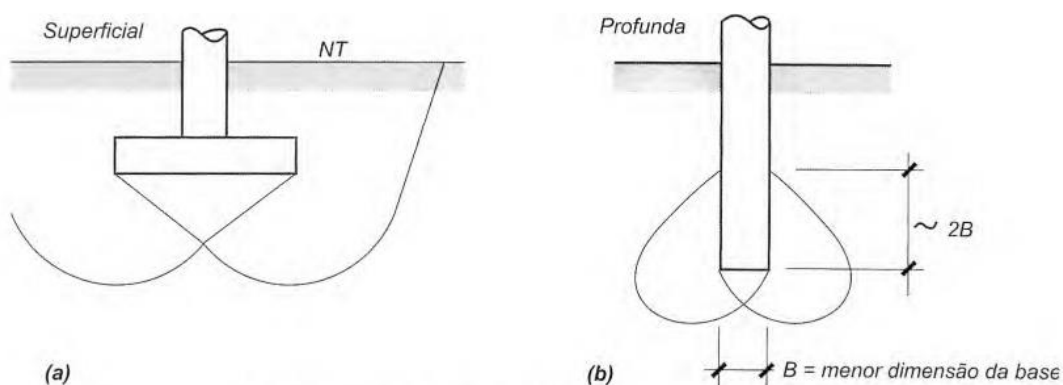
No decorrer do tempo, vários tipos de fundações surgiram, pois, um único tipo de fundação não atende para todos os tipos de solo, para suprir essa necessidade, outros modelos foram criados. A Norma Técnica Brasileira (NBR 6122, 2019) classificam de modo geral as fundações em profundas e rasas, esse último também é conhecido como direta ou superficial, ou ainda pelo método que a carga da estrutura é transferida ao solo.

A NBR 6122 (2019), define como fundação profunda um elemento estrutural que transmite a carga ao terreno pela base, conhecido como a resistência de ponta, e por sua superfície lateral, chamado de resistência de fuste, que juntas forma a resistência total da fundação isolada, outra característica é que sua ponta deve estar apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3 m, os tipos mais conhecidos são as estacas e os tubulões.

A fundação rasa (direta ou superficial), é um elemento estrutural que transfere as cargas para ao solo por sua base, e está assentada a uma profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação em planta.

De acordo com Velloso e Lopes (2011), as fundações podem ser classificadas pelo mecanismo de ruptura, sendo que a fundação rasa, quando rompe o solo atinge a superfície do solo de acordo com a representação na Figura 1, e a profunda, alcança uma altura aproximada de duas vezes sua menor dimensão.

Figura 1 - Fundação profunda e rasa.



Fonte: Velloso e Lopes (2011)

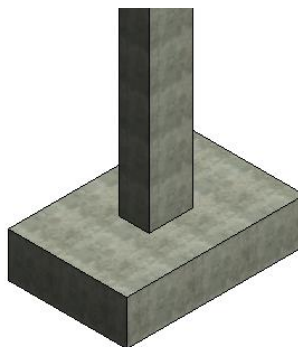
3.1.1 Tipos de fundação superficial.

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2012), fundação superficial é responsável por receber a carga do pilar, e distribuir exclusivamente por sua base em contato com o solo, de modo que o fuste, ou o corpo não apresente uma resistência por atrito com o solo, de modo que não seja considerável, por exemplo temos as sapatas isoladas, que também é o foco desse trabalho.

A NBR 6122 (2019), define alguns tipos de fundações superficiais:

- *“Bloco: Elemento de fundação rasa de concreto ou outros materiais tais como alvenaria ou pedras, dimensionado de modo que as tensões de tração nele resultantes sejam resistidas pelo material, sem necessidade de armadura.*

Figura 2 - Fundação superficial do tipo bloco.

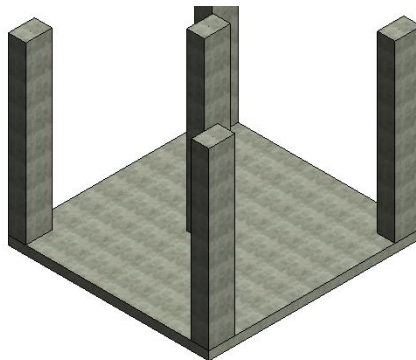


Fonte: Autor (2021).

- *Radier: Elemento de fundação rasa dotado de rigidez para receber e distribuir mais do*

que 70 % das cargas da estrutura.

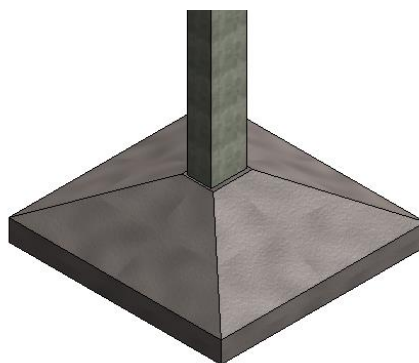
Figura 3 - Fundação superficial do tipo radier.



Fonte: Autor (2021).

- *Sapata: elemento de fundação rasa, de concreto armado, dimensionado de modo que as tensões de tração nele resultantes sejam resistidas pelo emprego de armadura especialmente disposta para esse fim.”*

Figura 4 - Fundação superficial do tipo sapata.



Fonte: Autor (2021).

3.2 Sapatas

As sapatas são elementos estruturais, denominados de fundação superficial, e é constituído de concreto armado, com uma altura inferior em relação ao comprimento dos lados da sua base, e isso se dá devido a armadura presente, que permite trabalhar a flexão.

Como característica, as sapatas têm uma capacidade de carga baixa a média, indicado para regiões onde apresente nas sondagens, a presença do solo argila rijas, e outros (Lima *et al.*, 2017).

3.2.1 Classificação das sapatas

Sapata é um elemento de fundação que recebe a carga do pilar e transfere diretamente para o solo, porém, as sapatas podem receber mais de um pilar e ter geometrias diferentes, quando a carga que chega na fundação for de apenas um pilar, essa sapata recebe o nome de sapata isolada (Figura 4), e quando mais de um, associada ou corrida.

A NBR 6118 (2014), trata as sapatas como rígidas, ou flexíveis, criando-se uma nova classificação, desde modo as sapatas podem ser classificadas, tanto pela rigidez, como pela sua forma.

3.2.1.1 Quanto a rigidez

A classificação das sapatas quanto a rigidez é muito importante, porque direciona o método que deve ser considerado para a transferência das tensões entre a fundação e o solo, facilitando a escolha do procedimento ou método a ser adotado no dimensionamento estrutural (Bastos, 2019).

- Rígida

A NBR 6118 (2014), defini no item 22.6.2.2 que o comportamento das sapatas rígidas e descrito como:

“a) trabalho à 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 à compressão na flexão, que se concentra mais na região do pilar que se apoia na sapata e não se aplica também ao caso de sapatas muito alongadas em relação à forma do pilar;

b) trabalho ao cisalhamento também em duas direções, não apresentando ruptura por tração diagonal,10 e sim por compressão diagonal verificada conforme 19.5.3.1. Isso ocorre porque a sapata rígida fica inteiramente dentro do cone hipotético de punção, não havendo, portanto, possibilidade física de punção.”

Para Alva (2007), as sapatas rígidas são habitualmente adotadas como elementos de fundação em solos que apresentam boa resistência nas camadas próximas à superfície e para o dimensionamento da armadura de flexão longitudinal, é utilizado o método geral de bielas e tirantes. Alternativamente, sapatas rígidas podem ser dimensionadas da mesma forma que sapatas flexíveis para obtendo-se precisão razoável. As tensões de cisalhamento devem ser verificadas, em particular a ruptura por compressão diagonal do concreto na ligação laje (sapata) – pilar. A verificação da punção é desnecessária, pois a sapata rígida situa-se inteiramente dentro do cone hipotético de punção, não havendo possibilidade física de ocorrência de tal fenômeno.

- Flexível

No item 22.6.2.3, as sapatas flexíveis são descritas como:

“Embora de uso mais raro, essas sapatas são utilizadas para fundação de cargas pequenas e solos relativamente fracos. Seu comportamento caracteriza por:

a) trabalho à flexão nas duas direções, não sendo possível admitir tração na flexão uniformemente distribuída na largura correspondente da sapata. A concentração to ao pilar deve ser, em princípio, avaliada;

b) trabalho ao cisalhamento que pode ser descrito pelo fenômeno da punção (ver 19.5). A distribuição plana de tensões no contato sapata-solo deve ser verificada.”

De acordo com Carvalho (2015), as sapatas flexíveis trabalham a flexão nas duas direções, e apresenta comportamento estrutural de uma peça fletida e são dimensionadas para o momento fletor e força cortante, sendo necessário a verificação de punção, esse último não é

necessário quando sapata for rígida. Seu uso apesar de ser usados com pouca frequência, é indicado para casos em que a carga no pilar seja relativamente baixa e o solo respectivamente fraco. A NBR 6118 (2014) considera sapata rígida quando a verificação nas duas direções for atendida (01), se não atender em alguma direção, chama-se de sapata flexível.

$$h \geq \frac{B - b}{3} \quad (01)$$

Sendo:

h – Altura da sapata.

B – Dimensão da sapata em uma determinada direção.

b – Dimensão do pilar na mesma direção.

A norma recomenda que para as sapatas que não atendem a verificação ou em casos extremos na qual a base da fundação esteja sobre rocha, mesmo que rígida, essa hipótese deve ser revista.

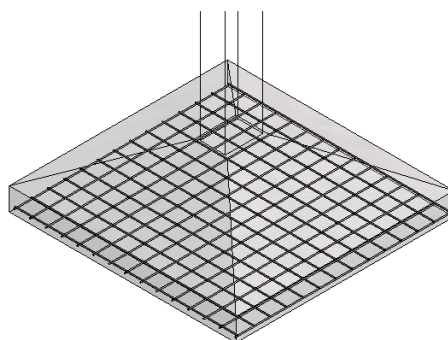
3.2.1.2 Quanto à forma

De acordo com Bastos (2019), de todos os elementos de fundação superficial, a sapata é o mais comum, e devido à grande variabilidade existente na configuração e forma dos elementos estruturais que nela se apoiam, encontra-se diversos tipos de sapatas, como a isolada, corrida, associada, de divisa e etc.

- Sapata isolada e bloco

O bloco e sapata são diferentes em dois aspectos principais, o primeiro é construído de modo que sua geometria seja a de um bloco (Figura 2), e o segundo além de mudar a geometria, é feito de concreto armado, tornando-a resistente a flexão (Ferreira, 2017). [Figura 5]

Figura 5 - Sapata isolada



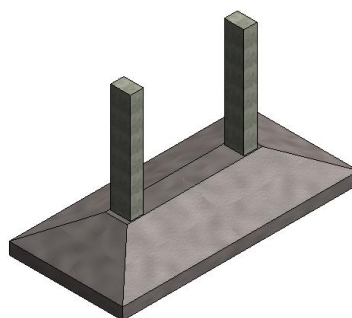
Fonte: Autor (2021).

O uso desse tipo é mais comum nas construções, sua principal função é transmitir a carga de um único pilar, e distribuir pela área de contato com o solo, e sua geometria varia de quadrada e retangular, em poucos casos pode ser construída também em base circular. Em relação a sua altura, Alva (2007) cita que “é constante ou variando linearmente entre as faces do pilar e a extremidade da base”.

3.2.2 Sapata associada ou combinada

A sapata associada de acordo com a NBR 6122 (2019), é caracterizada por “transmitir as cargas de dois pilares ou mais”, sendo que o centro de gravidade da carga, esteja coincidente com o da sapata, para que a distribuição seja uniforme entre a base e o solo. Portanto, seu uso comum, é quando dois pilares estejam próximos e o dimensionamento das sapatas isoladas, se sobrepõem em planta ou os bulbos de tensões, e por norma, quando os pilares não estiverem alinhados, sua carga não deve ser superior a 70% da carga total da estrutura. [Figura 6]

Figura 6 - Sapata associada ou combinada.

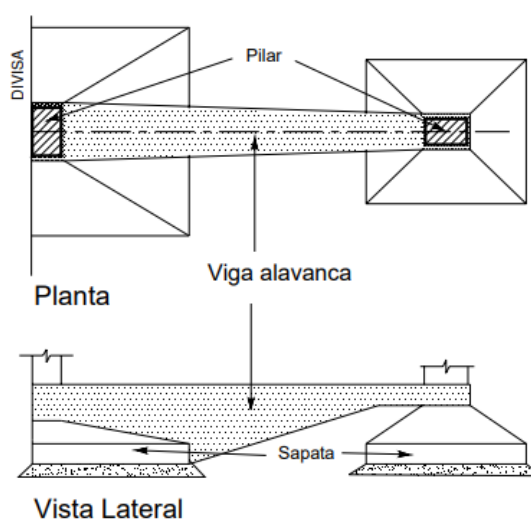


Fonte: Autor (2021).

- Sapata em divisa

Alva (2007) afirma que sapata em divisa é o caso em que o centro de gravidade do pilar não coincide com o centro da sapata, fazendo uso da viga de alavanca ou equilíbrio (Figura 7). Esse tipo é comum quando a sapata isolada sobrepõe a divisa do terreno, obrigando-se que seja construída de modo que não ultrapasse o limite, e devido a isso ocorre a excentricidade dos centros de gravidade, deste modo a viga de equilíbrio é ligada ao pilar mais próximo, sua função é receber as cargas de dois pilares e transmitir para o centro de gravidade da mesma, além de resistir aos esforços de momentos fletores causados pela excentricidade da carga do pilar em divisa.

Figura 7 - Sapata em divisa.



Fonte: Alva (2007)

3.3 Capacidade de carga de Sapatas

Cintra, Aoki e Albiero (2012) afirmam que as cargas provenientes da estrutura, que chega gradativamente na sapata através do pilar, geram uma tensão na base da fundação, e consequentemente surge uma superfície potencial de ruptura no interior do maciço do solo. No instante antes da ruptura, é o momento de resistência máxima do sistema sapata-solo, e essa resistência é denominada como capacidade de carga.

3.3.1 Modos de rupturas

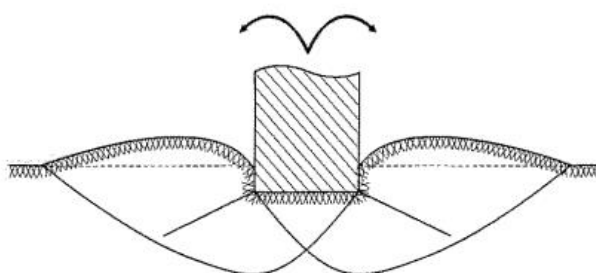
A ruptura é o comportamento do solo no momento em que é ultrapassado a capacidade de carga máxima na interação fundação-solo. A sapata tende a girar, e consequentemente levantar uma porção de terra nas redondezas da fundação, quando a ruptura é do tipo frágil. Será considerado dúctil, para os recalques incessantes da sapata, na direção vertical sem perder o prumo, e não apresentar levantamento de solo nas redondezas do assentamento. [Cintra, Aoki e Albiero, 2012]

- Ruptura geral

A ruptura geral ocorre em solos que apresentam uma resistência maior, são menos deformáveis, e a profundidade de assentamento das sapatas é consideravelmente rasa. A superfície de ruptura, inicia em uma extremidade da sapata e vai até a superfície do terreno após sua extremidade oposta, ilustrado na Figura 8. A rachadura é súbita e catastrófica, levando ao tombamento da sapata e uma protuberância significativa no solo, a carga de ruptura é atingida para pequenos valores de recalque.

Cintra, Aoki e Albiero (2012), afirma que para fundações rasas, consideramos que ocorre ruptura geral em solos mais rígidos (areias compactas a muito compactas e argilas rijas a duras).

Figura 8 - Ruptura geral.

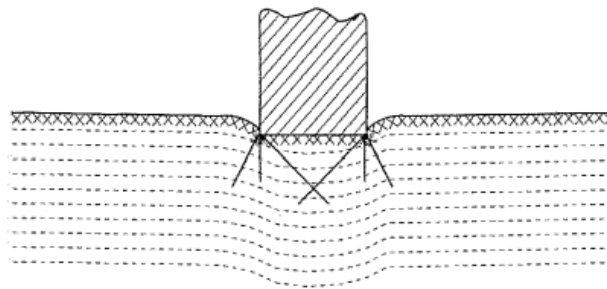


Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2012)

- Ruptura por punção

Ainda de acordo com os autores, a ruptura por punção ocorre em solos mais deformáveis e menos resistentes. Diferente da ruptura geral, nesse tipo de deformação do solo, temos a compressão do solo, fazendo com que a sapata adentre mais a camada superficial do terreno, na Figura 9 podemos observar que nas arestas da sapata, o solo segue junto ao recalque.

Figura 9 - Ruptura por punçãoamento.



Fonte: Cintra, Aoki e Albiero (2012)

Neste caso, a carga de ruptura é atingida para recalques elevados e ininterruptos, podendo haver a necessidade de acréscimo contínuo na carga para manter o crescimento do deslocamento, de modo que se torne incompreensível quando atingir a resistência necessária.

Os tipos de solo mais comum para esses casos, são os solos mais flexíveis como as areias pouco compactas a fofas, e argilas moles a muito moles.

- Ruptura local

Para Vesic (1975 apud AOKI, CINTRA e ALBIERO, 2012), também existe a ruptura local, a mesma ocorre nos solos de média compactidade, areias medianamente compactas e argilas médias, e não apresentam um comportamento típico, colocando-a como intermediária nos casos dos outros métodos de ruptura.

3.3.2 Modelo teórico de Terzaghi

Karl Terzaghi, em 1943, formulou a teoria de capacidade de carga de um sistema sapata-solo, e para isso, definiu 3 hipóteses básicas, segundo Cintra, Aoki e Albiero (2012).

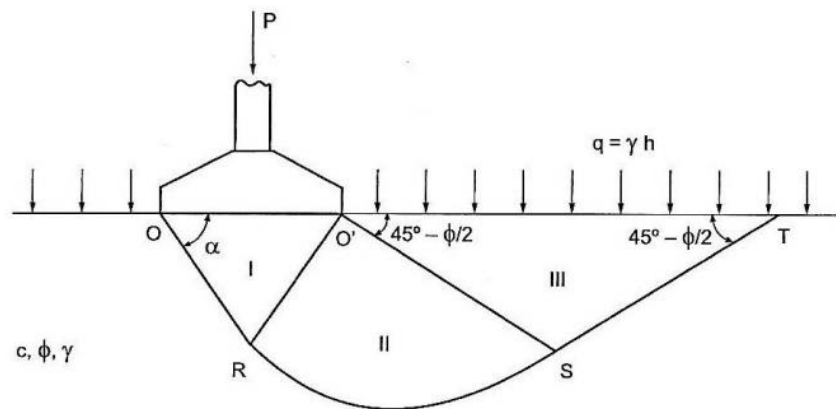
- Uma sapata, é considerada corrida quando seu comprimento L for pelo menos 5 vezes maior que sua largura B ($L \geq 5B$).
- A profundidade de assentamento da sapata h , é inferior à sua largura B ($h < B$), atendendo a essa condição, a resistência ao cisalhamento da camada de solo

situada acima da cota de apoio da sapata, pode ser desprezada, e assim, substituir essa camada de espessura d de peso específico γ por uma sobrecarga $q = \gamma d$.

- O solo na base da sapata é rígido, pouco deformável, enquadrando a situação no caso de ruptura geral.

Desta forma, a esquematização do problema pode ser demonstrada na Figura 10, na qual o trecho ORST é identificado como a superfície potencial de ruptura, e os trechos retos OR e ST, e a espiral logarítmica RS, formam 3 zonas distintas no maciço do solo, no qual tem a mesma coesão c , ângulo de atrito ϕ e peso específico γ .

Figura 10 - Superfície potencial de ruptura.



Fonte: Terzaghi (1943 apud CINTRA, AOKI e ALBIERO, 2012)

Fazendo o equilíbrio de forças verticais no trecho III, identificado na Figura 10, e a suposição de efeitos do solo sem peso e sapata a superfície, solo não coesivo e sem peso, solo não coesivo e sapata a superfície, Terzaghi chegou a seguinte equação:

$$\theta_r = CN_c + qN_q + \gamma BN_\gamma \quad (02)$$

Em que:

θ_r – Tensão de ruptura

C – Coesão do solo

N_c, N_q e N_γ – Fatores de capacidade de carga em função do ângulo de atrito (ϕ);

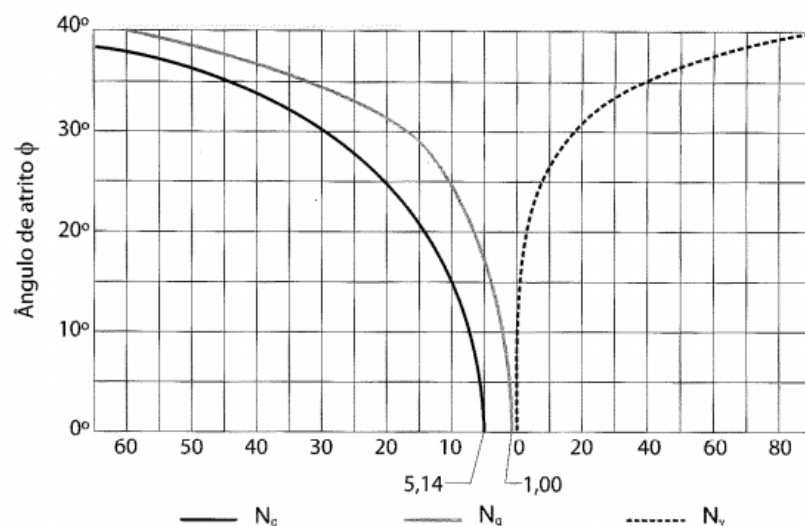
q – Sobrecarga ($q = \gamma d$), onde d representa a profundidade de assentamento;

γ_s – Peso específico efetivo do solo na cota de apoio da sapata;

B – Menor dimensão da sapata;

Segundo Terzaghi e Peck (1967 apud AOKI, CINTRA e ALBIERO, 2012, p. 29), as três parcelas representam, respectivamente, as contribuições da coesão, sobrecarga e peso específico. Os fatores de capacidade de carga N_c, N_q e N_γ são adimensionais e dependem unicamente do ângulo de atrito (ϕ), não havendo solução analítica para N_γ e podem ser extraídos com auxílio do gráfico apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Fatores da capacidade de carga.



Fonte: Terzaghi e Peck (1967 apud CINTRA, AOKI e ALBIERO, 2012)

Para Vesic (1975) o valor do fator de capacidade de carga N_γ , pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$N_\gamma \approx 2(N_q + 1) \tan \phi \quad (03)$$

Ainda de acordo com os autores, considerando a forma da sapata, é adicionado os fatores de forma S_c, S_q e S_γ , sendo assim, a capacidade de carga na ruptura geral é dada pela seguinte equação:

$$\theta_r = cN_c S_c + qN_q S_q + \gamma B N_\gamma S_\gamma \quad (04)$$

Os valores dos fatores de forma S_c , S_q e S_γ , podem ser obtidos pela Tabela 1 pelo método de Terzaghi. Porém através de estudos, De Beer (1967) chegou nas equações apresentadas na Tabela 2, que posteriormente melhorada por Vesic (1970).

Tabela 1 - Fatores de forma.

Formato geométrico da fundação	S_c	S_q	S_γ
Corrida	1	1	1
Quadrada	1,2	1	0,8
Circular	1,2	1	0,6
Retangular	1,1	1	0,9

Fonte: Aoki, Cintra e Albiero (2012)

Tabela 2 - Fatores de forma por De Beer (1967) melhorada por Vesic (1970).

Formato geométrico da fundação	S_c	S_q	S_γ
Corrida	1	1	1
Retangular	$1 + \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$	$1 + \left(\frac{B}{L}\right) \tan \phi$	$1 - 0,4 \frac{B}{L}$
Circular e quadrada	$1 + \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$	$1 + \tan \phi$	0,6

Fonte: Aguiar (2015)

Para a capacidade de carga na ruptura por punção, é utilizada a mesma equação, porém os valores dos parâmetros do solo, coesão (c') e ângulo de atrito interno (ϕ'), tem uma pequena redução, utilizando as equações abaixo:

$$c' = \frac{2}{3}c \quad (05)$$

$$\tan \phi' = \frac{2}{3} \tan \phi \quad (06)$$

3.3.3 Fatores de correção

Um aperfeiçoamento da solução de Terzaghi foi feito por Meyerhof (1953). Ele passou a considerar a resistência ao cisalhamento do solo situado acima da base da fundação. Assim, a superfície de deslizamento intercepta a superfície do terreno.

Com isso, passa a ser considerado o efeito de profundidade, pois essa parcela deixa de ser descartada, e conseqüentemente, em cada termo da fórmula geral é adicionando o fator de correção do efeito de profundidade (d_c , d_q e d_γ). Anos depois, Brinch Hansen (1970), definiu equações para esses fatores, como mostrado abaixo:

- Para $\frac{D}{B} \leq 1$:

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \frac{D}{B} \quad (07)$$

$$d_\gamma = 1 \quad (08)$$

$$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \tan \phi} \quad (09)$$

Para $\phi = 0$ a expressão de d_c é:

$$d_c = 1 - 0,4 \frac{D}{B} \quad (10)$$

- Para $\frac{D}{B} > 1$:

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \frac{D}{B} \quad (11)$$

$$d_\gamma = 1 \quad (12)$$

$$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \tan \phi} \quad (13)$$

- Para $\phi = 0$ a expressão de d_c é:

$$d_c = 1 - 0,4 \tan^{-1} \left(\frac{D}{B} \right) \quad (14)$$

De acordo com Aguiar (2015), os esforços que chegam no elemento estrutural podem ser excêntricos ou inclinados, fazendo necessário o uso de fatores de correção. Brinch Hansen (1961), introduziu os fatores na fórmula de Terzaghi, capazes de resolver essa situação para caso de cargas inclinadas, porém, para excentricidade, foi feita uma nova formulação, na qual é utilizado uma área real menor da base da fundação, chamado de área efetiva (B', L'), nesse cálculo é deslocado o centro geométrico da fundação, para o encontro do ponto de aplicação de carga. Essa área efetiva é utilizada apenas para encontrar o valor da carga, e não da tensão de ruptura. A equação é a seguinte:

$$B' = B - 2e_x \quad (15)$$

$$L' = L - 2e_y \quad (16)$$

Sendo:

e_x – excentricidade na direção transversal

e_y – excentricidade na direção longitudinal

Ainda de acordo com o autor, a sociedade alemã DEGEBO, realizou diversos ensaios em grande escala, com sapatas assentadas em areias, chegando a uma relação de B/L com os coeficientes de inclinação de carga. Vesic (1970), definiu como:

$$i_q = \left[1 - \frac{p}{q + B' L' c \cot \phi} \right]^m \quad (17)$$

$$i_\gamma = \left[1 - \frac{p}{q + B' L' c \cot \phi} \right]^{m+1} \quad (18)$$

O valor de m, é dependente da direção da inclinação da carga, que pode ser em direção a B ou L. O cálculo utilizado vai ser de acordo com as equações abaixo, e é definido por sua direção. Para casos onde a carga tem inclinação sem ser paralelo nenhum dos lados, deve se

calcular o m_l e m_b , multiplicar por o quadrado do cosseno e seno respectivamente, com o ângulo em relação ao pararelo ao comprimento.

$$m_B = \frac{2 + B/L}{1 + B/L} \quad (19)$$

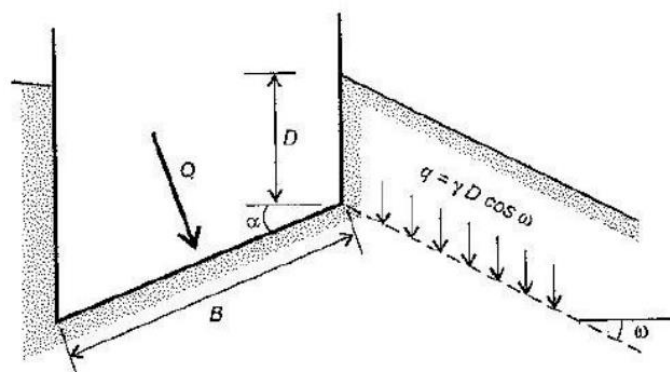
$$m_L = \frac{2 + L/B}{1 + L/B} \quad (20)$$

Anos depois, Vesic (1975), sugeriu o uso da expressão seguinte, para definir o fator i_c , válida para $\phi = 0$.

$$i_c = 1 - \frac{mP}{B'L'cN_c} \quad (21)$$

Aguiar (2015) fala que, na engenharia pode ocorrer das sapatas serem assentadas e utilizar uma inclinação na sua base, isso ocorre com o intuito de facilitar a transmissão das cargas horizontais elevadas. Outro extremo, o terreno ter sua superfície inclinada. A Figura 12, ilustra os dois casos, na qual os termos α e ω representam a inclinação da base da fundação e a inclinação do terreno, respectivamente.

Figura 12 - Fundação de base inclinada e terreno inclinado.



Fonte: Vesic (1975 apud Aguiar, 2015)

Para essas situações, ocorre também o acréscimo dos fatores de correção em cada termo da fórmula, sugerido por Vesic (1970) baseado nos estudos de Brinch Hansen (1970) e

Meyerhof (1953), as expressões para cálculo dos fatores de correção da inclinação da base b_c, b_q e b_γ , estão descritos abaixo:

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \tan \phi)^2 \quad (22)$$

$$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \tan \phi} \quad (23)$$

Quando $\phi = 0$ o valor de b_c é:

$$b_c = 1 - \frac{2\alpha}{(\pi + 2)} \quad (24)$$

Os fatores de correção para a inclinação da superfície terreno g_c, g_q e g_γ , foi sugerido por Brinch Hansen (1970).

$$g_q = g_\gamma = (1 - \tan \omega)^2 \quad (25)$$

$$g_c = g_q - \frac{1 - g_q}{N_c \tan \phi} \quad (26)$$

Quando $\phi = 0$ o valor de g_c é:

$$g_c = 1 - \frac{2\omega}{(\pi + 2)} \quad (27)$$

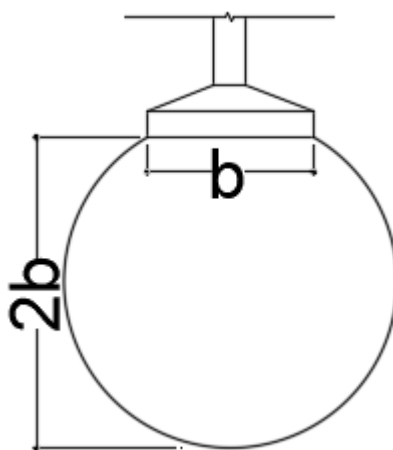
Por fim, a fórmula geral com todos os fatores de correção:

$$\sigma_r = cN_c S_c d_c i_c b_c g_c + qN_q S_q d_q i_q b_q g_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma b_\gamma g_\gamma \quad (28)$$

3.3.4 Bulbos de tensão

Os bulbos de tensões compreendem a região em que há propagação de tensões verticais geradas pela carga da fundação em uma região do solo onde as tensões geradas têm uma representividade maior, geralmente 10% a mais do que a tensão aplicada na superfície. [Velloso e Lopes, 2011]. A Figura 13 representa as proporções alcançadas pelos bulbos em uma sapata isolada.

Figura 13 - Bulbo de tensão em sapata isolada.



Fonte: Autor (2021)

A área do bulbo é formada abaixo da sapata partindo das extremidades com uma inclinação aproximada de 27° até uma distância z . Segundo Simons e Menzies (1981) apud Aoki, Cintra e Albiero (2012), essa distância varia de acordo com a geometria da sapata, onde sapatas quadradas desenvolvem bulbos de até $2,5b$ e retangulares $3b$.

Porém, é utilizado a profundidade $z = 2b$ devido a mecânica dos solos que define essa profundidade após a base da sapata, coincidente com o acréscimo de 10% da tensão.

3.4 Recalques de Sapatas

Recalque é o resultado das deformações do solo existente entre a base da sapata e a camada indeslocável, devido a aplicação de tensão, deslocando-se o apoio estrutural na direção vertical para baixo. Os recalques de fundações podem comprometer a estrutura ameaçando sua instabilidade, ou causando danos devido ao recalque diferencial.

O recalque diferencial ocorre devido a heterogeneidade do solo em cada sapata isolada, além das dimensões diferentes e cargas provenientes da estrutura. O recalque total ou absoluto, é a soma do recalque imediato e o recalque de adensamento.

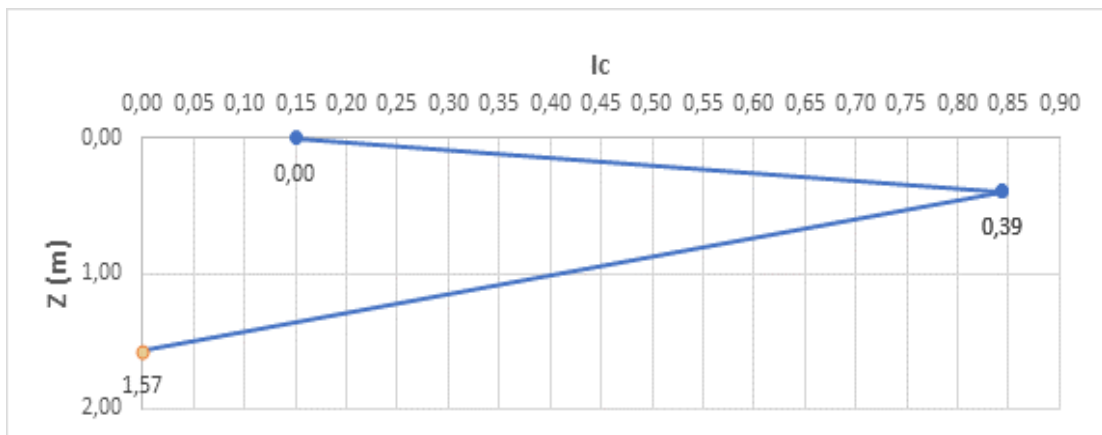
De acordo com Aoki, Cintra e Albiero (2012), os recalques imediatos ocorrem simultaneamente com a aplicação da carga, mudando a forma do solo e diminuição do seu volume. Porém, o recalque de adensamento acontece no decorrer do tempo, e é o resultado da expulsão gradual de ar e água dos vazios do solo.

3.4.1 Método de Schmertmann

Segundo Aoki, Cintra e Albiero (2012), o método desenvolvido pelo autor é uma adaptação da teoria da elasticidade, levando em consideração uma variação do módulo de deformabilidade em relação a profundidade. Schmertmann, apresentou sua teoria em 1970, e em 1978 aprimorou com o objetivo de separar os casos de sapata corrida e quadradas.

Após estudos, o autor observou que o recalque máximo, não ocorre imediatamente no local do contato com a sapata, e sim, em uma profundidade de $z = b/2$, depois vai decrescendo até uma profundidade de $z = 2b$. A figura abaixo, demonstra um perfil de deformação do solo.

Figura 14 - Deformação do solo, modelo de Schmertmann.



Fonte: Autor (2021)

Para essa teoria, é calculado fatores de correção para o recalque imediato (C_1), e recalque de adensamento (C_2), o último é calculado levando em consideração o tempo em anos, sendo que, para calcular apenas o recalque imediato, utilizar o valor de $C_2 = 1$.

$$c_1 = 1 - 0,5 * \left(\frac{q}{\sigma_*} \right) \geq 0,5 \quad (29)$$

$$c_2 = 1 + 0,2 \log \left(\frac{t}{0,1} \right) \quad (30)$$

Sendo:

q – tensão vertical efetiva à cota de apoio a fundação (sobrecarga);

σ^* – tensão líquida ($\sigma^* = \sigma - q$);

t – valor em anos;

Por fim, para o cálculo do recalque em sapatas rígidas assentadas em areias, é somado os recalques de n camadas consideradas homogêneas, considerando os efeitos de embutimento e do tempo, onde sua profundidade vai até o limite de $2b$.

$$\rho_d = c_1 c_2 \sigma^* \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_z}{E_z} \Delta z \right)_i \quad (31)$$

Sendo:

I_z – fator de influência na deformação à meia altura da i -ésima camada;

E_s – módulo de deformabilidade da i -ésima camada ($k\alpha N_{spt}$);

Δz – espessura da i -ésima camada;

Os coeficientes k e α são valores tabelados que dependem do tipo de solo, onde o primeiro varia de 0,2 MPa para argilas siltosas e vai até 1,1 MPa para areias com pedregulhos, e o segundo coeficiente tem um valor de 3 para areia, 5 silte e 7 argilas.

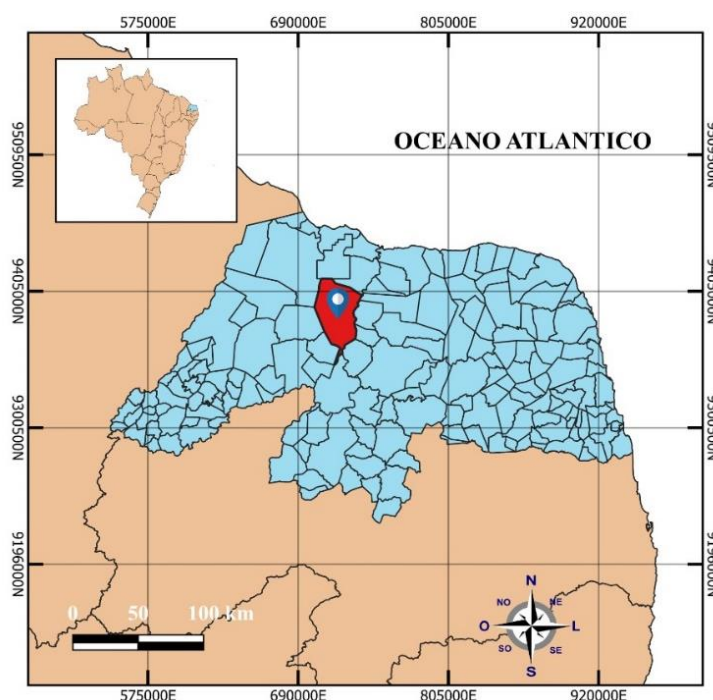
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Região estudada

No presente estudo utilizou-se dados de sondagem SPT de uma obra na cidade de Assú/RN. A cidade de Assú fica localizada na região central do estado do Rio Grande do Norte, a uma distância de 207 Km da capital Natal. A Figura 15 apresenta o mapa de localização do Município de Assú.

A zona urbana do Município situa-se predominantemente em solos aluvionares recentes que recobrem a Formação Açu, composta por arenitos finos a grossos, localmente conglomeráticos, de cor cinza claro, amarelada ou avermelhada, com intercalações de folhelhos e argilitos sílticos. [IDEMA,2008].

Figura 15 - Mapa de localização do município de Assú/RN.



Fonte: Carvalho e Fernandes (2020).

4.2 Perfil do subsolo (sondagem SPT)

Foi realizado a sondagem por percussão (SPT), com o objetivo de realizar o reconhecimento do solo no local da obra, uma vez que, a obra foi resultado de um convênio federal cujo projeto, inclusive de fundações é padrão, em nível nacional, sendo, portanto,

indispensável a análise do solo local para verificar se a solução de projeto sugerida atende às condições geotécnicas do local.

Foram executados 3 furos de sondagem que determinaram o perfil do solo local. Os furos atingiram uma profundidade de sondagem de 8,10 e 13 metros, onde mostra-se um perfil arenoso e pouco argilosa, mediantemente compacta a compacta. Não foi identificado Nível d'água na data da sondagem.

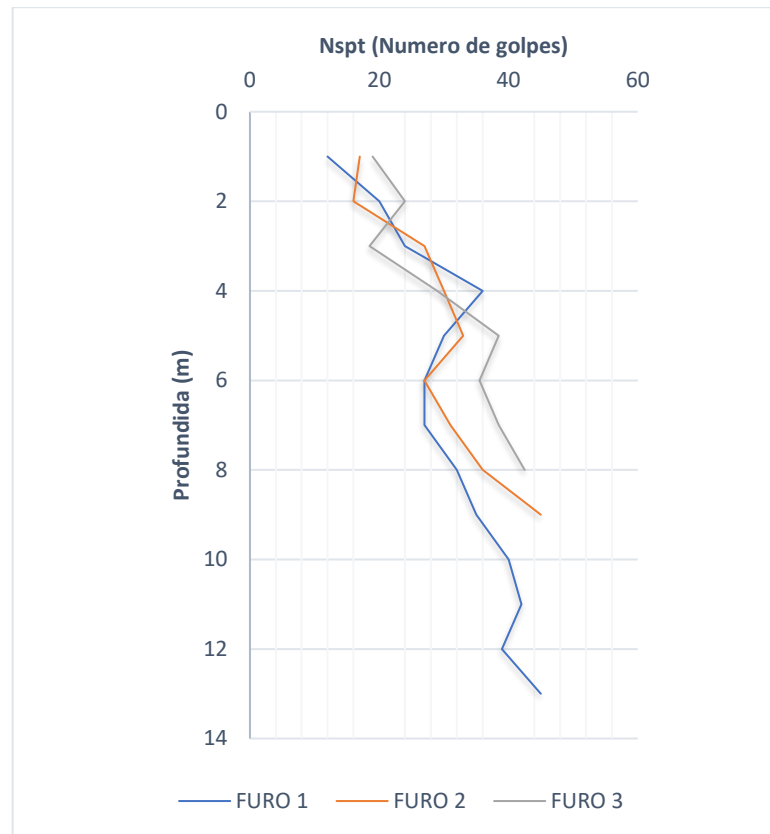
Na Tabela 3 é abordado os dados obtidos referentes ao Nspt nos primeiros 30 cm de cada metro de profundidade, e nos 30 cm finais, para os 3 furos realizados. O Gráfico 1 mostra o perfil da distribuição do Nspt com a profundidade para os 3 furos executados, considerando os Nspt finais de cada camada.

Tabela 3 - Dados dos furos realizados na sondagem.

SONDAGENS						
Profundidade (m)	FURO 01		FURO 02		FURO 03	
	<i>Iniciais</i>	<i>Finais</i>	<i>Iniciais</i>	<i>Finais</i>	<i>Iniciais</i>	<i>Finais</i>
1	10	12	18	17	17	19
2	20	20	18	16	22	26
3	21	24	24	27	18	19
4	31	36	27	30	28	30
5	27	30	28	33	36	41
6	22	27	24	27	33	38
7	24	27	26	31	33	44
8	28	32	34	36	39	46
9	32	35	33	45		
10	30	40	30	-		
11	29	42				
12	37	39				
13	33	45				

Fonte: Autor (2021)

Gráfico 1 - Perfil Geotécnico da sondagem.



Fonte: Autor (2021)

4.3 Dados de entrada para execução da planilha

4.3.1 Formato da sapata

A planilha precisa de dados de entrada para exercer sua função, pois eles serão usados para os cálculos, ou definição de fatores. A primeira informação requerida, é sobre o formato da sapata, o mesmo depende da geometria do pilar, devido a condição apresentada na Equação 32, que também atinge diretamente as dimensões finais da sapata. No estudo realizado, serão analisadas apenas sapatas retangulares disponíveis no projeto.

$$L - B = L_0 - B_0 \quad (32)$$

Sendo:

L – Comprimento da sapata;

L_0 – Comprimento do pilar;

B – Largura da sapata;

B_0 – Largura do pilar;

4.3.2 Peso Específico

Godoy (1972, apud AOKI, CINTRA e ALBIERO, 2012) realizou diversos ensaios, com os resultados desenvolveu as tabelas 4 e 5, com valores aproximados para o peso específico, que podem ser usados quando não houver valor definido por laboratório.

Tabela 4 - Peso específico da argila.

Nspt	Consistência	Peso específico (kN/m ³)
≤ 2	Muito mole	13
3 – 5	Mole	15
6 – 10	Média	17
11 – 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: Godoy (1972, apud AOKI, CINTRA e ALBIERO, 2012)

Tabela 5 - Peso específico da areia.

Nspt	Compacidade	Peso específico (kN/m ³)		
		Areia Seca	Úmida	Saturada
< 5	Fofa	16	18	19
5 – 8	Pouco Compacta			
9 – 18	Mediamente Compacta	17	19	20
19 – 40	Compacta	18	20	21
> 40	Muito Compacta			

Fonte: Godoy (1972, apud AOKI, CINTRA e ALBIERO, 2012)

4.3.3 Ângulo de atrito interno

A ângulo de atrito interno é definido como o ângulo máximo entre a força aplicada ao solo, com a força normal da superfície de contato, sem ocorrer o cisalhamento do solo no plano de ruptura. Godoy (1983, apud AOKI, CINTRA e ALBIERO, 2012), criou a equação (33) abaixo para determinação do ângulo de atrito, em função do Nspt.

$$\phi = 28^\circ + 0,4 * N_{spt} \quad (33)$$

4.3.4 Coesão

A coesão é definida como a força de atração entre as superfícies das partículas, sendo responsável por uma parcela da resistência ao cisalhamento dos solos. Uma característica das areias, é que sua coesão é zero, devido a granulometria e o alto índice de vazios, o qual permitem serem rompidos a ligação atômica facilmente, pois a área de contatos na superfície das partículas é baixa. Teixeira e Godoy (1996, apud AOKI, CINTRA e ALBIERO, 2012), sugere a equação 34 para determinar a coesão em solos não arenosos, no qual relaciona com o índice de resistência a penetração N_{spt} .

$$C = 10 * N_{spt} \quad (34)$$

4.3.5 Modo de ruptura

O modo de ruptura é o comportamento do solo previsto em função da compactidade/consistência do solo obtido na sondagem SPT. Pode ser do tipo Geral ou Puncionamento, no qual ocorrem em solos menos deformáveis e mais deformáveis, respectivamente.

4.3.6 Dados de projeto

As dimensões dos pilares são fornecidas no projeto, e são calculadas para suportarem as solicitações as quais estão sujeitas, seu formato pode ser circular, quadrada ou retangulares, desde que atendam aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 6118 (2014).

Os esforços as quais os pilares estão sujeitos serão transmitidos para a fundação e subsequentemente para o solo. Os momentos geram excentricidade de carga, que a depender da intensidade, podem ocasionar o tombamento da sapata. A carga fornecida é o principal fator para efeitos de cálculo, pois as dimensões finais devem ser suficientes para as suportarem e transmitirem para o solo, sem que o recalque seja significativo, ou que a área não seja suficiente

para evitar o rompimento do solo. Outro fator necessário é o ângulo de inclinação da carga em relação ao eixo de alinhamento da sapata, pois se existir, terá uma ação na horizontal devido a decomposição de carga, o qual deve ser previsto.

4.3.7 Dados do recalque

Para se calcular o recalque pelo método de Schmertmann, é necessário que a sapata já tenha dimensões definidas, para se calcular a profundidade que o bulbo de tensão vai atingir. Definido as dimensões, deve ser inserido o Δz em metros, que representa a profundidade de cada camada e em seguida, o tipo de solo mais o índice de resistência a penetração N_{spt} .

4.4 A planilha.

O primeiro passo foi a criação da planilha eletrônica, a qual vai dimensionar as sapatas de acordo com as recomendações de Vesic para a capacidade de carga. Os dados a serem introduzidos como dados de entrada, podem ser obtidos pelo ensaio geotécnico SPT.

O trabalho ao todo, foi dividido em 8 títulos principais e alguns com subtítulos, facilitando o entendimento do mesmo, e permitindo localizar facilmente algum dado por motivo qualquer, abaixo é demonstrado o sumário do trabalho no Excel.

- **Sumário Planilha Excel**

- 1- Legenda e instruções**

- 2- Dados de entrada**

- 2.1- Dimensões de geometria da sapata

- Dimensões efetivas

- 2.2- Características do solo

- 2.3- Dimensões do pilar

- 2.4- Esforços atuantes na sapata

- Componentes de forças

- 2.5- Excentricidade de carga

- 2.6- Resistência do concreto a compressão e resistência característica do aço ao escoamento na tração

- 3- Fatores**

- 3.1- Fatores de forma

- 3.2- Fatores de carga
- 3.3- Fatores de profundida
- 3.4- Fatores de base do solo
- 3.5- Fatores de inclinação da carga
- 3.6- Fatores de talude

4- Solução

- 4.1- Tensões no solo
- 4.2- Tensões na sapata
- 4.3- Tensão atuante na sapata
- 4.4- Tensão de ruptura e tensão admissível

5- Estimativa de recalque

- 5.1- Fatores de recalque
- 5.2- Cálculo de i_z e z
- 5.3- Recalque total e parcial por camada
- 5.4- Perfil de deformação específica

6- Resultados finais

- 6.1- Base inferior
- 6.2- Profundidade do assentamento
- 6.3- Base superior (cuscuz)
- 6.4- Altura da sapata
- 6.5- Quantitativos
- 6.6- Armadura

7- Considerações

8- Otimizar e salvar pdf

Para facilitar o uso da mesma, foi criado o quadro de legendas, logo nas primeiras linhas, exemplificando quais células que devem ser inseridos os dados de entrada, células cinzas e bordas pontilhadas, e quais células contem fórmulas para cálculo automático, células rosas e bordas pontilhadas, demonstrado na Figura 16.

Figura 16 - Quadro de legenda cores.

Legenda de cores	
Inserir dados	
Formulas automaticas	

Fonte: Autor (2021)

As instruções de como usar a planilha ficaram no primeiro item, junto com a tabela de dados, pois a planilha ficou dividida em itens que abordem o mesmo tema, fazendo com que durante todo o trabalho seja necessário inserir dados. As instruções abordam em quais itens devem ser inseridos e onde eles estão localizados. [**Figura 17**]

Figura 17 - Quadro de instruções.

Instruções
1º Inserir dados, nas células de acordo com o quadro de legenda de cores. (Item 1) 2º Informar se a carga está paralela com a direção b, l ou se faz inclinação em relação a L, e qual o ângulo. (Item 3.5) 3º Inserir o diâmetro das barras. (item 6.6) 4º Verificar se atende as condições de norma. (Item 7) 5º Utilizar o solver para obter dimensões otimizadas. (Item 8)

Fonte: Autor (2021)

As equações do Excel necessitam de dados para serem executadas de acordo com o programado, deste modo foi criado um item onde os dados de entrada estão reunidos para facilitar o uso da planilha.

Os primeiros dados a serem solicitados são sobre geometria da sapata: formato, largura, comprimento, profundidade de assentamento em relação da base inferior até o nível do terreno, inclinação da sapata e inclinação do terreno. Ainda nesta parte calcula-se as dimensões efetivas da sapata, que é a dimensão final menos duas vezes a distância da carga em relação ao centro na direção calculada. [**Figura 18**]

Figura 18 - Dimensões e geometria da sapata.

2.1 Dimensões e geometria da sapata	
Forma da Sapata:	Retangular
Largura (B):	0,60 m
Comprimento (L):	0,95 m
Profundidade (D):	1,00 m
Ângulo de inclinação da sapata (θ):	0°
Ângulo de inclinação do talude sob a sapata (ω):	0°

Fonte: Autor (2021)

Para as características do solo são requisitados os valores de: peso específico, ângulo de atrito, coesão e modo de ruptura, mostrado na Figura 19. Esses valores não vêm de forma explícita nos ensaios SPT, mas podem ser obtidos através de tabelas disponíveis no livro de Terzaghi e Peck (1967), que resulta os valores a partir da descrição do solo e sua consistência/compacidade. As tabelas estão disponíveis em uma aba exclusiva da planilha, nomeado de Auxiliar 2, para consulta e facilitar a inserção de dados.

Figura 19 - Características do solo.

2.2 Características do solo	
Peso específico (γ_s):	18,7 kN/m ³
Ângulo de atrito (ϕ):	33°
Ângulo de atrito ajustado (ϕ'):	23°
Coesão (C):	0 kN/m ²
Modo de ruptura:	Geral
Tg ϕ :	0,62 °

Fonte: Autor (2021)

Os próximos dados a serem inseridos, são referentes as dimensões em planta do pilar no item 2.3. As solicitações de carga e sua inclinação junto com momentos nas direções de x e y, ficaram no item 2.4, sendo que, derivado da inclinação da carga, calcula-se os componentes de forças, mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Esforços atuantes na sapata.

2.4 Esforços atuantes na sapata	
Momento na direção de x:	0,20 kN.m
Momento na direção de y:	0,59 kN.m
Carga (P):	41,78 kN
Ângulo de aplicação (θ):	0°
Componentes de forças	
Componente Vertical	41,78 kN
Componente Horizontal	0,00 kN

Fonte: Autor (2021)

Finalizando as entradas de dados, é inserido os valores de resistência do concreto a compressão, e a resistência característica do aço ao escoamento na tração. Esses dados serão necessários para o cálculo das armaduras e as quantidades em cada direção.

Figura 21 - Resistência do concreto a compressão e resistência característica do aço ao escoamento na tração.

2.6 Resistência do concreto a compressão e resistência característica do aço ao escoamento na tração	
Fck:	25Mpa
Fyk:	CA-50

Fonte: Autor (2021)

Em seguida será abordado os fatores de correção que serão necessários para calcular a capacidade de carga de acordo com Vesic. Sendo 6 fatores para cada parcela da equação, apenas 1 será necessário que seja inserido informação, que é no caso de que ocorra inclinação de carga em qualquer direção, para que seja calculado automático, assim como está nas instruções.

Em ordem, o primeiro fator a ser apresentado na planilha (Figura 22), é referente a forma da sapata, no qual está configurada apenas para sapatas retangulares e quadradas.

Figura 22 - Fatores de forma.

3.1 Fatores de forma	
Sc:	1,42
Sq:	1,40
Sy:	0,74

Fonte: Autor (2021)

Na Tabela 2, é apresentada as equações utilizadas para o cálculo dos fatores de forma de acordo com as recomendações de De Beer (1967), o qual Vesic utiliza para os cálculos da capacidade de carga.

O próximo item, é referente aos fatores de correção de carga, no qual a planilha não calcula automático, pois utiliza a tabela com os valores propostos por Vesic (1975) apud Aoki, Cintra e Albiero (2012), e retorna o valor de acordo com o ângulo de atrito informado no item 2.2 quando o modo de ruptura for Geral, sendo que quando o modo de ruptura for Puncionamento, o ângulo de atrito ajustado é utilizado para os mesmos fins.

O fator de profundidade é calculado de acordo com as equações propostas por Brinch Hansen (1970), quando a relação profundidade sobre largura for menor ou igual a 1, o valor de d_γ será igual a 1, equação 7 é utilizada para calcular o fator d_q , equação 9 para d_c quando o ângulo de atrito for diferente de 0, se não atender esse requisito, utiliza a equação 10. Quando a mesma relação for maior que 1, d_γ se manterá como o valor de 1, d_q com a equação 11, e d_c com a equação 13 para ângulo de atrito maior que 0, se igual, utiliza a equação 14. A planilha calcula o valor de k, que é a relação D/B, apresentados na planilha de acordo com a Figura 23.

Figura 23 - Fatores de profundidade de acordo com Brinch Hansen (1970).

3.3 Fatores de profundidade	
k:	1,03
dc:	1,41
dq:	1,28
dy:	1,00

Fonte: Autor (2021)

Os fatores de inclinação da base do solo são calculados com as equações de Vesic (1970), que foram baseadas nos estudos de Brinch Hansen (1970) e Meyerhof (1953), as mesmas estão descritas nas equações 22, 23 e 24. Na planilha elas são calculadas, e precisam apenas da inclinação da base em relação a sapata. Ainda de acordo com Brinch Hansen (1970), seguindo o mesmo raciocínio dos fatores de inclinação da base, foi demonstrado as equações 25, 26 e 27, para corrigir os termos quando a sapata for aplicada em um terreno inclinado. Na Figura 12 mostra um exemplo dos dois casos, onde a base que a sapata vai ser aplicada tem uma inclinação e o terreno ao lado tem uma inclinação em relação ao nível do solo.

Para casos onde a carga tem uma inclinação, seja ela em relação ao comprimento da sapata, largura, ou outra inclinação conhecida, foi desenvolvido os fatores por Vesic (1970), mostrado nas equações 17, 18 e 21, na qual dependem de um valor simbolizado pela letra m, o

mesmo depende apenas da largura e comprimento, e o ângulo da inclinação em relação ao comprimento, mostrado nas equações 19 e 20. Na planilha, os valores ficaram com a aparência como demonstrado abaixo, sendo que na célula onde está escrito inclinação da carga, está disponível a lista suspensa com as 3 opções disponíveis para o cálculo dos fatores.

Figura 24 - Fatores de inclinação da carga.

3.5 Fatores de inclinação da carga	
Inclinação em relação a L	
ic:	1,00
iq:	1,00
iy:	1,00
m	1,49
Inserir o ângulo em relação a L	15°
SE $\theta \neq 0$; H=>CONDIÇÃO	OK

Fonte: Autor (2021)

O item 4 é subdividido em 4 subitens que abordam os resultados das equações. Sendo o primeiro a tensão no solo, que nada mais é que a tensão gerada por peso próprio, no qual multiplica a profundidade do assentamento da sapata pelo peso específico do solo, seu cálculo é necessário para a equação 28, simbolizado com a letra q.

Os momentos atuantes causam excentricidade de carga, e forma um efeito de torção no qual tende a tombar a sapata, gerando tensões variáveis no solo. Essas tensões geradas tem os seus máximos e mínimos, na planilha são calculados apenas a máxima, que depende da excentricidade da carga, e a direção.

Quando a carga é excêntrica nas duas direções o cálculo a ser feito utiliza a equação abaixo, na qual o equilíbrio é obtido com o diagrama linear das pressões, e o sinal utilizado, depende do valor dos momentos, pois se o momento é negativo, a excentricidade vai para o eixo negativo da direção informada. Para casos em que a excentricidade for nula, ou seja, a aplicação de carga coincide com o centro da sapata, as parcelas que envolvem a excentricidade, será desprezável, restando apenas a força vertical sobre a área.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_v}{A} \pm \frac{M_x * y}{I} \pm \frac{M_y * x}{I} \quad (35)$$

Sendo:

$$A = B . L \quad (36)$$

$$M = F_v \cdot e \quad (37)$$

$$I = (B \cdot L^3)/12 \quad (38)$$

$$Y = L/2 \quad (39)$$

Em casos que a excentricidade ocorre em apenas uma direção, o valor da tensão máxima é obtido pelo princípio básico de resistência dos materiais relacionado à condição geral de carga excêntrica, a expressão é limitada a uma área, onde até o seu limite não deve ocorrer esforços de tração entre o solo e a sapata.

A área é calculada pela expressão da excentricidade ser menor do que um sexto da dimensão da sapata na direção do deslocamento da carga, ou seja $e_x < L/6$, ou $e_y < B/6$ (Figura 25.a)). A tensão máxima é calculada a com a equação 37 para deslocamento em x, e no caso de a direção ser no eixo y, trocar a excentricidade em x para a excentricidade no eixo y.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_v}{a \cdot b} \left(1 \pm \frac{6 \cdot e \cdot x}{a} \right) \quad (40)$$

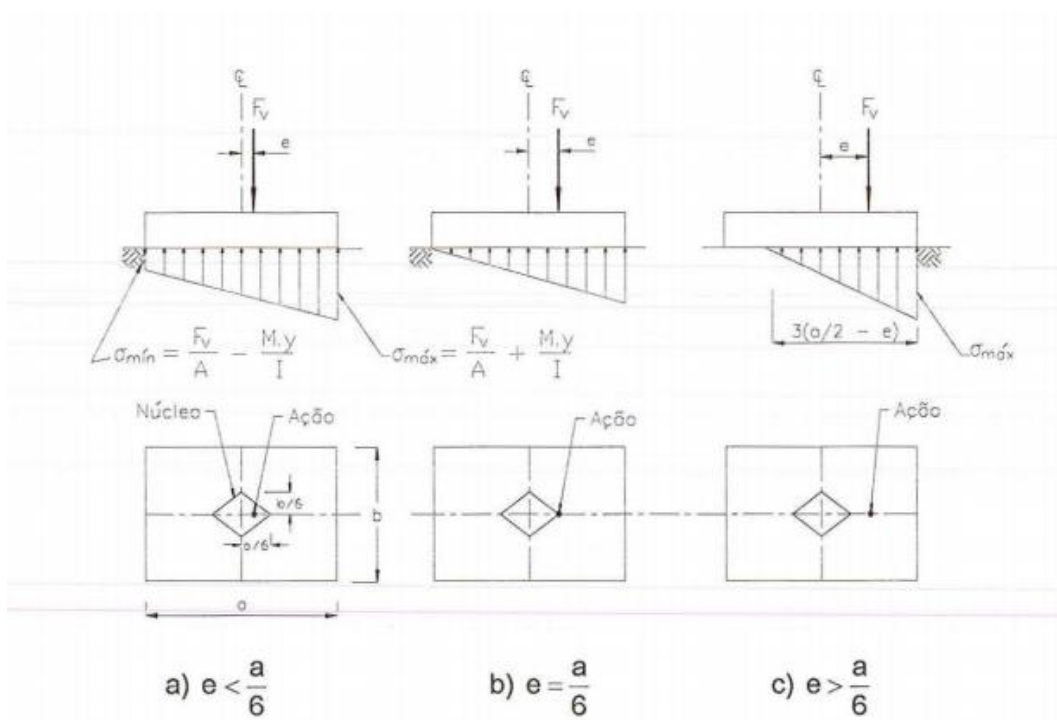
Quando a aplicação da carga coincide com o limite, $e = L/6$, a tensão máxima vai ser duas vezes a razão de força vertical sobre área.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 2 \left(\frac{F_v}{a \cdot b} \right) \quad (41)$$

Quando $e > L/6$, apenas parte da sapata está comprimida (Figura 25.c)), deste modo, o ponto de aplicação de carga deve coincidir com o centro de gravidade do diagrama triangular de pressões, evitando o surgimento de tração entre o solo e a sapata.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{2F_v}{3B \left(\frac{L}{2} - e \right)} \quad (42)$$

Figura 25 - Tensão máxima na excentricidade unidirecional.



Fonte: Silva (1998)

A planilha ainda detalha retorna a área da sapata atual com as dimensões informadas, a área mínima que proporciona segurança, e o resíduo de tensão, resultado da tensão admissível menos a tensão máxima. Finalizando o item 4, é calculado a capacidade de carga, e aplicado o fator de segurança, dividindo por 3, resultando na tensão admissível.

Outro fator calculado, é o recalque, no qual é preciso informar os dados referentes ao SPT, na qual solicita o tipo de solo, o Δz em metros até a camada de profundidade de assentamento, além do N_{SPT} de cada camada feito no ensaio, por fim, é mostrado o recalque total, sendo o recalque máximo de 25mm.

No item 6, é abordado os resultados finais para a sapata, dimensões, profundidade de assentamento, dimensão da base superior, altura da base rígida e altura total, além de alguns quantitativos como volume de escavação, volume de concreto, e as áreas das fôrmas. Por fim é calculado a taxa de armadura para cada direção, e ao informar a bitola é mostrado o número de barras necessárias.

Após finalizar o dimensionamento, deve-se verificar se a sapata atende as considerações de cálculo, se não, deve-se alterar alguma informação solicitada para os cálculos. Essas condições foram reunidas em um conjunto de células, para que sejam mais fáceis de localizar onde está o erro, mostrado na Figura 26. Algumas dessas considerações são apresentadas no

momento da inserção de dados, por exemplo a profundidade de assentamento que deve estar entre 1 e 3 metros, ou a largura mínima que deve ser pelo menos 60 centímetros.

Figura 26 - Considerações de cálculo.

$1 \leq D \leq 3$	VERDADEIRO
$B \geq 0,6$	VERDADEIRO
$L \geq 0,7$	VERDADEIRO
$L/B \leq 2,5$	VERDADEIRO
$(L-L_0) = (B-B_0)$	0
$A_{\min} \leq A_{\text{atual}}$	VERDADEIRO
$\sigma_{\text{atuante}} \leq \sigma_{\text{adm}}$	VERDADEIRO

Fonte: Autor (2021)

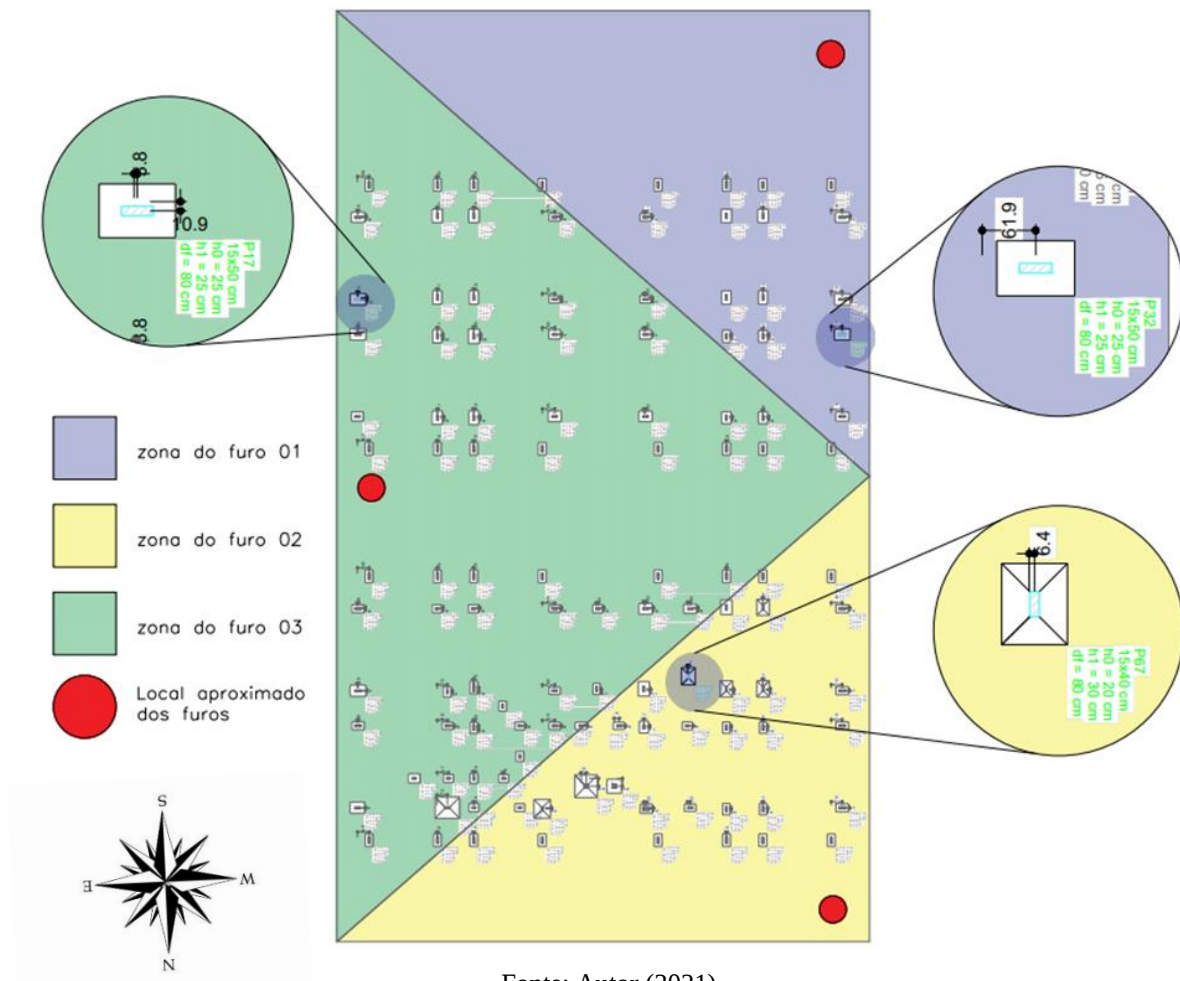
Finalizando o trabalho, foi criado dois botões no qual o primeiro utiliza os dados inseridos, e roda a ferramenta do Excel, chamada de solver, para encontrar as menores dimensões possíveis, de modo que seja atendida todas as condições de cálculo. O segundo botão, imprime uma página em PDF, com todas as informações úteis da sapata, mostrado no APÊNDICE A- Informações úteis da sapata S32 (01).

4.5 Execução da planilha

Para este trabalho foi estudado 3 sapatas que foram construídas na fundação de uma creche localizada em Assú, interior do Rio Grande do Norte, as mesmas foram escolhidas aleatoriamente com o objetivo de comparar resultados com métodos semiempíricos, atestando os resultados encontrados com a metodologia de cálculo recomendada por Vesic.

A área disponível para a construção, é aproximadamente 2 800 m², foram executados 3 furos de sondagem, com a localização do furo 02 mais ao Norte, furo 01 mais pro Sul e o furo 03 intermediário, sendo que os 01 e 02 ficaram em um mesmo alinhamento próximos da borda lateral, e o 03, próximo da borda oposta. A Figura 27 mostra o mapa da área onde as sapatas que serão estudadas estão em destaque, assim como a zona limite para cada furo. A sapata na zona sul, vai ser analisado com os dados da sondagem no furo 01, o mesmo raciocínio segue para as outras.

Figura 27 - Mapa das sapatas, e zona das sondagens



Fonte: Autor (2021)

A Tabela 6, reúne os dados de projeto referente as sapatas estudadas, com distinção na altura de assentamento, porque a condição de que para ser classificadas como sapatas superficial, deve-se ter a profundidade de até duas vezes a menor dimensão, ou até 3 metros. A planilha aceita valores entre 1 e 3 metros, porém no projeto a profundidade utilizada é de 80 cm.

Tabela 6 - Sapatas de projeto com profundidade alterada.

Sapata	Dimensão do pilar (m)	Dimensão da sapata (m)	Profundidade de assentamento (m)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	F (kN)
S17	0,15 x 0,50	0,85 x 1,20	1,00	7,55	5,20	85,81
S67	0,15 x 0,50	0,85 x 1,20	1,00	7,26	5,20	85,61
S32	0,15 x 0,40	1,05 x 1,30	1,00	0,39	9,90	122,68

Fonte: Autor (2021)

Em seguida, foi utilizado a Tabela 5 para determinar o peso específico (γ_s), em razão do Nspt e a profundidade. A Tabela 7, reúne os dados de sondagens, em cada metro de profundidade, o Nspt e peso específico.

Tabela 7 - Peso específico em função do Nspt e profundidade.

	SPT 01		SPT 02		SPT 03	
Profundidade	Nspt	γ_s (kN/m ³)	Nspt	γ_s (kN/m ³)	Nspt	γ_s (kN/m ³)
1	12	17	17	17	19	18
2	20	18	16	17	26	18
3	24	18	27	18	19	18
4	36	18	30	18	30	18
5	30	18	33	18	41	18
6	27	18	27	18	38	18
7	27	18	31	18	44	18
8	32	18	36	18	46	18
9	35	18	45	18		
10	40	18				
11	42	18				
12	39	18				
13	45	18				

Fonte: Autor (2021)

O ângulo de atrito interno será definido da maneira que foi explicada no item 4.3.3. A tabela 8, reuniu dados do índice de resistência a penetração em função da profundidade, e o ângulo de atrito definido para camada correspondente.

Tabela 8 - Ângulo de atrito interno em função do Nspt e profundidade.

	SPT 01		SPT 02		SPT 03	
Profundidade	Nspt	ϕ	Nspt	ϕ	Nspt	ϕ
1	12	32,80°	17	34,80°	19	35,60°
2	20	36,00°	16	34,40°	26	38,40°
3	24	37,60°	27	38,80°	19	35,60°
4	36	42,40°	30	40,00°	30	40,00°

5	30	40,00°	33	41,20°	41	44,40°
6	27	38,80°	27	38,80°	38	43,20°
7	27	38,80°	31	40,40°	44	45,60°
8	32	40,80°	36	42,40°	46	46,40°
9	35	42,00°	45	46,00°		
10	40	44,00°				
11	42	44,80°				
12	39	43,60°				
13	45	46,00°				

Fonte: Autor (2021)

A resistência característica do concreto a compressão será padrão em todos os casos, 25 MPa, para não causar discrepância entre os resultados obtidos, pois se distintos, pode ser fator causador de diferença nos resultados.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Determinação do bulbo de tensões

Com os dados do solo, disponíveis no ensaio de sondagem, é realizado o cálculo do alcance do bulbo de tensão, utilizando os valores de largura da sapata na Tabela 6. Abaixo, estão os resultados obtidos.

Tabela 9 - Cálculo dos bulbos de tensão.

Furo da sondagem	Profundidade do bulbo (m)
01 (S32)	1,70
02 (S67)	1,70
03 (S17)	2,10

Fonte: Autor (2021)

5.2 Determinação dos parâmetros do solo

Com os valores conhecidos do bulbo de tensão, foi calculado o N_{spt} médio no bulbo de tensão, permitindo encontrar os valores para ângulo de atrito interno e peso específico do solo. A areia no momento da sondagem, se encontrava no estado seco. As 3 sapatas se situaram em solo arenoso com compacidade mediantemente compacta a compacta, porém o N_{spt} médio se encontra entre 19 e 40 golpes, deste modo o peso específico para os 3 casos serão iguais, definidos predominantes pelo índice de resistência a penetração, pois pela Tabela 5, solos mediantemente compactos tem o número de golpes variando de 9 até 18.

Tabela 10 - Determinação do peso específico.

Furo da sondagem	N_{spt} (médio do bulbo de tensão)	Compacidade da areia	Peso específico (kN/m ³)
01 (S32)	22	Compacta	18
02 (S67)	21,5	Mediantemente Compacta	18
03 (S17)	22,5	Mediantemente Compacta	18

Fonte: Autor (2021)

Na Tabela 11, são apresentados os valores do ângulo de atrito interno, calculados utilizando a equação 33 e o N_{spt} médio do bulbo de tensão fornecidos na Tabela 10.

Tabela 11 - Ângulo de atrito interno em cada furo da sondagem.

Furo da sondagem	Ângulo de atrito interno (ϕ)
01 (S32)	36,8
02 (S67)	36,6
03 (S17)	37

Fonte: Autor (2021)

5.3 Capacidade de carga do sistema solo-sapata

A capacidade de carga foi definida com o modo de ruptura geral, pois, segundo o perfil do solo, a região é formada predominante por areias mediantemente compactas a compactas. Cintra, Aoki e Albiero (2012), cita que a ruptura geral ocorre nos solos mais rígidos. O N_{spt} médios dos bulbos de tensão, apresenta valores superiores a 18, indicando a boa resistência do solo local.

Tabela 12 - Tensão de ruptura Geral e Puncionamento.

Furo da sondagem	Capacidade de carga
01 (S32)	1436,79 kN/m ²
02 (S67)	1582,59 kN/m ²
03 (S17)	1811,55 kN/m ²

Fonte: Autor (2021)

5.4 Determinação da Tensão admissível

Teixeira (1996) apud Cintra, Aoki e Albiero (2012), desenvolveu a Equação 43, que ficou conhecida no Brasil como o principal método para definição de tensão admissível considerando o índice de resistência a penetração mais a parcela de sobrecarga (q), que pode ou não ser considerada.

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{spt}}{50} + q \quad (43)$$

Teixeira ainda desenvolveu uma correlação, partindo da equação da capacidade de carga de Terzaghi, para definir a tensão admissível do solo, quando assentado em areia, demonstrado na equação 44.

$$\sigma_{adm} = 0,05 + (1 + 0,4B) \frac{N_{spt}}{100} \quad (44)$$

Mello (1975) apud Cintra, Aoki e Albiero (2012), também apresentou uma correlação para definição de tensão admissível, exibido na equação 45.

$$\sigma_{adm} = 0,1 * (\sqrt{N_{spt}} - 1) \quad (45)$$

A Tabela 13, apresenta a tensão admissível obtida por Vesic, assim como as tensões admissíveis pelos métodos semiempíricos de Teixeira (1996) e Mello (1975).

Tabela 13 – Valores de Tensão admissível para os diferentes métodos.

Furo da sondagem	Vesic - Geral	Teixeira (1996)	Teixeira	Mello (1975)
01 (S32)	478,93 kN/m ²	440 kN/m ²	344,80 kN/m ²	369,04 kN/m ²
02 (S67)	527,53 kN/m ²	430 kN/m ²	338,10 kN/m ²	363,68 kN/m ²
03 (S17)	603,85 kN/m ²	450 kN/m ²	369,50 kN/m ²	374,34 kN/m ²

Fonte: Autor (2021)

5.5 Dimensões finais das sapatas

Na Tabela 14, são apresentadas as dimensões de projeto das sapatas, as dimensões determinadas com o auxílio da planilha, utilizando a teoria de Vesic para a ruptura geral e, por fim, as dimensões determinadas através da média das tensões admissíveis obtidas pelos métodos semiempíricos.

Tabela 14 - Dimensões em planta das sapatas.

Furo da sondagem	Projeto (m)	Vesic (m)	Semiempírico (m)
01 (S32)	0,85 x 1,20	0,70 x 1,05	0,75 x 1,10
02 (S67)	1,05 x 1,30	0,60 x 0,85	0,70 x 0,95
03 (S17)	0,85 x 1,20	0,65 x 1,00	0,75 x 1,10

Fonte: Autor (2021)

5.6 Determinação das alturas

Na próxima tabela, é reunido os dados tocantes das alturas da base rígida, assim como a altura total, para as três situações estudadas na Tabela 14.

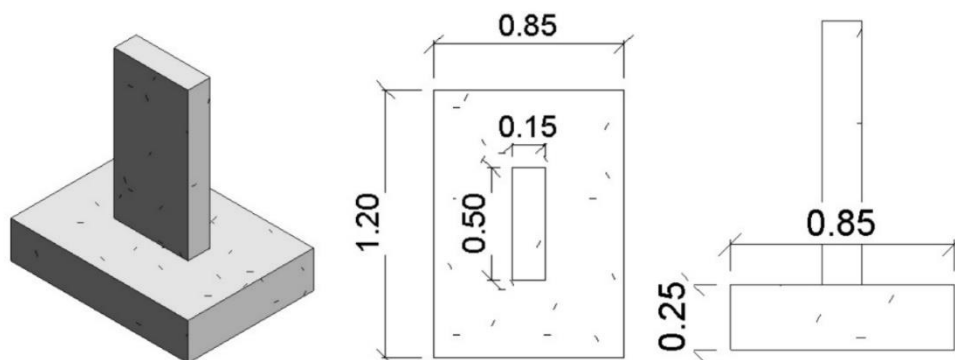
Tabela 15 – Alturas das sapatas.

Furo da sondagem	Alturas	Projeto (m)	Vesic (m)	Semiempírico (m)
01 (S32)	Base rígida (h_0)	0,25	0,15	0,15
	Altura Total (H)	0,25	0,25	0,25
02 (S67)	Base rígida (h_0)	0,20	0,15	0,15
	Altura Total (H)	0,30	0,20	0,25
03 (S17)	Base rígida (h_0)	0,25	0,15	0,15
	Altura Total (H)	0,25	0,25	0,25

Fonte: Autor (2021)

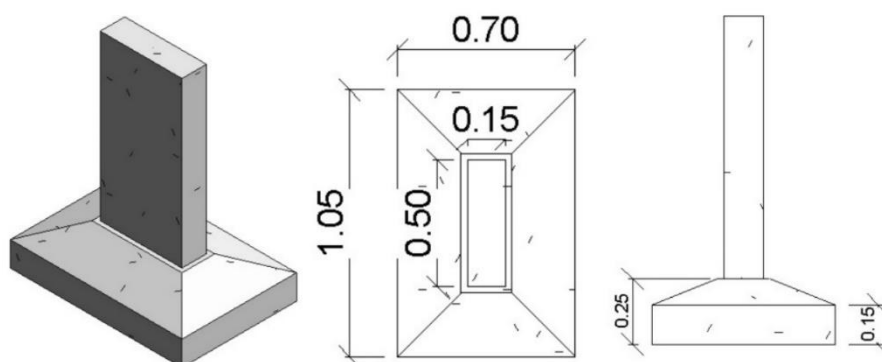
As sapatas S32 e S17 do projeto, tem sua altura total, da mesma altura que base, desde modo assume uma aparência de bloco (Figura 28). As dimensionada na planilha pelo modo de ruptura geral, tem geometria de sapata cônica, mostrado na Figura 29, o mesmo serve para as semiempíricas.

Figura 28 - Dimensões da S32 pelo projeto.



Fonte: Autor (2021)

Figura 29 - Dimensões da S32, planilha no modo de ruptura geral.



Fonte: Autor (2021)

5.7 Volume de concreto

Na Tabela 16, é apresentado o volume de concreto necessário para a fabricação de cada sapata. Os elementos dimensionados pelo modo teórico de Vesic, exibido na coluna 3, em geral, utiliza 50% menos concreto que as sapatas apresentadas no projeto, o semelhante acontece para as que foram dimensionadas por meios semiempíricos, pois, na comparação tiveram 46,74% menos concreto que as do projeto.

Tabela 16 - Volume de concreto das sapatas.

Furo da sondagem	Projeto (m³)	Geral (m³)	Semiempírico (m³)
01 (S32)	0,255	0,148	0,162
02 (S67)	0,333	0,090	0,133
03 (S17)	0,255	0,132	0,162

Fonte: Autor (2021)

5.8 Recalques

Analisando os recalques, observa-se que os recalques imediatos são mínimos, pois o maior recalque atinge a marca de 4 mm, sendo que o limite aceitável é de 25 mm. A planilha não considerou o acréscimo do recalque ao longo do tempo. [**Tabela 17**]

Tabela 17 - Recalques diferencias.

Furo da sondagem	Geral (mm)	Semiempírico (mm)
01 (S32)	4,03	3,64
02 (S67)	0,20	2,54
03 (S17)	1,11	2,45

Fonte: Autor (2021)

6 CONCLUSÕES

A planilha desenvolvida se mostrou prática para o uso no dimensionamento de capacidade de carga e estimativa de recalque imediato em sapatas isoladas. A tensão admissível encontrada pelo método de Vesic foram aproximadamente 30% superiores aos resultados obtidos pelos métodos semiempíricos. Consequentemente, houveram diferenças na geometria final da sapata de acordo com o modelo utilizado. Dessa maneira, as sapatas calculadas pelos modelos semiempíricos apresentaram maiores dimensões em comparação com as sapatas projetadas pelo modelo de Vesic.

As sapatas da obra não foram projetadas utilizando os resultados da sondagem SPT e isso pode ocasionar um superdimensionamento ou subdimensionamento da fundação. Através do método sugerido por Vesic, mostrou-se que as dimensões das sapatas definidas no projeto são suficientes para garantir estabilidade ao sistema solo-fundação, podendo inclusive reduzir as suas dimensões e continuar atendendo os fatores de segurança mínimos exigidos. O recalque imediato encontrado, variou de 0,20 mm a 4 mm, ou seja, bem abaixo do recalque máximo admissível de 25 mm.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Ana Luiza Salgueiro de. **Capacidade de carga de fundação superficial de tanque de armazenamento de grande diâmetro**. Orientador: Alessandra Conde de Freitas. 2015. 106 p. Monografia (ENGENHARIA CIVIL) - Universidade Federal do rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2015.
- ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas. **Projeto estrutural de sapatas**. 2007. 39 p. Artigo (Departamento de Estruturas e Construção Civil) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, Santa Maria/RS, 2007.
- ANAIS DO 59º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., 2017, Bento Gonçalves-RS. **Dimensionamento de Sapatas Isoladas Rígidas Submetidas a Compressão Simples através de Processo Iterativo** [...]. [S. l.]: IBRACON, 2017. 16 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348399510_Dimensionamento_de_Sapatas_Isoladas_Rigidas_Submetidas_a_Compressao_Simples_atraves_de_Processo_Iterativo. Acesso em: 11 maio 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro, 2019.
- BASTOS, Saulo Sérgio dos Santos. **Sapatas de fundação**. 2019. 120 p. Apostila (Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, Bauru/SP, 2019.
- BRINCH HANSEN, J., 1961, “**A General Formula for Bearing Capacity**”, Boletim Número 11, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, pp. 38-46.
- BRINCH HANSEN, J., 1970, “**A Revised and Extend Formula for Bearing Capacity**”, Boletim Número 28, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, pp. 5-11.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. V.1. 6ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1988.
- CARVALHO, Felipe Rodolfo da Cunha; FERNANDES, Rogério Taygra Vasconcelos. **Elaboração da base de dados geográficos de Assú-RN com o uso de geotecnologias livre**. Angicos/RN, p. 01-19, jul. 2020.
- CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson; ALBIERO, José Henrique. **Fundações Diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2012.
- COSTA, Maria Leticia Oliveira da; PAZ, Anna Maria Laysla Azevedo da. **Execução de fundações do tipo rasa com foco em sapata e suas variações. Projeto e execução de fundações**, Fortaleza/CE, 2018.
- DE BEER, E. E., 1967, “**Proefondervindelijke bijdrage tot de studie van het gransdraagvermogen van zand onder funderingen op staal**”, Annales des Travaux Publics

de Belgique, Belgique, 68, No 6, pp. 481-506; 69, No 1, pp. 41-88; No 4, pp. 321-360; No 5, pp. 395-442; No 6, pp. 495-522.

FERREIRA, Rafael Alexandre. **Estudo comparativo de técnica e de custo entre fundações rasas: Estudo de caso entre radier e sapata isolada**. Orientador: Mestre Armando Belato Pereira. 2017. 117 p. Monografia (ENGENHARIA CIVIL) - Centro Universitário Do Sul De Minas - UNIS/MG, Varginha/MG, 2017.

LIMA, André da Costa. SILVA, Jordana Martins. COSTA, Liézio Reston. TANNUS, Liézio Reston. **Análise comparativa de fundação tipo sapata e bloco de estacas em um mesmo projeto de um terminal rodoviário para a cidade de itaperuna-rj**. Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico, volume 3, P. (245 a 255), dezembro, 2017.

MEYERHOF, G. G., 1953, “**The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads**”. In: Proceedings of Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Switzerland, pp. 440-445.

REBELLO, Yopanan. C. P. **Fundações: Guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. 4. Ed. São Paulo: Editora ZIGURATE, 2008.

SILVA, Edja Laurindo da. **Análise dos modelos estruturais para determinação dos esforços resistentes em sapatas isoladas**. Orientador: José Samuel Giongo. 1998. 125 p. Dissertação (Mestre em Engenharias de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo/SP, 1998. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-16032018-162543/>. Acesso em: 11 maio 2021.

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

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

VELLOSO, Dirceu Alencar; LOPES, Francisco de Rezende Waldemar. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

VESIC, A. S., 1970, “**Tests on instrumented piles**”. In: Journal of Soil Mechanics & Foundations, Duke University, Durham.

VESIC, A. S., 1975, “**Bearing capacity of shallow foundations**”. In: Foundation Engineering Handbook, New York, McGraw-Hill, pp.121-147.

APÊNDICE A – INFORMAÇÕES ÚTEIS DA SAPATA S32 (01)

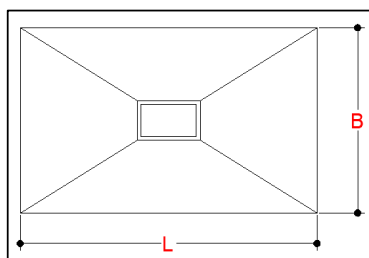


UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DIMENSÕES DA SAPATA

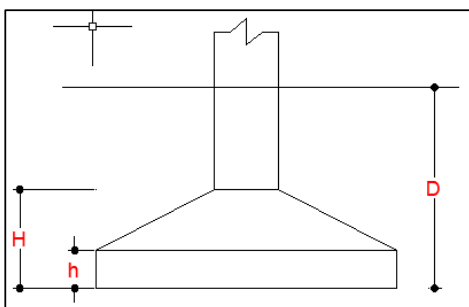
Base inferior

Largura :	0,70 m
Comprimento :	1,00 m



Alturas

Profundidade (D):	1,00 m
Altura total (H):	0,25 m
Altura da base rígida (h):	0,15 m

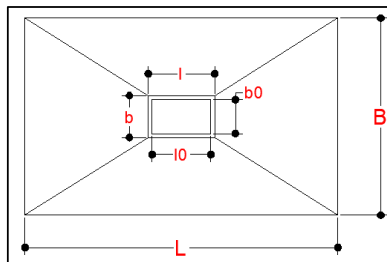


3 barras de $\Phi 6,3$ mm Na direção de B

3 barras de $\Phi 6,3$ mm Na direção de L

Base superior (cuzcuz)

Largura (b):	0,20 m
Comprimento (l):	0,55 m

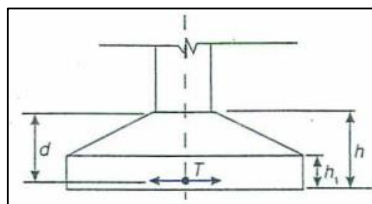


Quantitativos

Volume de escavação:	1,00 m ³
Volume de concreto:	0,90 m ³
Área de formas:	3,30 m ²

Armadura

Profundidade da armadura (d):	0,20 m
Armadura na direção de B (A_{sb}):	0,9 cm ²
Armadura na direção de L (A_{sl}):	0,9 cm ²



CONSIDERAÇÕES

$1 \leq D \leq 3$	VERDADEIRO
$B \geq 0,6$	VERDADEIRO
$L \geq 0,7$	VERDADEIRO
$L/B \leq 2,5$	VERDADEIRO
$(L - L_0) = (B - B_0)$	0
$A_{min} \leq A_{atual}$	VERDADEIRO
$\sigma_{atuante} \leq \sigma_{adm}$	VERDADEIRO

Atende todas as condições