



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

ANTONIO AIRTON DE MELO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA ELETRÔNICA VOLTADO AO AUXÍLIO
DE PROJETOS ESTRUTURAIS E GEOTÉCNICOS DE ELEMENTOS DE
FUNDAÇÃO DO TIPO SAPATAS**

MOSSORÓ

2018

ANTONIO AIRTON DE MELO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA ELETRÔNICA VOLTADO AO AUXÍLIO
DE PROJETOS ESTRUTURAIS E GEOTÉCNICOS DE ELEMENTOS DE
FUNDAÇÃO DO TIPO SAPATAS**

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

Orientador : Prof. Dr. John Eloi Bezerra.

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.

M528d MELO, ANTONIO AIRTON DE.
DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA ELETRÔNICA
VOLTADO AO AUXÍLIO DE PROJETOS ESTRUTURAIS E
GEOTÉCNICOS DE ELEMENTOS DE FUNDAÇÃO DO TIPO
SAPATAS / ANTONIO AIRTON DE MELO. - 2018.
40 f. : il.

Orientador: JOHN ELOI BEZERRA.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2018.

1. FUNDAÇÃO. 2. SAPATAS. 3. EXCEL. I. BEZERRA,
JOHN ELOI, orient. II. Título.

ANTONIO AIRTON DE MELO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANILHA ELETRÔNICA VOLTADO AO AUXÍLIO
DE PROJETOS ESTRUTURAIS E GEOTÉCNICOS DE ELEMENTOS DE
FUNDAÇÃO DO TIPO SAPATAS**

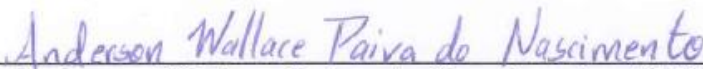
Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Defendida em: 17 / 09 / 2018.

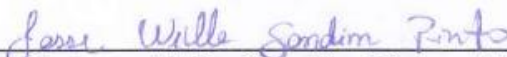
BANCA EXAMINADORA



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



Prof. Anderson Wallace Paiva do Nascimento - (UFERSA)
Membro Examinador



Prof. Jesse Wille Gondim Pinto - (UFERSA)
Membro Examinador

Dedico esse trabalho a minha irmã Ivoneide e minha avó Francisca, (In Memoriam), ambas tiveram grande influência e participação na minha formação, principalmente pessoal, sempre me apoiaram e sei que estariam muito felizes pela realização desse sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força, coragem e saúde para seguir em frente nessa caminhada, apesar de todas dificuldades surgidas.

Agradeço a meus pais Francisco Rosa e Maria Sônia e a meus irmãos, por todo carinho, conselhos, incentivos e apoio nas horas que mais precisei, obrigado por apesar de tantas dificuldades, terem investido e acreditado em mim, por não terem medido esforços para que essa etapa da minha vida fosse concluída, obrigado por permitirem e auxiliarem na realização do sonho no qual vocês não tiveram oportunidade de realizar, a presença de vocês significou e significa bastante para mim. Essa vitória também é de vocês.

Agradeço a minha namorada Graziely, que de uma maneira especial me auxiliou bastante, obrigado pelo carinho, pelo incentivo, pela paciência e compreensão nas muitas vezes que não pude ser atencioso por razões acadêmicas, e principalmente, obrigado pela sua maneira de me acalmar, mesmo diante da rotina pesada do semestre, com você tudo se tornou mais fácil, sou e serei eternamente grato.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial, aos meus amigos da casa 11, obrigado pelas risadas e pela convivência, foram 5 anos de muito proveito para mim. Também aos meus amigos de IFCE, Henrique, Djane, Marlos, Átilla, João Lucas e Gill Eannes.

Agradeço a todos os professores que me acompanharam durante toda minha fase acadêmica, seus ensinamentos foram essenciais para minha formação profissional e pessoal.

Agradeço a meu Orientador, John Eloi Bezerra, por ter aceitado me orientar, pela paciência e auxílio na conclusão desse trabalho.

“A mente que se abre a uma nova
ideia, jamais voltará ao seu tamanho
original”.

Albert Einstein.

RESUMO

Os elementos de fundação são ligados a integridade e estabilidade das edificações, o que se faz necessário um correto dimensionamento dos mesmos. Além disso, no quesito fundações rasas, as sapatas são soluções bastante utilizadas e que apresentam resultados satisfatórios. Diante da grande importância e utilização desses elementos, o presente trabalho buscou uma maneira de auxiliar a elaboração de projetos de tais elementos de uma maneira que proporcione precisão e ganho de tempo. Embora exista *softwares* que façam tal tarefa, o desenvolvimento de uma planilha em ambiente Excel traria uma ferramenta com uma linguagem mais familiar e acessível.

Palavras-chave: Fundação. Sapatas. Excel

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Fatores de forma.	24
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fundação superficial.	13
Figura 2: Fundação profunda.	14
Figura 3: Sapata Isolada.	15
Figura 4: Sapata Corrida.	16
Figura 5: Sapata Associada.	16
Figura 6: Sapata com viga alavanca.	17
Figura 7: Dimensões típicas da sapata.	18
Figura 8: Detalhes construtivos de uma sapata.	19
Figura 9: Fator de influência I_p	21
Figura 10: Modos de ruptura.	22
Figura 11: Caminhamento da carga do pilar em direção a base da sapata.	26
Figura 12: Esquema de forças segundo o método das bielas.	26
Figura 13: Armaduras de flexão da sapata.	28
Figura 14: Informações geométricas da sapata.	29
Figura 15: Informações geométricas do pilar.	30
Figura 16: Informações sobre carregamento.	30
Figura 17: Informações do solo.	31
Figura 18: Modo de ruptura.	31
Figura 19: Outras informações.	31
Figura 20: Fatores de capacidade de carga.	32
Figura 21: Fatores de forma.	32
Figura 22: Carga atuante na base da sapata.	32
Figura 23: Tensão de ruptura.	33
Figura 24: Tensão admissível.	33
Figura 25: Tensão atuante na sapata.	33
Figura 26: Geometria calculada.	33
Figura 27: Tensões nos cantos da sapata.	34
Figura 28: Área de aço.	34
Figura 29: Volume de concreto.	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo geral.....	12
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 FUNDAÇÕES: CONCEITOS GERAIS.....	13
2.2 SAPATAS	15
2.2.1 Sapatas isoladas.....	15
2.2.2 Sapata Corrida	15
2.2.3 Sapata associada.....	16
2.2.4 Sapata com viga alavanca	17
2.3 RIGIDEZ DA SAPATA.....	17
2.4 DETALHES CONSTRUTIVOS.....	18
2.5 RECALQUE	19
2.5.1 Recalque imediato	20
2.6 DIMENSIONAMENTO	21
2.6.1 Capacidade de carga.....	21
2.6.2 Modos de ruptura.....	21
2.6.3 Teoria de Terzaghi	22
2.7 TENSÃO ADMISSÍVEL.....	25
2.8 MÉTODO DAS BIELAS E ARMADURA DE FLEXÃO.....	25
3. DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DA PLANILHA	29
3.1 DADOS DE ENTRADA.....	29
3.2 ROTINA DE CÁLCULO.....	32
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
REFERÊNCIAS.....	38
APÊNDICE A	40

1. INTRODUÇÃO

No que diz respeito ao conjunto estrutural de uma edificação, pode-se dizer que as fundações desempenham as funções mais importantes. Tais elementos são responsáveis pela transmissão das solicitações provenientes de toda a estrutura, ao solo, de uma maneira a garantir a estabilidade e integridade da edificação.

Segundo a Norma Brasileira 6122:2010, em função da profundidade da cota de apoio e da forma como as cargas são transmitidas ao solo, as fundações podem ser classificadas em rasas ou profundas. Sendo as rasas também conhecidas como superficiais ou diretas, tais fundações transmitem as cargas ao terreno a partir de sua base e estão assentadas a uma profundidade inferior a duas vezes a sua menor dimensão.

De acordo com Bastos (2016), 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. Cada uma apresentando peculiaridades quanto ao seu uso e dimensionamento.

Por fazer parte da estrutura, o projeto de sapatas deve englobar além das considerações estruturais, como no caso de vigas e pilares, também considerações geotécnicas, o que nos mostra que tais elementos merecem uma atenção especial, afinal como já dizia Velloso e Lopes (2010), não é errôneo dizer que dentro da engenharia civil, a especialização em fundações é a que requer maior vivência e experiência.

Tendo em vista a importância que tal elemento de fundação, buscou-se a partir desse trabalho, desenvolver uma ferramenta que auxiliasse na elaboração de projetos referentes ao mesmo, de uma maneira prática e rápida e que viesse a otimizar o tempo de quem a utilizasse.

O *software* Excel se mostrou o ambiente ideal para o desenvolvimento da ferramenta, visto que se trata de um programa muito poderoso na área de aplicações numéricas e que apresenta recursos em uma linguagem acessível e de certo modo intuitiva quando comparado a outros

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver aplicações numéricas em planilhas eletrônicas, do tipo Excel, capazes de realizar o dimensionamento de elementos de fundações do tipo sapatas.

1.1.2 Objetivos específicos

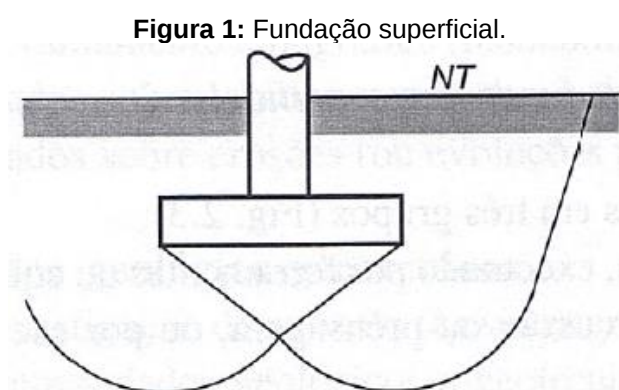
- Realizar um levantamento bibliográfico acerca do dimensionamento de fundações do tipo sapatas.
- Programar uma planilha otimizada e de fácil utilização que possa ser usada por estudantes ou profissionais da engenharia.
- Desenvolver um estudo voltado a lógica de programação do Excel

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FUNDAÇÕES: CONCEITOS GERAIS

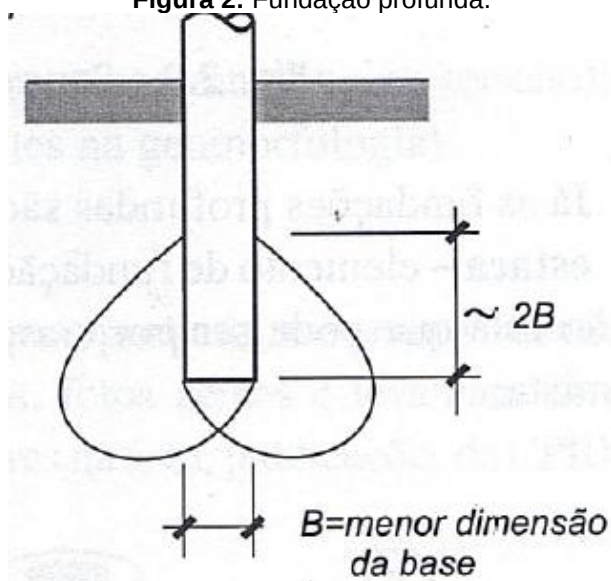
Segundo Bastos (2016), subestrutura ou fundação é a parte da estrutura composta por elementos estruturais que se encontram construídos abaixo do nível final do terreno. Tais elementos são responsáveis por transmitir ao solo as ações atuantes em toda a estrutura.

De acordo com Velloso e Lopes (2010), as fundações podem ser convencionalmente divididas em dois grupos, fundações superficiais e fundações profundas. Podendo ser distinguidas segundo o critério de que uma fundação profunda é aquela cujo mecanismo de ruptura de base não surtisse na superfície do terreno. As Figuras 01 e 02 ilustram tais fatos.



Fonte: Velloso e Lopes (2010).

Figura 2: Fundação profunda.



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Já a NBR 6122:2010 as diferencia da seguinte maneira:

- Fundação superficial: também conhecida como rasa ou direta, são os elementos de fundação que transmitem a carga ao terreno pelas pressões distribuídas sobre sua base. Além disso, a profundidade da cota de apoio é inferior a duas vezes a menor dimensão. Aqui estão inclusas as sapatas, blocos e radier.
- Fundação profunda: ou indireta, são as que transmitem a carga ao terreno pela base, superfície lateral ou por uma combinação das duas. A profundidade da cota de apoio é superior ao dobro de sua menor dimensão e no mínimo 3 metros. Nesse tipo de fundação, estão inclusas as estacas e os tubulões.

Para Sena (2016), por questões de economia, a fundação rasa deve ser sempre a primeira solução a ser adotada, entretanto em obras de grande porte ou com subsolos que apresentam pouca resistência esta será dificilmente utilizada.

O foco do trabalho será esse tipo de fundações, mais necessariamente a solução por sapata, visto que dentro das fundações rasas é uma das soluções mais adotadas.

2.2 SAPATAS

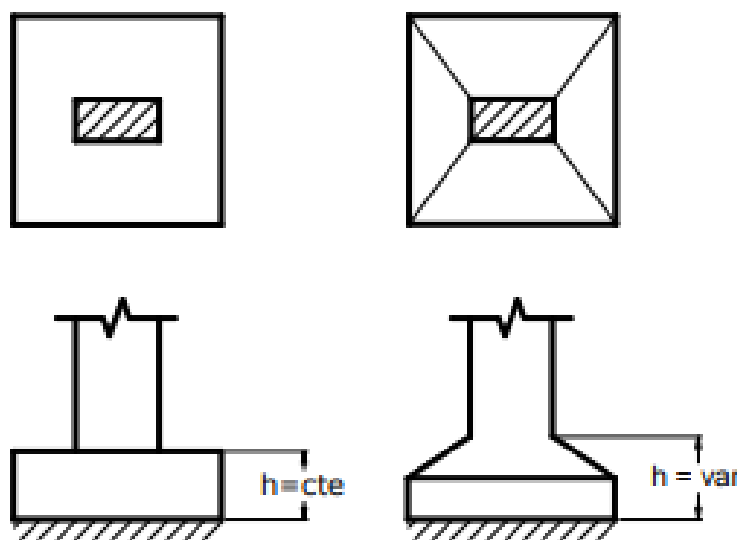
Segundo a NBR 6122:2010, as sapatas são elementos de fundação superficial de concreto armado, dimensionado de modo que as tensões de tração produzidas no mesmo sejam resistidas pelo emprego da armadura, ao invés do concreto.

Devido a grande variabilidade nas características do solo, bem como no formato dos elementos que nela se apoiam, existem diversos tipos de sapatas, a isolada, associada, corrida, de divisa.

2.2.1 Sapatas isoladas

Para Alva (2007), são os tipos de sapatas mais empregados, estas transmitem as ações de um único pilar centrado, podendo apresentar bases quadradas, retangulares ou circulares, e sua altura pode ser constante ou variar linearmente entre as faces do pilar e a extremidade da base. A Figura 03 ilustra o que foi descrito.

Figura 3: Sapata Isolada.



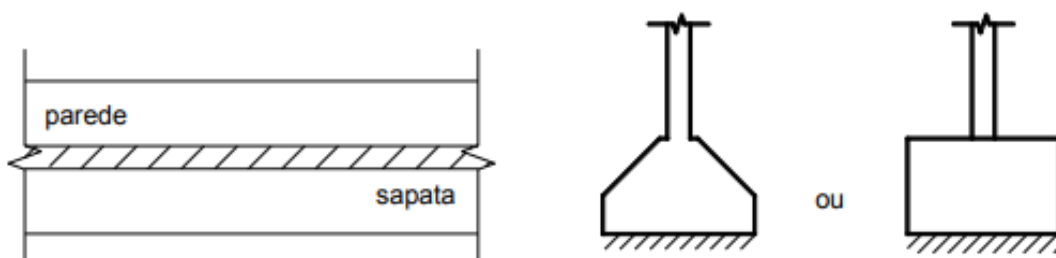
Fonte: Bastos (2016).

2.2.2 Sapata Corrida

Conforme Lima (2015), esse tipo de sapata fica submetida a ações de maneira linear, sendo comumente usada na construção de muros e paredes. O

dimensionamento desse tipo de sapata é feito de maneira idêntica ao de uma laje armada em uma direção. A Figura 04 mostra tal sapata.

Figura 4: Sapata Corrida.

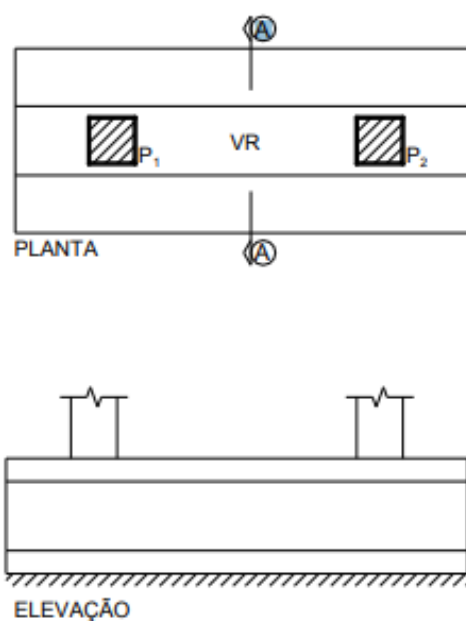


Fonte: Bastos (2016).

2.2.3 Sapata associada

Esse tipo de sapata também é conhecida como sapata conjunta ou combinada, a mesma é usada para situações onde emprega-se mais de um pilar. Geralmente ocorre quando, devido a proximidade entre os pilares, há sobreposição caso seja prevista uma sapata isolada para cada pilar (LIMA, 2015). A Figura 05 representa tal sapata.

Figura 5: Sapata Associada.

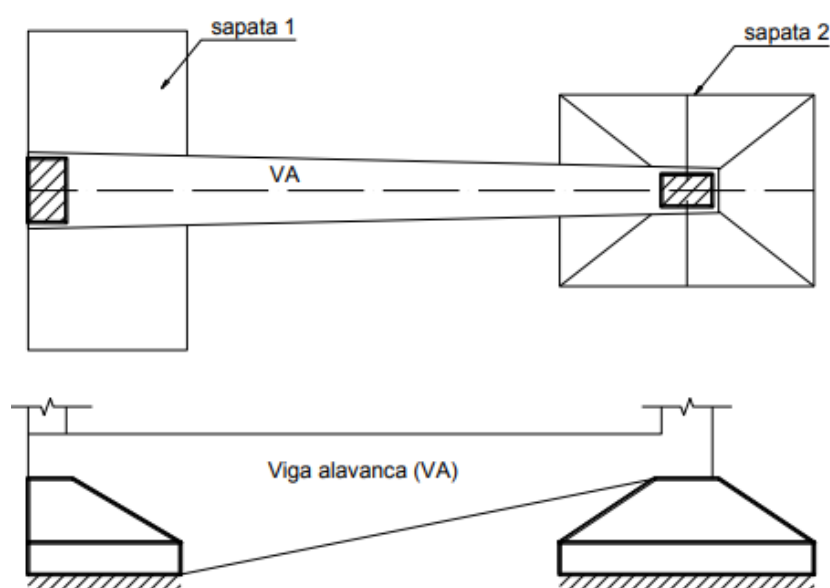


Fonte: Bastos (2016).

2.2.4 Sapata com viga alavanca

De acordo Lima (2015), também conhecida como sapata com viga de equilíbrio (Figura 06), seu uso se destina a pilares de divisa, tem a função de transmitir a carga vertical do pilar para o centro de gravidade da sapata de divisa, ou ainda, resistir a momento fletores oriundos das excentricidades da carga do pilar em relação ao centro da sapata.

Figura 6: Sapata com viga alavanca.



Fonte: Bastos (2016).

2.3 RIGIDEZ DA SAPATA

A NBR 6118:2014, no quesito rigidez, classifica as sapatas de acordo com a seguinte expressão:

$$h \geq \frac{a - a_p}{3} \quad (01)$$

onde:

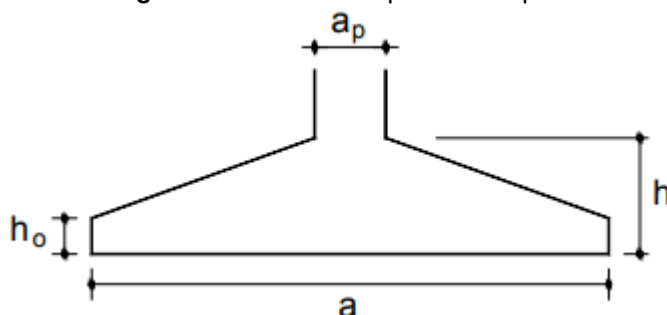
h : altura da sapata

a : dimensão da sapata em uma determinada direção;

a_p : dimensão do pilar na mesma direção.

Sendo que a sapata é considerada rígida quando a expressão for verificada em ambas as direções, caso contrário, é considerada flexível. A Figura 07 esquematiza as dimensões típicas da sapata usada na sentença acima.

Figura 7: Dimensões típicas da sapata.



Fonte: Bastos (2016).

O comportamento estrutural de uma sapata flexível equivale ao de uma viga fletida, devendo-se dimensionar a peça para absorver o momento fletor, bem como verificar o cisalhamento oriundo da força cortante e do punção. Para as sapatas rígidas, a verificação a punção não é necessária (SILVA, 1998).

2.4 DETALHES CONSTRUTIVOS

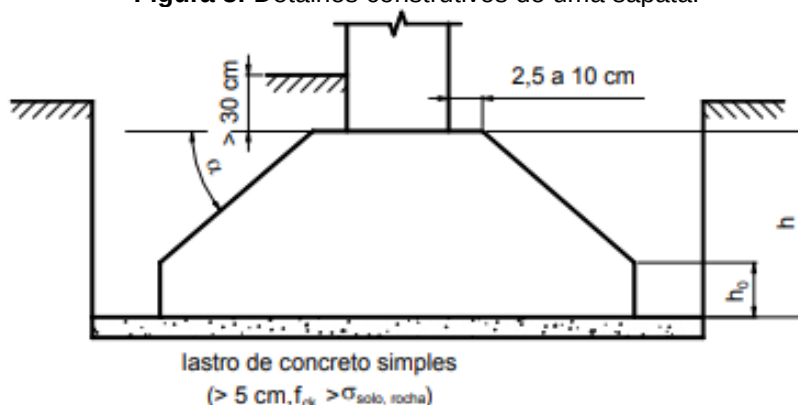
Segundo a NBR 6122:2010, todas as partes de uma fundação superficial em contato com o solo, devem se concretadas sobre um lastro de concreto não estrutural com no mínimo 5 cm de espessura, a ser lançado sobre toda a superfície de contato solo-fundação. No caso de rocha, esse lastro deve servir para regularização da superfície e, portanto, pode ter espessura variável, no entanto observado um mínimo de 5 cm.

Para Bastos (2016), a superfície do topo da sapata deve ter um plano horizontal maior que a seção do pilar, com pelo menos 2,5 ou 3 cm, que facilita a montagem e apoio da forma do pilar. Além disso, no intuito de evitar uma possível ruptura nos lados da sapata é importante executar as faces externas em superfície vertical, com a seguinte sugestão para h_o :

$$h_o \geq \begin{cases} h/3 \\ 15 \text{ cm} \end{cases} \quad (02)$$

O ângulo α (Figura 08), de inclinação da sapata, deve ser preferencialmente igual ou menor que 30° , que se trata do ângulo do talude natural do concreto fresco, evitando com isso a necessidade de forma na construção da sapata, além disso, as dimensões da sapata em planta, não podem ser inferiores a $0,60\text{ m}$

Figura 8: Detalhes construtivos de uma sapata.



Fonte: Bastos (2016)

2.5 RECALQUE

Cintra, Aoki e Albiero (2011), definem recalque de uma sapata como o deslocamento vertical para baixo, da base da sapata em relação uma referência que se encontra fixa e indeslocável. Esse recalque provém de deformações devido a diminuição do volume e/ou mudança de forma do maciço de solo compreendido entre a base da sapata e o indeslocável.

Segundo Sena (2016), esse recalque total de cada sapata pode ser decomposto como sendo a soma de duas parcelas, ou seja:

$$\rho = \rho_i + \rho_c \quad (03)$$

sendo:

- Recalque imediato (ρ_i);
- Recalque por adensamento (ρ_c).

Sena (2016) ainda diz que recalque por adensamento ocorre com a dissipação das pressões neutras, lentamente no decorrer do tempo. Já o recalque imediato é caracterizado pela distorção do solo. Por ser calculado pela Teoria da Elasticidade Linear, também recebe o nome de recalque elástico, apesar de não ter um comportamento exatamente elástico.

Além desse recalque total (ou absoluto) de cada sapata, também há o recalque diferencial entre duas sapatas. Esse último ocorre, pois o maciço de solo não é homogêneo, nem tão pouco as sapatas possuem as mesmas dimensões ou ainda estão sujeitas a mesma carga, se isso ocorresse, os recalques seriam uniformes (CINTRA, AOKI, ALBIERO, 2011).

Para o presente trabalho, optou-se por implementar o recalque imediato.

2.5.1 Recalque imediato

Será apresentado o procedimento para estimativa de recalque imediato de fundações diretas em meio elástico para o caso de uma camada semi-infinita.

Cintra, Aoki e Albiero (2011) relatam que Boussinesq (1885, apud Timoshenko e Goodier, 1951) encontrou a seguinte expressão para o recalque imediato em uma camada de solo argiloso sobreadensado profunda o suficiente para ser considerada semi-infinita:

$$\rho_i = \sigma \times B \times \left[\frac{1 - \vartheta^2}{E_s} \right] \times I_p \quad (04)$$

onde:

σ : é a tensão média na superfície de contato entre a placa e o maciço de argila (MPa);

B : é o lado ou diâmetro da placa (mm);

ϑ : é o coeficiente de Poisson do solo;

E_s é o módulo de deformabilidade do solo (MPa)

I_p : é o fator de influência, relacionado a forma e rigidez.

Os valores de I_p podem ser obtidos a partir da tabela abaixo

Figura 9: Fator de influência I_p .

Forma	Flexível			Rígido
	Centro	Borda	Média	
Círculo	1,00	0,64	0,85	0,79
Quadrado	1,12	0,56	0,95	0,99
Retângulo				
$L/B = 1,5$	1,36	0,67	1,15	
2	1,52	0,76	1,30	
3	1,78	0,88	1,52	
5	2,10	1,05	1,83	
10	2,53	1,26	2,25	
100	4,00	2,00	3,70	
1000	5,47	2,75	5,15	
10000	6,90	3,50	6,60	

F

Fonte: Sena (2016).

2.6 DIMENSIONAMENTO

2.6.1 Capacidade de carga

A determinação da capacidade de carga é um dos principais problemas que o engenheiro da área de construções se depara no desenvolvimento de um projeto de fundações. “Para uma sapata suficientemente resistente como peça estrutural de concreto armado, a capacidade de carga do elemento de fundação é a tensão que provoca a ruptura do maciço de solo em que a sapata está embutida ou apoiada” (CINTRA, AOKI, ALBIERO, 2011).

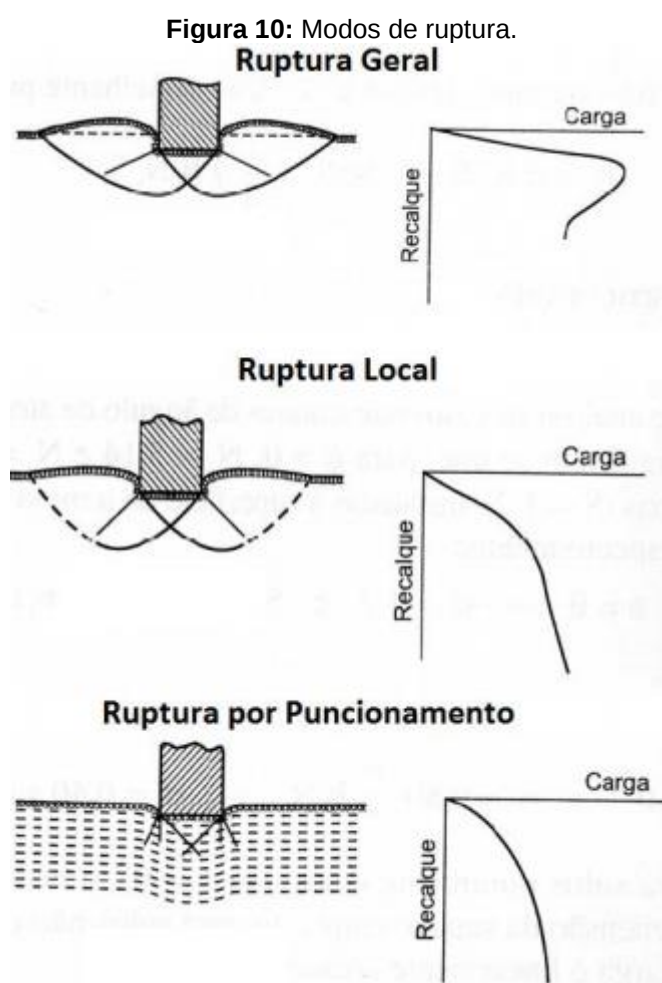
2.6.2 Modos de ruptura

Conforme Cintra, Aoki e Albiero (2011), Aleksandar Vesic (1975) determinou 3 modos de ruptura, sendo eles ruptura global, punção e ruptura local. O autor descreve cada um desses modos da seguinte maneira:

- Ruptura geral: ocorre em solos mais resistentes e sapatas rasas. A superfície de ruptura é contínua, desde uma borda lateral da sapata até a superfície do terreno do lado contrário a esta borda. A ruptura é súbita causando tombamento da sapata e a elevação de terra na superfície do terreno. A carga de ruptura é atingida para pequenos valores de recalque.

- Puncionamento: essa ruptura ocorre em solos mais deformáveis, como argila. Em vez de tombar, a sapata penetra devido o adensamento do solo. A carga de ruptura é atingida quando o recalque se torna muito elevado e o solo não resiste.
- Ruptura local: ocorre em solos de consistência ou compacidade média, consiste em um caso intermediário dos outros dois casos. Nesse tipo de ruptura a superfície de deslizamento não aflora.

A Figura 09 esquematiza cada tipo de ruptura



Fonte: Sena (2016).

2.6.3 Teoria de Terzaghi

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), o primeiro a desenvolver uma teoria acerca da capacidade de carga de um sistema sapata-solo foi Terzaghi. Em sua teoria,

desenvolvida em 1943, o mesmo sugere três hipóteses básicas, as quais são descritas a seguir:

- Trata-se de uma sapata corrida, e, portanto, seu comprimento L é bem maior que sua largura B , ou seja, $L \geq 5B$, simplificando o problema para um caso bidimensional;
- A profundidade de embutimento da sapata D é inferior a largura da sapata L , o que nos permite desprezar a resistência ao cisalhamento da camada de solo situada acima da sapata, logo pode-se substituir essa camada de espessura D e peso específico γ_s por uma sobrecarga $q = \gamma_s D$;
- O maciço de solo a base da sapata é rígido, caracterizando o caso de ruptura geral.

De acordo com Sena (2016), a partir de uma metodologia desenvolvida por Terzaghi e Peck (1967) encontra-se uma solução aproximada para a capacidade de carga sapata-solo, tal metodologia considera casos específicos, por vezes hipotéticos, e que depois eram generalizados através da superposição de efeitos. Os casos considerados são:

- Solo sem peso e sapata a superfície;
- Solo não coesivo e sem peso;
- Solo não coesivo e sapata à superfícies.

A partir da superposição, encontra-se a seguinte expressão para a capacidade de carga sapata-solo:

$$\sigma_r = c \times N_c + q \times N_q + \frac{1}{2} \times \gamma_s \times B \times N_\gamma \quad (05)$$

onde:

c : é a coesão (kPa);

q : é a sobrecarga (kPa);

γ : é o peso específico efetivo (KN/m);

B : é o comprimento da base (m).

As três parcelas acima, representam respectivamente as contribuições da coesão, sobrecarga e peso específico. N_c , N_q e N_γ são fatores de capacidade de carga adimensionais e depende unicamente do ângulo de atrito do solo ϕ (CINTRA, AOKI, ALBIERO, 2011).

Como citado acima, a expressão para a determinação da capacidade de carga sapata-solo proposta por Terzaghi foi deduzida partindo-se da hipótese que se trata de uma sapata corrida. Com a necessidade de se estender este método para outras geometrias de sapatas Terzaghi e Pick (1967) apresentaram uma equação semiempírica para sapata circular de diâmetro B e quadrada de lado B (CINTRA, AOKI, ALBIERO, 2011). Essas equações foram agrupadas em uma equação geral, que considera a forma da sapata:

$$\sigma_r = c \times N_c \times S_c + q \times N_q \times S_q + \frac{1}{2} \times \gamma_s \times B \times N_\gamma \times S_\gamma \quad (06)$$

Em que S_c , S_q e S_γ são denominados fatores de forma, cujo valores são reunidos na quadro 01.

Quadro 1: Fatores de forma.

SAPATA	S_c	S_q	S_γ
<i>Corrida (lado B)</i>	1	1	1
<i>Quadrada ($L = B$)</i>	1,2	1	0,8
<i>Circular ($B = \text{diâmetro}$)</i>	1,2	1	0,6

Fonte: Adaptado de Cintra, Aoki e Albiero (2011).

De acordo com Cintra, Aoki e Albiero (2011), para o valor da capacidade de carga para ruptura por punção (originalmente denominada de ruptura local por Terzaghi), o mesmo recomenda a utilização da mesma equação da ruptura geral, mas efetua uma redução empírica nos parâmetros de resistência do solo:

$$c' = \frac{2}{3} c \quad (07)$$

e

$$\tan \phi' = \frac{2}{3} \tan \phi \quad (08)$$

Com o ângulo de atrito ϕ substituído por ϕ' os fatores de capacidade de carga N_c , N_q e N_γ tornam-se N'_c , N'_q e N'_γ . Desse modo o valor para a capacidade de carga para ruptura por punção é dado por:

$$\sigma_r = c \times N'_c \times S_c + q \times N'_q \times S_q + \frac{1}{2} \times \gamma_s \times B \times N'_\gamma \times S_\gamma \quad (09)$$

2.7 TENSÃO ADMISSÍVEL

A NBR 6122:2010 estipula que, “dependendo das características geológicas e das dimensões do terreno, pode ser necessário dividi-lo em regiões representativas que apresentem pequena variabilidade nas suas características geotécnicas. Com isso, cada região representativa terá um valor médio de capacidade de ruptura.

Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), obtida essa tensão de ruptura, é necessário estabelecer a fração desse valor que poderá atuar no solo com segurança mínima a ruptura. Com isso surge o conceito fundamental de tensão admissível (σ_a):

$$\sigma_a \leq \frac{\sigma_r}{FS} \quad (10)$$

onde:

σ_r : é a tensão de ruptura;

FS : é o fator de segurança.

FS é um valor normatizado maior do que 1, pode ser chamado de fator de segurança global, ou simplesmente fator de segurança.

De acordo com as NBR 6122:2010, em fundações por sapata para capacidade de carga obtida a partir de métodos teóricos, o valor atribuído ao fator de segurança é 3,0.

2.8 MÉTODO DAS BIELAS E ARMADURA DE FLEXÃO

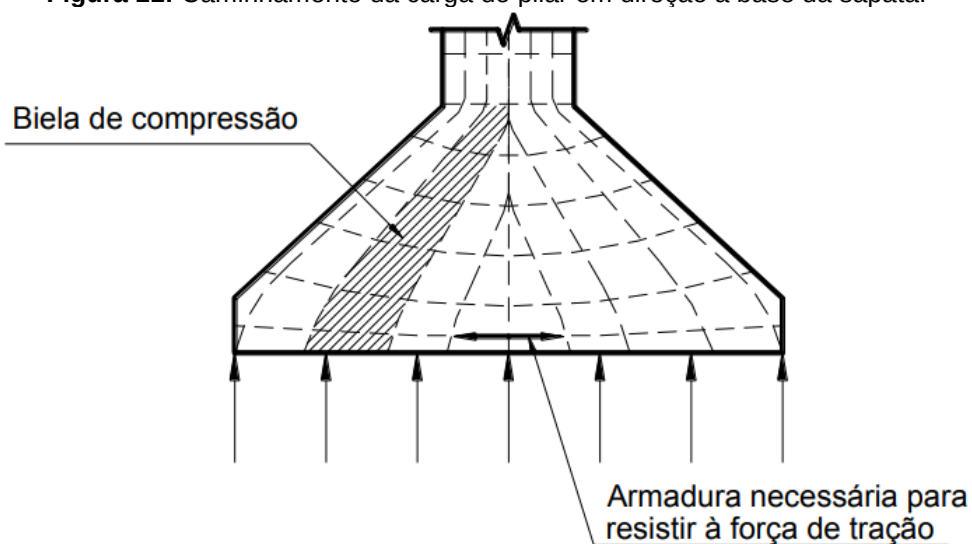
Para Sena (2016), o método das bielas e tirantes trata-se de uma ferramenta de cálculo, desenvolvida inicialmente por Lebellet (1936), baseado em uma série de ensaios experimentais. Tal ferramenta tem base no teorema estático da teoria da elasticidade, o qual permite o dimensionamento de elementos estruturais de concreto armado e protendido e se aplica a sapatas corridas ou isoladas, com o seguinte limite para altura útil:

$$d \geq \frac{a - a_p}{4} \quad (11)$$

Como a NBR 6118:2014 classifica a sapata rígida conforme a relação $h \geq (a - a_p)/3$, percebe-se que tal método engloba as sapatas rígidas e uma faixa de sapatas flexíveis, a depender dos valores de d .

A carga é transferida do pilar para a base da sapata por meio de bielas de concreto comprimido, que induzem tensões de tração na base da sapata (Figura 10), que devem ser resistidas pela armadura (BASTOS, 2016).

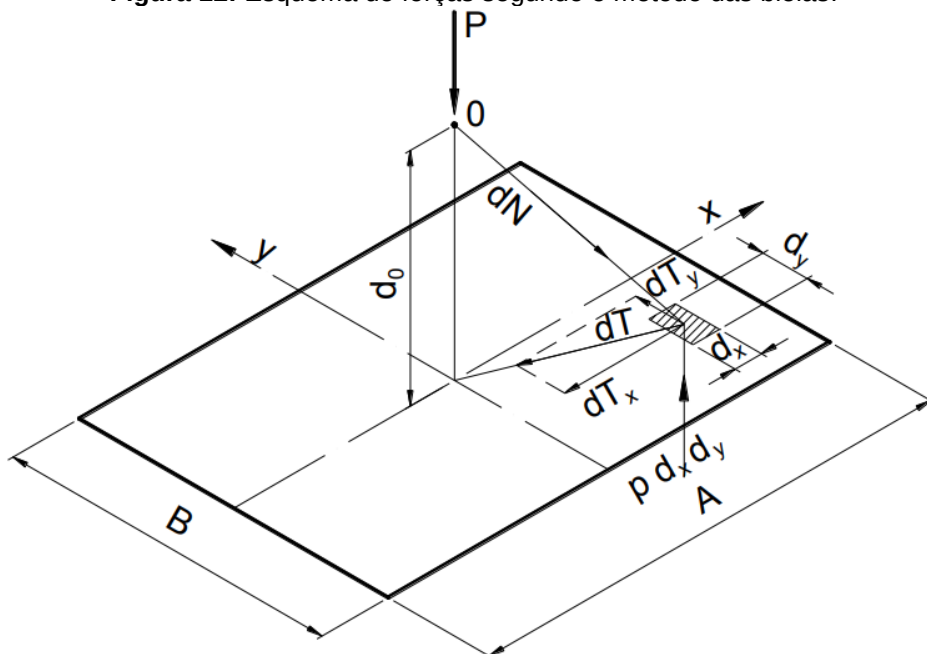
Figura 11: Caminhamento da carga do pilar em direção a base da sapata.



Fonte: Bastos (2016).

A Figura 11 mostra as forças atuantes na sapata, de acordo com o método das bielas.

Figura 12: Esquema de forças segundo o método das bielas.



Fonte: Bastos (2016).

Para a obtenção da área de aço, calcula-se primeiro o esforço de tração do tirante

$$T = \frac{P \times (B - b)}{8d} \quad (12)$$

onde:

T : esforço de tração;

P : é a carga do pilar (kN);

B : é o lado da sapata na direção que está sendo analisada (m);

b : é o lado do pilar na direção que está sendo analisada (m);

d : é a altura útil (m).

Para Sena (2016), quando a sapata apresenta balanços iguais nas duas direções, os esforços de tração e área de aço serão os mesmos. Quando os balanços não são iguais, deve-se realizar o cálculo acima para as duas direções.

Calculado o esforço de tração, a área de aço pode ser obtida por:

$$A_s = \frac{T_d}{f_{yd}} \quad (13)$$

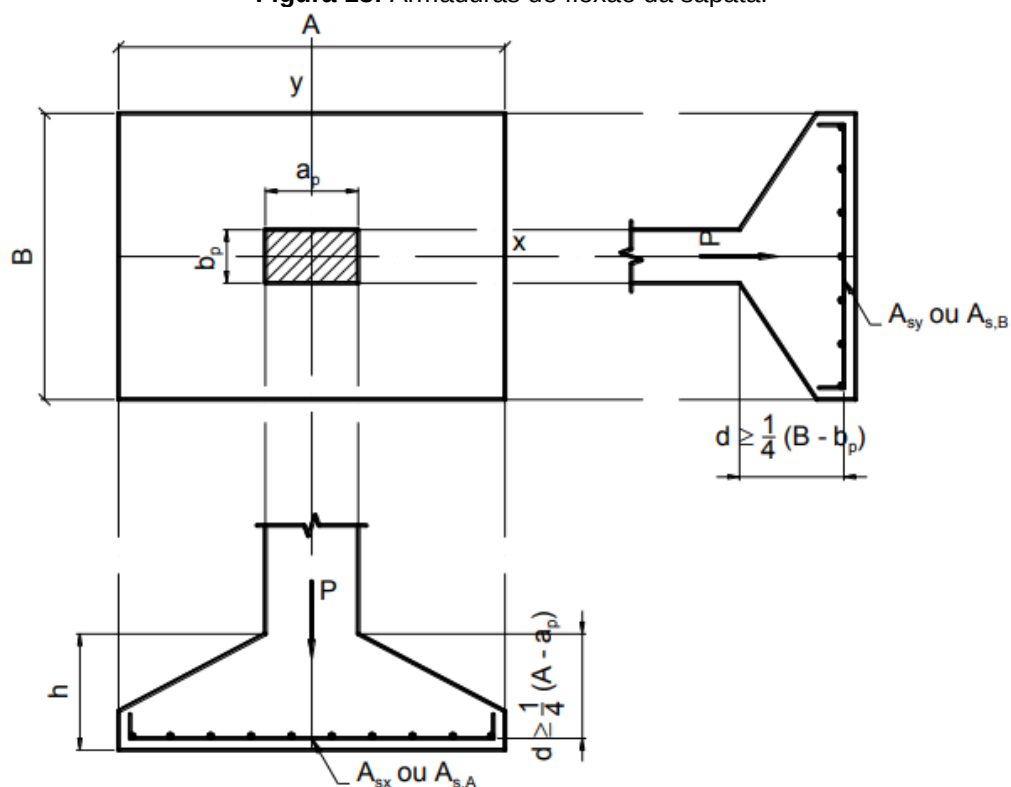
onde:

T_d : é o esforço de cálculo de tração;

f_{yd} : é o valor de cálculo da tensão de escoamento do aço.

A Figura 13 mostra as armaduras de flexão da sapata, conforme o método das Bielas.

Figura 13: Armaduras de flexão da sapata.



Fonte: Bastos (2016).

Segundo a NBR 6118:2014, a armadura de flexão deve ser distribuída de maneira uniforme ao longo da largura da sapata, estendendo-se integralmente de face a face da mesma, terminando com ganchos nas duas extremidades. Além disso, a sapata deve ter uma altura suficiente para permitir a ancoragem da armadura de arranque dos pilares.

3. DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DA PLANILHA

A ferramenta computacional desenvolvida no presente trabalho buscou otimizar as dimensões de uma fundação do tipo sapata com base no referencial teórico abordado. Para o desenvolvimento da mesma utilizou-se o *software* Excel.

A planilha limitou-se a obtenção das dimensões mínimas de uma sapata em planta, bem como o cálculo da área de aço mínima necessária, a depender da bitola empregada, para que a fundação viesse resistir aos esforços solicitantes aos quais estava sujeita. Além disso, verificou-se o atendimento da fundação quanto as restrições referentes ao recalque elástico da mesma.

De uma maneira resumida, o usuário informará os dados de entrada a ferramenta, esses dados consistem nas características geométricas da sapata e do pilar sobre ela apoiado, bem como informações acerca do carregamento submetido a mesma e do solo onde esta se assenta.

Com isso, a ferramenta retornará ao usuário os valores das tensões atuantes na sapata, a área de aço necessária a partir da escolha da bitola e irá gerar um relatório-resumo ao usuário.

Vale salientar que embora as dimensões da sapata sejam um dado de entrada, ao final esses valores serão otimizados a partir da ferramenta *Solver*. A planilha será melhor detalhada a seguir.

3.1 DADOS DE ENTRADA

Os primeiros dados de entrada foram nomeados de Informações geométricas da sapata (Figura 14)

Figura 14: Informações geométricas da sapata.

INFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS DA SAPATA	
TIPO DE SAPATA	Retangular (Bs,Ls)
Bs:	0,91 m
Ls:	1,17 m
Ds:	4,00 m

Fonte: Autoria Própria (2018).

Nesse primeiro momento, o usuário deve escolher o tipo de sapata que irá utilizar em seu projeto, as opções disponíveis para essa planilha são: quadrada, retangular, circular e corrida.

Caso escolha a sapata retangular, deverá fornecer as dimensões B_s e L_s que são respectivamente a menor e maior dimensão da sapata. Se quadrada, circular ou corrida o único valor que nos interessará será B_s , sendo o valor L_s desconsiderado, pois para esses tipos de sapata, o mesmo não foi necessário na implementação dos cálculos. Para a sapata quadrada adotou-se dimensões B_s por B_s , para a circular adotou-se B_s como o diâmetro da sapata e para a corrida adotou-se B_s em uma dimensão e $1m$ na outra.

Deve-se atribuir também o valor D_s que corresponde a profundidade a qual a sapata está assentada.

Temos também as informações geométricas referentes aos elementos apoiados sobre a sapata (Figura 15).

Figura 15: Informações geométricas do pilar.

INFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS DO PILAR	
B_p	0,14 m
L_p	0,40 m

Fonte: Autoria Própria (2018).

Nessa parte, vale ressaltar que para quando o pilar for retangular, deve-se utilizar uma sapata retangular, visando com isso atender o critério dos balanços iguais. Para os demais casos, não há nenhuma restrição.

O usuário também entrará com informações acerca das solicitações e eventuais excentricidades aos quais as aplicações dessas cargas estejam sujeitas (Figura 16).

Figura 16: Informações sobre carregamento.

INFORMAÇÕES SOBRE O CARREGAMENTO	
V_z	200,00 kN
M_x	3,00 kN.m
M_y	-2,00 kN.m
e_x	0,01 m
e_y	0,03 m

Fonte: Autoria Própria (2018).

Os parâmetros referentes ao solo (Figura 17). Sendo o ângulo de atrito restrito aos valores disponibilizados.

Figura 17: Informações do solo.

INFORMAÇÕES DO SOLO	
γ_s	17,00 kN/m ³
c	10,00 kN/m ²
ϕ	25,0°
	0,0
	5,0
OUT	10,0
N.A.	15,0
	20,0
fyk	25,0
	30,0
fck	34,0

Fonte: Autoria Própria (2018).

A escolha do modo de ruptura (Figura 18).

Figura 18: Modo de ruptura.

MODO DE RUPTURA	
☐ Ruptura Geral	☒ Ruptura Local

Fonte: Autoria Própria (2018).

E por fim, o campo destinado a informações adicionais, algumas necessárias a rotina da presente planilha, e algumas que possam vir a serem necessárias em possíveis atualizações da mesma (Figura 19).

Figura 19: Outras informações.

OUTRAS INFORMAÇÕES	
N.A.	8,00 m
fyk	500,00 MPa
fck	20,00 MPa
F.S.	3
γ_c (concreto)	1,4
γ_m (aço)	1,15

Fonte: Autoria Própria (2018).

3.2 ROTINA DE CÁLCULO

Inseridos os dados de entrada, partiu-se para cálculo da capacidade de carga do sistema solo-sapata, o qual optou-se por usar Terzaghi.

De início partiu-se dos valores do ângulo de atrito e do modo de ruptura e obteve-se os fatores de carga a ser usado na equação (Figura 20).

Figura 20: Fatores de capacidade de carga.

FATORES DE CAPACIDADE DE CARGA	
N_c/N_c'	14,8
N_q/N_q'	5,6
N_γ/N_γ'	3,2

Fonte: Autoria Própria (2018).

De maneira análoga, partindo da forma da sapata, obteve-se os fatores de forma (Figura 21) também presentes na equação de Terzagui.

Figura 21: Fatores de forma.

FATORES DE FORMA	
S_c	1,2
S_q	1
S_γ	0,9

Fonte: Autoria Própria (2018).

E a carga atuante na sapata (Figura 22), a partir de sua profundidade de assentamento e do peso específico do solo.

Figura 22: Carga atuante na base da sapata.

CARGA ATUANTE NA BASE DA SAPATA	
q	68,00 kN/m ²

Fonte: Autoria Própria (2018).

Feito isso obteve-se todos os parâmetros necessários para o cálculo da ruptura do solo por Terzaghi (Figura 23).

Figura 23: Tensão de ruptura.

TENSÃO DE RUPTURA	
σ_{rup}	580,76 kN/m ²

Fonte: Autoria Própria (2018).

E a partir daí com o fator de segurança, a tensão admissível (Figura 24):

Figura 24: Tensão admissível.

TENSÃO ADMISSÍVEL	
σ_{adm}	193,59 kN/m ²

Fonte: Autoria Própria (2018).

Em seguida calculou-se a tensão atuante na sapata (Figura 25).

Figura 25: Tensão atuante na sapata.

TENSÃO ATUANTE NA SAPATA	
σ_{sap}	193,59 kN/m ²

Fonte: Autoria Própria (2018).

E para isso foi necessária a obtenção da área real e efetiva da sapata (Figura 26).

Figura 26: Geometria calculada.

GEOMETRIA CALCULADA	
As (real)	1,07 m ²
Bs (efetiva)	0,90 m
Ls (efetiva)	1,14 m
As (efetiva)	1,03 m ²

Fonte: Autoria Própria (2018).

Calculou-se também a tensão máxima atuante em cada canto da sapata (Figura 27).

Figura 27: Tensões nos cantos da sapata.

TENSÕES NOS CANTOS DA SAPATA	
CANTO SUPERIOR ESQUERDO (σ_1)	191,53 kN/m ²
CANTO SUPERIOR DIREITO (σ_2)	167,02 kN/m ²
CANTO INFERIOR ESQUERDO (σ_3)	220,15 kN/m ²
CANTO INFERIOR DIREITO (σ_4)	195,64 kN/m ²

Fonte: Autoria Própria (2018).

A área de aço (Figura 28), onde utilizou-se o método das bielas, sendo a bitola um valor a ser escolhido pelo usuário.

Figura 28: Área de aço.

ÁREA DE AÇO	
Asx	2,49 cm ²
Bitola x	10,0 mm
Nº de Barras	4
Asx efetiva	3,14 cm ²
Asy	2,49 cm ²
Bitola y	10,0 mm
Nº de Barras	4
Asy efetiva	3,14 cm ²

Fonte: Autoria Própria (2018).

Calculou-se o volume de concreto da sapata (Figura 29), dividindo-a em um paralelepípedo e um tronco de pirâmide, e somando os volumes dessas duas Figuras geométricas, quando a mesma apresentar altura variável. Se a altura for constante, basta associar o volume da mesma ao volume de um paralelepípedo.

Figura 29: Volume de concreto.

VOLUME DE CONCRETO	
Altura base	0,20 m
altura tronco de piramide	0,10 m
Folga base menor	0,03 m
Área Base maior	1,07 m ²
Base Menor	0,09 m ²
Volume Base	0,21 m ³
Volume Pirâmide	0,15 m ³
Volume total de concreto	0,36 m ³

Fonte: Autoria Própria (2018).

Por fim a planilha gerou um relatório-resumo, o mesmo se encontra no apêndice A.

3.3 VALIDAÇÃO DE DADOS

Com o intuito de validar a nossa ferramenta, iremos aplicá-la em alguns problemas da literatura e comparar os resultados. Os problemas mostrados a seguir foram retirados do livro de Exercício de Fundações do autor Urbano Rodriguez Alonso.

3.3.1 Problema 01

Dimensionar uma sapata para um pilar de $30 \times 30 \text{ cm}$ e carga de 1500 kN , sendo a taxa admissível no solo igual a $0,3 \text{ MPa}$.

Solução Literatura:

Como trata-se de um pilar de seção quadrada, a sapata mais econômica terá forma quadrada, logo:

$$B_s = \sqrt{\frac{P}{\sigma_s}} = \sqrt{\frac{1500}{300}} = 2,24 \text{ m}$$

logo adota-se: $B_s = 2,25 \text{ m}$.

Solução Planilha:

Colocou-se os dados de entrada conforme o enunciado, porém houve uma limitação quanto a taxa admissível do solo, pois no enunciado é um dado de entrada, e na planilha é um valor calculado.

Entretanto tal limitação foi contornada com o uso da ferramenta *Solver*, onde colocou-se como restrição que a taxa admissível devia ser igual a 300 kN/m^2 , obtendo com isso as seguintes dimensões:

$$B_s = 2,24 \text{ m e } L_s = 2,24 \text{ m}$$

3.3.2 Problema 02

Dimensionar uma sapata para um pilar de seção $30 \times 100 \text{ cm}$ com carga 3000 kN para um $\sigma_s = 0,3 \text{ MPa}$.

Solução Literatura:

O pilar é retangular, logo a sapata mais econômica será retangular, logo:

$$B_s \times L_s = \frac{P}{\sigma_s} = \frac{3000}{300} = 10 \text{ m}^2 = 100\,000 \text{ cm}^2$$

$$B_s \times L_s = 100\,000 \text{ cm}^2 \quad (i)$$

aplicando os balanços iguais, temos:

$$L_s - B_s = L_p - B_p = 100 - 30 = 70 \text{ cm}$$

$$L_s - B_s = 70 \text{ cm}$$

$$L_s = 70 + B_s \quad (ii)$$

Substituindo (ii) em (i), tem-se:

$$(70 + B_s) \times B_s = 100\,000$$

$$B_s^2 + 70B_s - 100\,000 = 0$$

resolvendo por bhaskara, tem-se

$$B_s = 283 \text{ cm}$$

adotou-se $B_s = 285 \text{ cm}$, logo:

$$L_s = 70 + B_s = 70 + 285 = 355 \text{ cm}$$

Solução Planilha:

Partindo de maneira análoga ao exemplo anterior, inseriu-se os dados de entrada e utilizou-se a ferramenta *Solver* para contornar nossa limitação, onde foi obtido os seguintes valores para as dimensões da sapata:

$$B_s = 283 \text{ cm e } L_s = 353 \text{ cm}$$

Portanto, vemos que a planilha desenvolvida apresentou uma excelente precisão quanto ao dimensionamento de sapatas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao termino desse trabalho, foi possível observar a importância dos elementos de fundação do tipo sapata para a construção civil. Por se tratar de uma parte da estrutura que não fica a mostra, acaba-se por não conferir uma certa importância a esse elemento, o que é errôneo, visto que a mesma reflete sobre toda a integridade da edificação

Desenvolver um conhecimento interdisciplinar sobre o *software* Excel, e com isso verificar o quão poderoso o mesmo pode ser na implementação e otimização de dados. o Excel quando usado com propriedade pode fornecer resultados ilimitados.

A planilha desenvolvida apresenta algumas limitações, mas é algo a ser contornado a partir de implementações futuras.

Por fim, espera-se que a planilha desenvolvida traga alguma contribuição futura, seja para auxílio em projetos ou para a área acadêmica, despertando interesse nos alunos no desenvolvimento de ferramentas computacionais. Afinal, alunos de engenharia devem desde cedo despertar interesse em desenvolver meios de otimizar o seu tempo.

REFERÊNCIAS

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Exercícios de Fundações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas. **PROJETO ESTRUTURAL DE SAPATAS**: Notas de aula. 2007, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro, 2010.

BASTOS, Paulo Sergio dos Santos (2016). **Notas de aula – Sapatas de fundação**. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista.

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

LIMA, José Leonildo Romeu de Figueiredo. **PROJETO ESTRUTURAL DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS: ANÁLISE CRÍTICA DA UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAS COMPUTACIONAIS**. 2015. 126 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual da Paraíba, Arauna, 2015.

SENA, Leonardo. **ESTUDO DE CASO SOBRE PROJETO DE FUNDAÇÕES POR SAPATAS E POR ESTACAS**. 2016. 118 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SILVA, Edja Laurindo da. **ANÁLISE DOS MODELOS ESTRUTURAIS PARA DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS RESISTENTES EM SAPATAS**

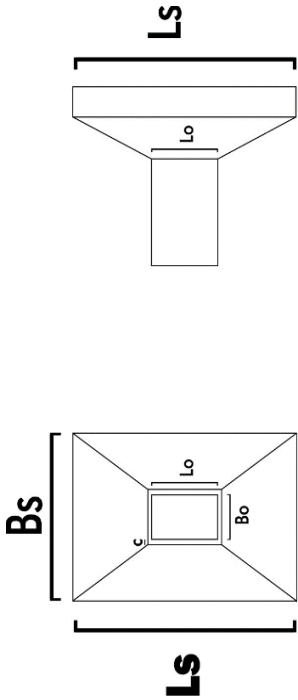
ISOLADAS. 1998. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

VELLOSO, Dirceu de Alencar.; LOPES, Francisco de Rezende.: **Fundações – critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

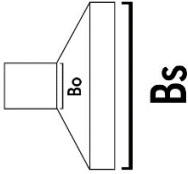
APÊNDICE A

RELATÓRIO-RESUMO

SAPATA	
TIPO DE SAPATA	Retangular (Bs,Ls)
Bs:	2,38 m
Ls:	2,58 m
Ds:	4,00 m
As (real)	5,64 m ²



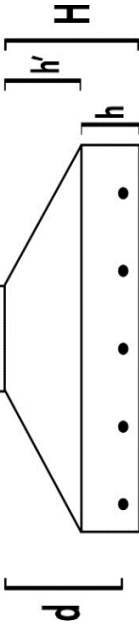
PILAR	
Bp	0,20 m
Lp	0,40 m



d	0,55 m
h	0,60 m

Bitola x	16,0 mm
Nº de Barras	7
Asx efetiva	14,07 cm ²

Bitola y	10,0 mm
Nº de Barras	17
Asy efetiva	13,35 cm ²



Volume total de concreto	4,06 m ³
--------------------------	---------------------