

**Desenvolvimento de um Programa para  
Dimensionamento de Sapatas de Acordo com o Eurocódigo 2  
e o Eurocódigo 7**

**Jhennifer Mara Mendiola Barbosa**

Dissertação apresentada à

**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**

**Instituto Politécnico de Bragança**

Para a obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia da Construção**

**Bragança**

**2022**

JHENNIFER MARA MENDIOLA BARBOSA

**Desenvolvimento de um Programa para  
Dimensionamento de Sapatas de Acordo com o Eurocódigo 2  
e o Eurocódigo 7**

Dissertação apresentada  
como requisito parcial à obtenção  
do grau de mestre em Engenharia  
da Construção da Escola Superior  
de Tecnologia e Gestão – ESTIG,  
do Instituto Politécnico de  
Bragança.

Orientadores: Professor  
Doutor Manuel Teixeira Braz  
César, Professor Doutor António  
Miguel Verdelho Paula, Professor  
Doutor Eduardo Souza Candido.

“Este Trabalho de Dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri”

BRAGANÇA

2022

## RESUMO

As fundações são elementos estruturais responsáveis por suportar e transferir os esforços de uma edificação para o solo e caso ocorra o seu colapso também irá ocorrer o desmoronamento de toda a superestrutura. Por isso, é importante que o seu dimensionamento seja feito corretamente. Porém, o dimensionamento de uma estrutura é uma tarefa complexa e que demanda muito tempo para realizá-la, sobretudo quando se realizam cálculos manualmente.

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo principal a elaboração de uma folha de cálculo, utilizando Excel e a linguagem VBA (Visual Basic for Applications) para realizar o dimensionamento de sapatas isoladas, de acordo com o Eurocódigo 2 e o Eurocódigo 7. Os resultados obtidos para a capacidade de carga do solo, através do uso das equações descritas no anexo D do Eurocódigo 7, foram comparados com os resultados encontrados na Tabela Tensões de Segurança à Rotura disposta no livro de Tabelas Técnicas (1998).

O programa realiza o dimensionamento de sapatas isoladas e efetua a verificação em relação a capacidade de carga do solo e ao deslizamento, em seguida realiza o dimensionamento da armadura pelo Método das Escoras e Tirantes.

No que respeita à análise dos resultados obtidos para a capacidade do solo, pode-se observar que os valores obtidos pela Tabela são mais conservadores aos obtidos pela Equação. Ademais, pode-se verificar que a profundidade em que a sapata será assentada é um fator que influencia no valor da capacidade de carga do solo para o caso analítico, assim como a presença de um extrato rígido.

**Palavras chaves:** Fundações superficiais. Dimensionamento geotécnico e Estrutural. Cálculo automático. Sapatas isoladas.

## ABSTRACT

Foundations are structural elements responsible for the support and strain transfer of a building to the soil, as its collapse also incurs the landslide of all superstructure. Thus, the correctness of its design is critical. Therefore, designing a structure is a complex task, demanding much time to perform and implicating mistakes when calculations are manual.

This way, the present work has the main objective of elaborating an excel spreadsheet, using Excel and VBA (Visual Basic for Applications), with the calculations for sizing isolated spread footings, according to Eurocode 2 and Eurocode 7. The obtained results for the bearing capacity, with the auxiliary of the equations described in annex D of Eurocode 7, are compared with *Tabela Tensões de Segurança à Rotura* results disposed in the book *Tabelas Tecnicas (1998)*.

The program calculates and designs the isolated spread footings, executing the verification within the bearing limit of the soil and slip, further making up the sizing of the reinforcement by the Strut and Tie Models.

The results showed that the values obtained by the Table are more conservative regarding the bearing capacity of the soil than the values calculated by the Equation. Moreover, one can verify that the foundation depth and the presence of a rigid extract influence the analytical calculation.

**Keywords:** Shallow foundations. Geotechnical and structural design. Automatic calculation. Isolated spread footings.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a minha mãe, Rubia, pelo imenso amor, carinho, dedicação e que esteve sempre ao meu lado me dando forças para concluir esta etapa da minha vida.

Agradeço também a minha tia, Rosângela, por sempre cuidar de mim como uma filha e por sempre me apoiar e acreditar em mim.

Agradeço imensamente as minhas irmãs Jasmine e Kethleen, pela amizade e cumplicidade em todos os momentos da minha vida.

Agradeço o meu noivo, Luis, que me apoiou incondicionalmente em mais esta etapa da minha caminhada.

Agradeço também a toda a minha família e amigos que me apoiaram durante este percurso.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Manuel Teixeira Braz César, que teve muita paciência e muita dedicação em me orientar nesta etapa, mesmo com pouco tempo disponível, se empenhava em realizar reuniões semanais para me auxiliar em todo o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço ao meu co-orientador, Dr. António Miguel Verdelho Paula, pelos conhecimentos transmitidos e por toda a paciência, dedicação e sempre esteve presente em todas as reuniões de orientações.

Agradeço também ao meu co-orientador, Dr. Eduardo Candido Souza, que mesmo a distância me apoiou e sempre esteve a disposição para me ajudar e auxiliar em tudo o que podia.

Por fim, agradeço as instituições, IPB e UFLA, que por meio do programa de dupla diplomação, me deu a oportunidade de avançar na minha vida acadêmica.

# ÍNDICE

<b>RESUMO</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1 FUNDAÇÕES .....	4
2.1.1 <i>Fundações superficiais</i> .....	4
2.1.2 <i>Fundações profundas</i> .....	5
2.2 ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGA DO SOLO .....	7
2.2.1 <i>Teoria de Terzaghi</i> .....	9
2.2.2 <i>Contribuição de Vesic</i> .....	13
2.2.3 <i>Contribuição de Meyerhof</i> .....	15
2.2.4 <i>Determinação da tensão admissível do solo</i> .....	17
2.2.5 <i>Pré-dimensionamento de sapatas quanto a sua forma em planta</i> .....	18
2.3 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA SEGUNDO OS EUROCÓDIGOS 2 E 7 .....	22
2.3.1 <i>Eurocódigo 7</i> .....	22
2.3.1.1 Os valores de cálculo .....	23
2.3.1.2 Estados limites últimos .....	24
2.3.1.3 Capacidade resistente ao deslizamento .....	32
2.3.2 <i>Influência do nível freático</i> .....	33
2.3.3 <i>Eurocódigo 2</i> .....	36
2.3.3.1 Bases para o projeto .....	37
2.3.3.2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE SAPATAS.....	38
2.3.3.3 Dimensionamento de armadura para sapata rígida – Verificação de segurança à flexão	
39	
• Sapata sem excentricidade de carga.....	39
• Sapata com excentricidade de carga .....	41

<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE CÁLCULO EM VBA .....</b>	<b>45</b>
3.1	VISUAL BASIC FOR APPLICATIONS (VBA) .....	45
3.2	APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO .....	46
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DO PROGRAMA EM CASOS PRÁTICOS .....</b>	<b>57</b>
4.1	AREIA MEDIAMENTE GRADUADA .....	60
4.1.1	<i>Caso 1: sapatas localizadas na superfície do terreno .....</i>	<i>61</i>
4.1.2	<i>Caso 2: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno .....</i>	<i>61</i>
4.1.3	<i>Caso 3: sapatas localizadas na superfície do terreno e presença de extrato rígido</i>	<i>62</i>
4.1.4	<i>Caso 4: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno e presença de extrato rígido</i>	<i>63</i>
4.1.5	<i>Comparação dos quatro casos para o mesmo tipo de solo: .....</i>	<i>64</i>
4.2	AREIA BEM GRADUADA E COMPACTA .....	65
4.2.1	<i>Caso 1: sapatas localizadas na superfície do terreno .....</i>	<i>66</i>
4.2.2	<i>Caso 2: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno .....</i>	<i>66</i>
4.2.3	<i>Caso 3: sapatas localizadas na superfície do terreno e presença de extrato rígido</i>	<i>67</i>
4.2.4	<i>Caso 4: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno e presença de extrato rígido</i>	<i>68</i>
4.2.5	<i>Comparação dos quatro casos para o mesmo tipo de solo: .....</i>	<i>69</i>
4.3	ARGILA DURA .....	71
4.3.1	<i>Caso 1: sapatas localizadas na superfície do terreno .....</i>	<i>71</i>
4.3.2	<i>Caso 2: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno .....</i>	<i>72</i>
4.3.3	<i>Caso 3: sapatas localizadas na superfície do terreno e presença de extrato rígido</i>	<i>73</i>
4.3.4	<i>Caso 4: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno e presença de extrato rígido</i>	<i>74</i>
4.3.5	<i>Comparação dos quatro casos para o mesmo tipo de solo: .....</i>	<i>75</i>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>76</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	77
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>
<b>7</b>	<b>ANEXO A: FATORES CORRETIVOS (<math>F_c</math>, <math>F_v</math>, <math>F_q</math>) .....</b>	<b>80</b>
<b>8</b>	<b>ANEXO B – MODELO DE RELATÓRIO GERADO PELO PROGRAMA SAPATAS .....</b>	<b>91</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de fundações superficiais: (a) Bloco, (b) Sapata isolada e (c) Radier ...	5
Figura 2– Classificação dos principais tipos de estacas pelo método executivo .....	6
Figura 3- Fundações profundas: (a) Estacas e (b) Tubulões .....	6
Figura 4– Tipos de fundação mista: (a) estaca ligada a sapata, (b) estaca abaixo de sapata, (c) radier sobre estacas e (d) radier sobre tubulões .....	7
Figura 5– Sistema sapata-solo .....	7
Figura 6– Modos de ruptura da capacidade de carga: (a) ruptura geral; (b) ruptura local e (c) ruptura por punção .....	8
Figura 7– Superfície potencial de ruptura .....	10
Figura 8 - Fatores de capacidade de carga.....	12
Figura 9 - Sapata proporcionada.....	19
Figura 10 - Sapata quadrada.....	19
Figura 11 - Sapata com bordos equidistantes .....	20
Figura 12 - Sapata homotética.....	21
Figura 13– Profundidade H abaixo da base da fundação para cálculo de capacidade resistente.....	30
Figura 14 - Zona plastificada da sapata.....	34
Figura 15 - Caso 1: O nível freático encontrasse na base da fundação ou acima dela. ..	35
Figura 16 - Caso 2: O nível freático encontra-se entre a base da fundação e o limite da zona plastificada. ....	35
Figura 17 - Caso 3: Nível freático encontra-se abaixo do limite da zona plastificada do solo .....	36
Figura 18– Sapata rígida.....	38
Figura 19– Sapata rígida sem excentricidade de carga.....	40
Figura 20– Sapata rígida com tensões no solo em menos da metade da sapata .....	42
Figura 21– Sapata rígida com tensões no solo em mais da metade da sapata .....	43
Figura 22– Opção de combinações de acções em sapata isoladadas.....	46
Figura 23– Introdução dos dados das acções actuantes na base da sapata para Opção 1	47
Figura 24– Apresentação das acções actuantes na base da sapata para a Opção 2 .....	47
Figura 25– Alteração dos coeficientes de segurança para o cálculo das combinações das acções .....	48
Figura 26– Cálculo das acções para o estado GEO .....	48
Figura 27– Pré-dimensionamento de sapatas .....	49
Figura 28– Apresentação das informações das dimensões da sapata.....	50

Figura 29– Introdução do tipo de solo, profundidade da sapata, presença de extrato rígido, nível de água e tipos de tensões.....	50
Figura 30– Apresentação das informações das dimensões da sapata e dos coeficientes corretivos.....	51
Figura 31– Verificação da capacidade de carga .....	51
Figura 32– Verificação ao deslizamento da base da sapata.....	52
Figura 33–Início do cálculo estrutural: dimensões adotada para a sapata.....	53
Figura 34– Cálculo das acções combinadas para o caso STR.....	53
Figura 35– Indicação de sapata rígida ou flexível.....	54
Figura 36– Sapata rígida, dimensionamento estrutural pelo Método das Bielas.....	54
Figura 37 - Diagrama do Dimensionamento Geotécnico do Programa.....	55
Figura 38- Diagrama do Dimensionamento Estrutural do Programa.....	56
Figura 39- Caso de estudo 1: (a) Sapata 1 na superfície do terreno; (b) Sapata 2 na superfície do terreno; (c) Sapata 3 na superfície do terreno .....	57
Figura 40- Caso de estudo 2: (a) Sapata 1 a dois metros de profundidade; (b) Sapata 2 a dois metros de profundidade; (c) Sapata 3 a dois metros de profundidade .....	58
Figura 41- Caso de estudo 3: (a) Sapata 1 na superfície do terreno e presença de extrato rígido; (b) Sapata 2 na superfície do terreno e presença de extrato rígido; (c) Sapata 3 na superfície do terreno e presença de extrato rígido.....	58
Figura 42- Caso de estudo 4: (a) Sapata 1 a dois metros de profundidade e presença de extrato rígido; (b) Sapata 2 a dois metros de profundidade e presença de extrato rígido; (c) Sapata 3 a dois metros de profundidade e presença de extrato rígido.....	59
Figura 43 - Modelo de Relatório (pág. 1).....	91
Figura 44 - Modelo de Relatório (pág. 2).....	92
Figura 45 - Modelo de Relatório (pág. 3).....	93
Figura 46 - Modelo de Relatório (pág. 4).....	94

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Areia mediamente compacta - Caso 1 .....	61
Gráfico 2 - Areia mediamente compacta - Caso 2 .....	62
Gráfico 3 - Areia mediamente compacta (estrato rígido ) - Caso 3.....	63
Gráfico 4 - Areia mediamente compacta (estrato rígido) - Caso 4.....	64
Gráfico 5 - Areia mediamente compacta - Todos os casos .....	65
Gráfico 6 - Areia bem graduada e compacta - Caso 1 .....	66
Gráfico 7 - Areia bem graduada e compacta - Caso 2.....	67
Gráfico 8 - Areia bem graduada e compacta (estrato rígido) - Caso 3 .....	68
Gráfico 9 - Areia bem graduada e compacta (estrato rígido) - Caso 4.....	69
Gráfico 10 - Areia bem graduada e compacta - Todos os casos.....	70
Gráfico 11 - Argila dura - Caso 1 .....	71
Gráfico 12 - Argila dura - Caso 2.....	72
Gráfico 13 - Argila dura (estrato rígido) - Caso 3 .....	73
Gráfico 14 - Argila dura (estrato rígido) - Caso 4.....	74
Gráfico 15 - Argila média - Todos os casos .....	75
Gráfico 16 - Fator corretivo $f_c$ (ângulo de atrito $0^\circ$ ) .....	80
Gráfico 17 - Fator corretivo $f_c$ (ângulo de atrito $10^\circ$ ) .....	81
Gráfico 18 - Fator corretivo $f_c$ (ângulo de atrito $20^\circ$ ) .....	81
Gráfico 19 - Fator corretivo $f_c$ (ângulo de atrito $30^\circ$ ) .....	82
Gráfico 20 - Fator corretivo $f_c$ (ângulo de atrito $36^\circ$ ) .....	82
Gráfico 21 - Fator corretivo $f_c$ (ângulo de atrito $40^\circ$ ) .....	83
Gráfico 22 - Fator corretivo $f_c$ (ângulo de atrito $0^\circ$ , $10^\circ$ , $20^\circ$ , $30^\circ$ , $36^\circ$ e $40^\circ$ ).....	83
Gráfico 23 - Fator corretivo $f_\gamma$ (ângulo de atrito $0^\circ$ ) .....	84
Gráfico 24 - Fator corretivo $f_\gamma$ (ângulo de atrito $10^\circ$ ) .....	84
Gráfico 25 - Fator corretivo $f_\gamma$ (ângulo de atrito $20^\circ$ ) .....	85
Gráfico 26 - Fator corretivo $f_\gamma$ (ângulo de atrito $30^\circ$ ) .....	85
Gráfico 27 - Fator corretivo $f_\gamma$ (ângulo de atrito $36^\circ$ ) .....	86
Gráfico 28 - Fator corretivo $f_\gamma$ (ângulo de atrito $40^\circ$ ) .....	86
Gráfico 29 - Fator corretivo $f_\gamma$ (ângulo de atrito $0^\circ$ , $10^\circ$ , $20^\circ$ , $30^\circ$ , $36^\circ$ e $40^\circ$ ).....	87
Gráfico 30 - Fator corretivo $f_q$ (ângulo de atrito $0^\circ$ ) .....	87
Gráfico 31 - Fator corretivo $f_q$ (ângulo de atrito $10^\circ$ ) .....	88
Gráfico 32 - Fator corretivo $f_q$ (ângulo de atrito $20^\circ$ ) .....	88

Gráfico 33 - Fator corretivo $f_q$ (ângulo de atrito $30^\circ$ ) .....	89
Gráfico 34 - Fator corretivo $f_q$ (ângulo de atrito $36^\circ$ ) .....	89
Gráfico 35 - Fator corretivo $f_q$ (ângulo de atrito $40^\circ$ ) .....	90
Gráfico 36 - Fator corretivo $f_q$ (ângulo de atrito $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 36^\circ$ e $40^\circ$ ) .....	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

EC	Eurocódigo
EC0	Eurocódigo 0 (Bases para o projecto de Estruturas)
EC2	Eurocódigo 2 (Projeto de Estruturas de Betão)
EC7	Eurocódigo 7 (Projeto Geotécnico)
EQU	Estado limite último por perda de equilíbrio da estrutura ou do terreno
GEO	Estado limite último por rutura das capacidades resistente do solo.
HYD	Estado limite último por gradientes hidráulicos.
STR	Estado limite último por rutura da capacidade resistente dos materiais
UPL	Estado limite último por levantamento hidráulico
Letras maiúsculas latinas	
<i>A</i>	Área da secção transversal
<i>A'</i>	Área efetiva da base ( $A' = B' \times L'$ )
<i>A<sub>s</sub></i>	Área da secção de uma armadura para betão armado
<i>A<sub>st</sub></i>	Área da armadura de tração
<i>B</i>	Largura de área de fundação
<i>B'</i>	Largura efetiva de fundação superficial
<i>C<sub>d</sub></i>	Valor nominal ou uma função dos valores de cálculo de certas propriedades dos materiais
<i>D</i>	Profundidade da base de fundação superficial
<i>E</i>	Efeito de uma ação
<i>E<sub>d</sub></i>	Valor de cálculo do efeito de ações
<i>E<sub>I</sub></i>	Rigidez à flexão
<i>F<sub>d</sub></i>	Valor de cálculo de uma ação
<i>F<sub>k</sub></i>	Valor característico de uma ação
<i>F<sub>rep</sub></i>	Valor representativo de uma ação

$G$	Ação permanente
$G_d$	Valor de cálculo de uma ação permanente
$G_k$	Valor característico de uma ação permanente
$G_{k,j}$	Valor característico de uma ação permanente $j$
$H$	Carga horizontal, ou componente da ação total segundo a direção da base de uma fundação
$H$	Profundidade do firme sob uma fundação superficial
$H_d$	Valor de cálculo da componente horizontal da ação
$L$	Comprimento
$L'$	Comprimento efetivo de fundação superficial
$M$	Momento fletor
$N$	Componente normal da força aplicada a uma secção
$N_{Ed}$	Valor de cálculo do esforço normal atuante (tração ou compressão)
$N_c, N_q, N_\gamma$	Fatores de capacidade resistente ao carregamento vertical de uma fundação superficial
$P$	Peso próprio da sapata
$Q$	Ação variável
$Q$	Carga vertical aplicada a uma fundação
$Q_{ult}$	Capacidade resistente ao carregamento vertical de uma fundação/Carga de rotura teórica
$Q_k$	Valor característico de uma ação variável isolada
$Q_{k,1}$	Valor característico da ação variável base
$Q_{k,i}$	Valor característico das outras ações variáveis
$R_d$	Valor de cálculo da resistência ao deslizamento entre a base de fundação e o terreno

$V$	Carga vertical, ou componente da ação total segundo a direção normal à base de uma fundação
$X$	Propriedade de um material
$X_d$	Valor de cálculo de uma propriedade de um material
$X_k$	Valor característico de uma propriedade de um material
Letras minúsculas latinas	
$a$	Propriedade geométrica
$a_d$	Valor de cálculo de grandezas geométricas
$a_k$	Valor característico de uma grandeza geométrica
$a_{nom}$	Valor nominal de uma grandeza geométrica
$b$	Largura total de uma seção transversal
$b'$	Largura efetiva de uma fundação
$b_c, b_q, b_\gamma$	Fatores corretivos das três parcelas da capacidade resistente de uma fundação superficial para ter em conta a inclinação da base da fundação em relação à direção horizontal
$c$	Coesão em tensões totais
$c'$	Coesão em tensões efetivas
$d$	Altura útil da sapata
$d_c, d_q, d_\gamma$	Fatores corretivos das três parcelas da capacidade resistente de uma fundação superficial para ter em conta a profundidade da sapata
$e$	Excentricidade da carga normal na base de uma fundação
$f_{cd}$	Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
$f_{ck}$	Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade
$f_c, f_q, f_\gamma$	Fatores corretivos das três parcelas da capacidade resistente de uma fundação superficial para ter em conta a proximidade do firme

$f_{yk}$	Valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado
$f_{yd}$	Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado
$g_c, g_q, g_\gamma$	Fatores corretivos das três parcelas da capacidade resistente de uma fundação superficial para ter em conta a inclinação da superfície do terreno
$h$	Altura
$i_c, i_q, i_\gamma$	Fatores corretivos das três parcelas da capacidade resistente de uma fundação superficial para ter em conta a inclinação da carga aplicada em relação à vertical
$m_B$	Expoente nas expressões de $i_q$ e de $i_\gamma$
$m_L$	Expoente nas expressões de $i_q$ e de $i_\gamma$
$m_\theta$	Expoente nas expressões de $i_q$ e de $i_\gamma$
$q$	Sobrecarga distribuída à superfície do terreno
$q_{ult}$	Capacidade resistente (tensão) ao carregamento vertical de uma fundação
$s_c, s_q, s_\gamma$	Fatores corretivos das três parcelas da capacidade resistente de uma fundação superficial para ter em conta a forma da fundação

#### Letras minúsculas gregas

$\gamma$	Coeficiente parcial
$\gamma$	Peso volúmico
$\gamma'$	Peso volúmico submerso
$\gamma_c$	Coeficiente parcial relativo ao betão
$\gamma_{c'}$	Coeficiente parcial para a coesão em tensões efetivas
$\gamma_E$	Coeficiente parcial para o efeito de uma ação

$\gamma_f$	Coeficiente parcial para ações, que tem em conta a possibilidade de desvios desfavoráveis dos valores das ações em relação aos valores representativos
$\gamma_F$	Coeficiente parcial para uma ação
$\gamma_G$	Coeficiente parcial para uma ação permanente, $G$
$\gamma_{G,j}$	Coeficiente parcial para uma ação permanente $j$
$\gamma_m$	Coeficiente parcial relativo às propriedades dos materiais, considerando apenas as incertezas na propriedade do material
$\gamma_{m,i}$	Coeficiente parcial para um parâmetro do solo no estrato $i$
$\gamma_M$	Coeficiente parcial relativo às propriedades dos materiais, tendo em conta as incertezas na propriedade do material, nas imperfeições geométricas e no modelo de cálculo utilizado
$\gamma_Q$	Coeficiente parcial para uma ação variável, $Q$
$\gamma_{Q,i}$	Coeficiente parcial de segurança para uma ação variável $i$
$\gamma_R$	Coeficiente parcial para uma capacidade resistente
$\gamma_{R;d}$	Coeficiente parcial para a incerteza num modelo de determinação da capacidade resistente
$\gamma_{R;h}$	Coeficiente de segurança parcial para a capacidade resistente ao deslizamento
$\gamma_w$	Peso volúmico da água
$\gamma_{\Phi'}$	Coeficiente parcial para o ângulo de atrito interno ( $\tan \Phi'$ )
$\sigma_{adm}$	Tensão admissível
$\Phi$	Ângulo de atrito interno (ou de resistência ao corte) em tensões totais
$\Phi'$	Ângulo de atrito interno (ou de resistência ao corte) em tensões efetivas

$\Psi_0$	Coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável
$\Psi_1$	Coeficiente para a determinação do valor frequente de uma ação variável
$\Psi_2$	Coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 ENQUADRAMENTO**

Fundação é um elemento estrutural responsável por transferir as cargas de uma superestrutura para o solo (Conduto, et al. 2001). Para a elaboração de uma Fundação é necessário o conhecimento na área de Geotecnia e de Cálculo Estrutural, pois é imprescindível a compreensão dos aspetos do solo, além do conhecimento em estruturas de betão armado para o seu dimensionamento estrutural. (Velloso e Lopes, 2011)

Evidentemente a fundação é responsável por suportar e transferir os esforços da estrutura para o solo e caso ocorra o seu colapso também irá ocorrer o desmoronamento de toda a superestrutura.

Um dos problemas de fundações mais famoso é o caso da Torre de Pisa. A sua construção foi iniciada no ano 1173 e finalizada aproximadamente 200 anos depois, na Cidade de Piza, Itália. (Cintra, et al. 2013)

A Torre de Pisa foi construída sobre um solo com camadas de areia e argila e para isso utilizou-se uma fundação direta. Porém, a região sul onde foi construída a Torre apresentou maior deformação levando a estrutura ter um recalque elevado nessa área, ocorrendo o seu desaprumo. (Cintra, et al. 2013)

Com isso, pode-se constatar a importância da fundação para a construção de uma edificação. Sem os conhecimentos do tipo de solo que estará a estrutura e sem o dimensionamento correto, toda a estrutura poderá entrar em colapso.

Ademais, o dimensionamento de uma estrutura é uma tarefa complexa e que demanda muito tempo para realizá-la, além de implicar vários erros quando os cálculos são realizados manualmente, desta forma a utilização de um software é de extrema importância, pois reduz o tempo gasto no dimensionamento além de minimizar os erros relacionados aos cálculos.

Portanto, é de suma importância a utilização de ferramentas computacionais para auxiliar o engenheiro na elaboração do projecto de fundação. O programa Sapata permite

ao usuário interagir de forma simples e rápida através de sua interface gráfica. Com isso, o projetista poderá realizar diversos testes para obter a solução mais adequada e económica para o seu projecto. Além, de eliminar os erros cometidos ao realizar cálculos manuais evitando possíveis acidentes.

## **1.2 OBJETIVOS**

A presente dissertação tem como objetivo aplicar uma ferramenta computacional que auxilie o projetista no dimensionamento de fundações superficiais, mais especificamente, sapatas isoladas. Para isso, o dimensionamento será feito de acordo com o EC2 e o EC7.

Pretende-se o desenvolvimento de um software para o dimensionamento e a verificação de sapatas isoladas através do programa Microsoft Excel, utilizando a linguagem de programação VBA (Visual Basic for Applications).

Além disso, a dissertação analisa dois métodos utilizados para a obtenção da capacidade de carga do solo. O primeiro método, conhecido por Tensão admissível do solo é obtido através de tabelas, o segundo é um método analítico obtido através da equação da capacidade de carga. Visa-se com isso, comparar os resultados obtidos pelos dois métodos e verificar se os valores encontrados por cada um dos métodos são semelhantes ou se algum apresenta valores mais conservativos.

Para isso, será realizado o estudo de três sapatas com diferentes cargas axiais aplicadas sobre elas e será analisado o comportamento do solo no qual as sapatas estarão apoiadas.

## **1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação está dividida em cinco capítulos:

O primeiro capítulo aborda a introdução, o objetivo e apresentação dos demais capítulos.

No segundo capítulo será apresentado o referencial teórico utilizado para a elaboração do software.

O terceiro capítulo realiza a apresentação do Programa Sapatas, assim como todas as suas funcionalidades.

Já no capítulo quatro será feita a apresentação e a análise dos casos que serão estudados, assim como os resultados e a discussão.

Finalizando com o capítulo cinco que constará a conclusão e abordará tópicos para futuros trabalhos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 FUNDAÇÕES**

Fundação é o elemento estrutural responsável por transferir as cargas actuantes de uma edificação para o solo. As fundações podem ser divididas em duas categorias: fundações superficiais e fundações profundas, a seguir serão explicadas cada uma delas.

#### **2.1.1 Fundações superficiais**

Se caracterizam por transferir as cargas para camadas de solos mais superficiais. Os tipos de fundações superficiais mais empregados são: sapatas, blocos e radiers.

A sapata é caracterizada por ser uma estrutura de betão armado responsável por transferir as cargas para o solo. Os formatos da base da sapata mais comum são: rectangular, quadrada e circular.

A sapata pode ser isolada quando é responsável por suportar e transmitir apenas as cargas de um único pilar ( Figura 1 (a)). Sapata corrida que é caracterizada por receber cargas lineares como um muro, parede estrutural ou um conjunto de pilares alinhados. E a sapata associada é aquela que recebe mais de um pilar, porém estes não estão alinhados (Velloso e Lopes, 2011).

Os blocos de fundação podem ser feitos com betão simples, sem a necessidade de armadura. Utilizados quando os esforços de tracção que actuam sobre eles são muito pequenos e assim consigam suportá-los (Velloso e Lopes, 2011) ( Figura 1 (b)).

O radier é uma camada de betão aplicada sobre uma superfície horizontal responsável por suportar todas as cargas vindas da estrutura construída acima. Geralmente é empregado em construções mais leves e sobre solos que apresentam boa capacidade de carga (Velloso e Lopes, 2011) ( Figura 1 (c)).

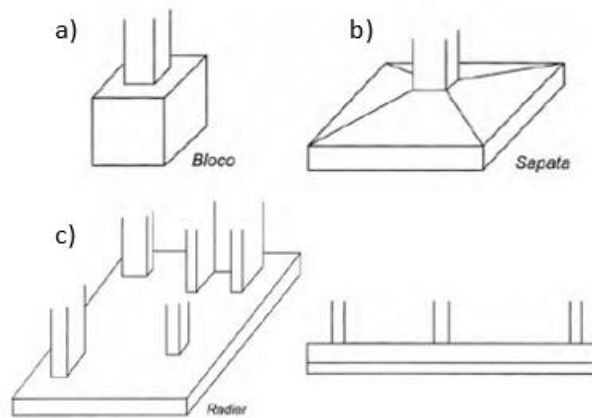


Figura 1 - Tipos de fundações superficiais: (a) Bloco, (b) Sapata isolada e (c) Radier

Fonte: Velloso e Lopes (2011), adaptado

### 2.1.2 Fundações profundas

Responsáveis por transferir as cargas a camadas de solos mais profundas. Essas cargas podem ser transferidas pela sua base ou pela sua superfície lateral (ABNT NBR 6122, 2019). Esse tipo de fundação é adotado quando não é possível utilizar fundações superficiais, pois elas são mais econômicas e seu método construtivo é mais simples (Conduto et al., 2001).

Os tipos de fundações profundas mais comuns são: estacas e tubulões.

As estacas são elementos de fundação profunda e sua construção pode ser realizada por escavação, cravação ou pela mistura dos dois processos. (Figura 3 (a))

Segundo Hachich (1998) as estacas podem ser classificadas de acordo com a técnica empregada para a sua execução. Abaixo, na Figura 2, encontra-se o quadro com essa classificação.

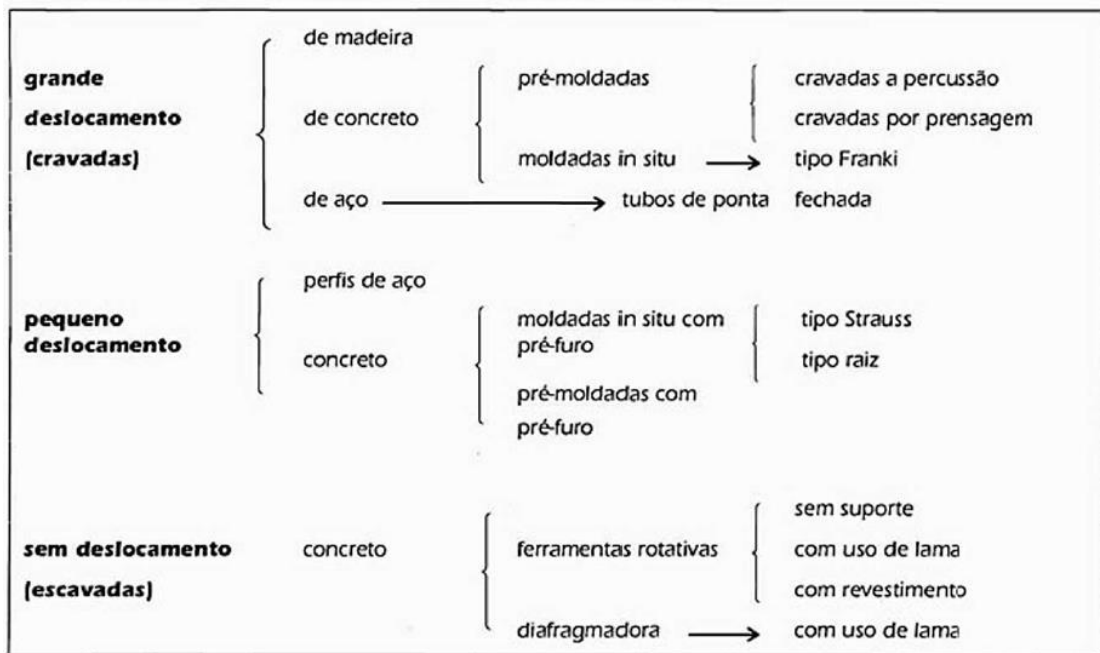


Figura 2– Classificação dos principais tipos de estacas pelo método executivo

Fonte: Hachiche (1998)

O tubulão também é responsável por transferir as cargas a camadas de solos mais profundas e é caracterizado pela necessidade da descida de um operário até a sua base para poder alargá-la. (Figura 3 (b))

A Figura 3 mostra a representação de uma estaca e um tubulão.

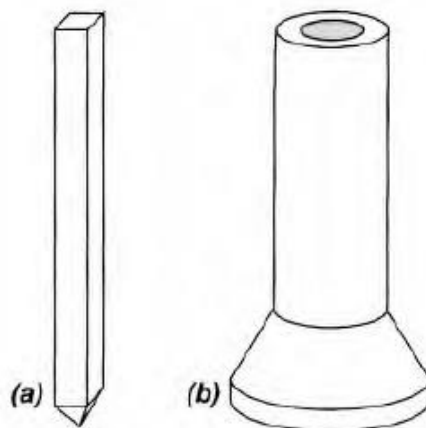


Figura 3- Fundações profundas: (a) Estacas e (b) Tubulões

Fonte: Velloso e Lopes (2011)

Além disso, também é possível a execução de fundações mistas, como sapata sobre estaca e radier sobre estaca ou tubulão (Hachich ,1998).

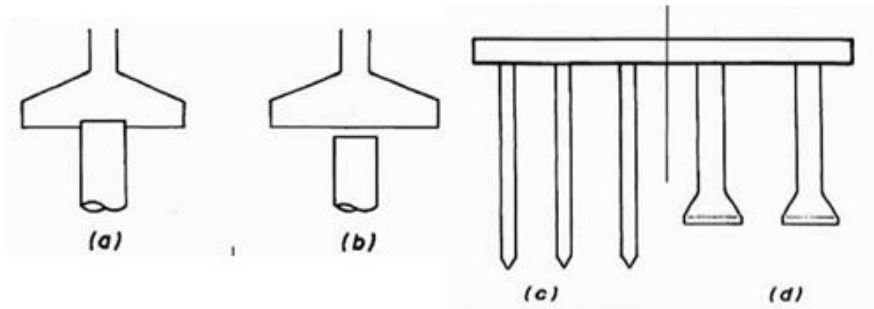


Figura 4– Tipos de fundação mista: (a) estaca ligada a sapata, (b) estaca abaixo de sapata, (c) radier sobre estacas e (d) radier sobre tubulões

Fonte: Hachich (1998)

## 2.2 ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGA DO SOLO

Esta subsecção abordará os métodos teóricos utilizados para determinar a capacidade de carga do solo das sapatas de fundação.

Ao aplicar uma carga vertical sobre uma sapata (com largura  $B$  e comprimento  $L$  e profundidade de embutimento  $h$ ) irá surgir tensões resistente no solo. Com o aumento gradual dessa carga irá ocorrer o aumento das tensões e produzirá uma superfície potencial de ruptura no interior do solo. O momento em que irá ocorrer a ruptura é determinado como capacidade de carga do solo (Cintra, Aoki e Albiero, 2011). A Figura 5 mostra o sistema sapata-solo.

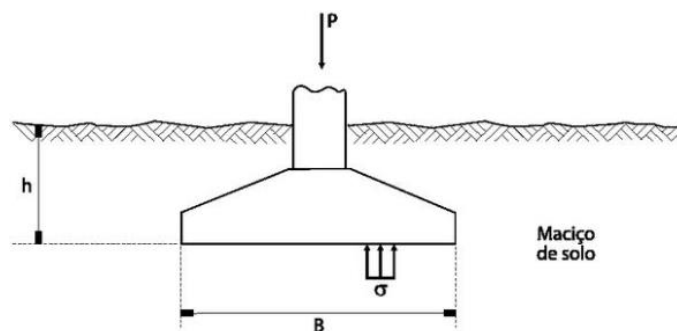


Figura 5– Sistema sapata-solo

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero, (2011)

O valor médio das tensões é determinado pela Equação (1) abaixo:

$$\sigma = \frac{P}{B \times L} \quad (1)$$

Onde:

P (kN) é o representado pela carga do pilar;

B (m) é a largura da sapata;

L (m) é o comprimento da sapata;

$\sigma$  (kN/m<sup>2</sup>) é a tensão admissível.

O aumento da carga aplicada sobre a sapata ocasiona deslocamentos e o aumento desses deslocamentos leva a ruptura do solo. Vários estudos foram realizados e determinaram que essa ruptura pode se comportar de três formas: ruptura geral, ruptura local e ruptura por punção, conforme a Figura 6.

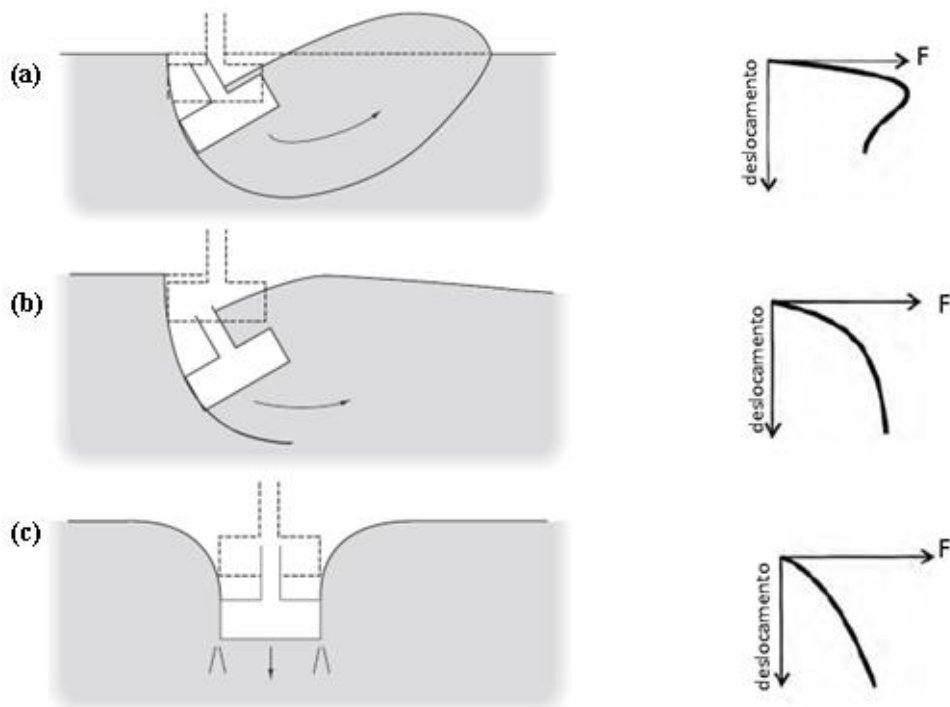


Figura 6– Modos de ruptura da capacidade de carga: (a) ruptura geral; (b) ruptura local e (c) ruptura por punção

Fonte: Conduto, et al. (2001), adaptada

A ruptura geral e a ruptura por punção foi proposta por Karl von Terzaghi em 1943 e Aleksandar Vesic em 1975 introduziu o terceiro conceito de ruptura, que é a ruptura local.

A ruptura geral ocorre em solos mais resistentes, como solos arenosos muito compacto e em solos argilosos rígidos. Pode-se observar (Figura 6, (a)) que o aumento da força aplicada na sapata gera pouco deslocamento, a sua ruptura ocorre com o tombamento da sapata e a movimentação do solo para a superfície (Cintra, Aoki e Albiero, 2011).

A ruptura local é um caso intermediário, entre a ruptura geral e a ruptura por punção. Ela ocorre em solos mediantemente compactos e mediantemente rígidos. Além do assentamento da sapata, também ocorre o seu tombamento, porém o levantamento de solo para a superfície é mais acentuado que no primeiro caso (Figura 6, (b)). O seu valor pode ser obtido através da média aritmética dos valores da ruptura por punção e ruptura geral (Cintra, Aoki e Albiero, 2011).

Já na ruptura por punção ocorre em solos mais deformáveis, como o caso de areias fofas e argilas moles. Pode se observar que com o aumento gradual da força aplicada, o solo se deforma gerando deslocamento da sapata no sentido vertical, neste caso não há o levantamento do solo para a superfície, pois não ocorre o tombamento da sapata (Figura 6, (c)) (Cintra, Aoki e Albiero, 2011).

### **2.2.1 Teoria de Terzaghi**

Terzaghi apresentou as equações para calcular a capacidade de carga das fundações. Em seus estudos ele estabeleceu três hipóteses iniciais:

- Primeiramente ele desconsiderou a resistência ao cisalhamento do solo acima da cota onde está apoiada a sapata e substituiu por uma sobrecarga ( $q$ ), como demonstrado na Equação (2);
- Depois, considerou uma sapata corrida de largura  $2b$ ;
- Por último, adotou um maciço de solo rígido e semi-infinito, ou seja, ruptura geral.

$$q = \gamma \times h \quad (2)$$

Onde:

$\gamma$  (kN/m<sup>3</sup>) peso específico do solo;

$h$  (m) é a espessura da camada de solo acima da sapata.

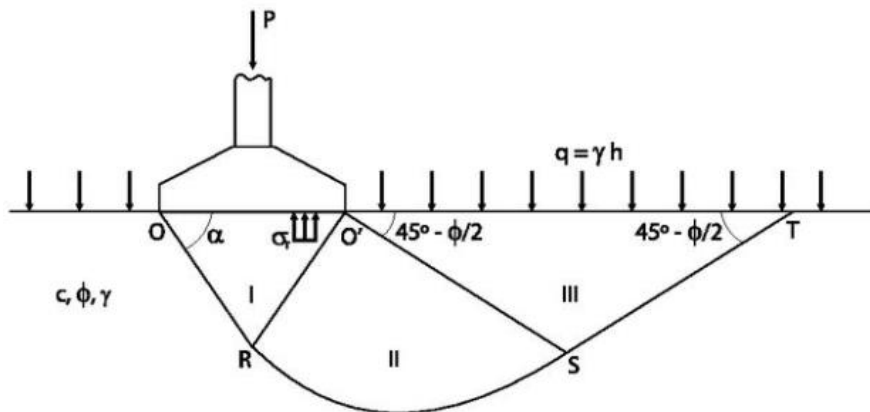


Figura 7– Superfície potencial de ruptura

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero, (2011) *apud* Terzaghi (1943)

A Figura 7 acima representa a superfície de ruptura dividida em três zonas (I, II e III). A zona I movimenta-se para baixo levando ao escorregamento da zona II e conseqüentemente o levantamento do solo da zona III (Cintra, Aoki e Albiero, 2011).

Terzaghi analisou alguns casos simplificados, o primeiro deles foi o caso para uma sapata localizada na superfície do terreno e um solo sem peso, então ele considerou a coesão ( $c$ ) diferente de zero, a altura de embutimento ( $h$ ) igual a zero e o peso específico ( $\gamma$ ) igual a zero. Ludwig Prandtl em 1921 já havia realizado o estudo para esse caso (Cintra, Aoki e Albiero, 2011).

Encontrou-se para a capacidade de carga a seguinte expressão:

$$\sigma_r = cN_c \quad (3)$$

Onde:

$$N_c = \cot g\phi \left[ e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

O factor " $N_c$ " depende unicamente do ângulo de atrito.

O segundo caso analisado por Terzaghi foi para um solo não coesivo e sem peso, ou seja, ele considerou a coesão(c) igual a zero, a altura de embutimento (h) diferente de zero e o peso específico ( $\gamma$ ) igual a zero. Este modelo foi estudado por Hans Reissner em 1924 (Cintra, Aoki e Albiero, 2011).

Encontrou-se para a capacidade de carga a seguinte expressão:

$$\sigma_r = qN_q \quad (5)$$

Onde:

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (6)$$

$$q = \gamma \times h \quad (7)$$

O factor " $N_q$ " depende unicamente do ângulo de atrito.

E o terceiro caso foi para um solo não coesivo e a sapata à superfície do terreno, neste caso adoptou-se a coesão(c) igual a zero, a altura de embutimento (h) igual a zero e o peso específico ( $\gamma$ ) diferente de zero. (Cintra, Aoki e Albiero, 2011)

Encontrou-se para a capacidade de carga a seguinte expressão:

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (8)$$

Onde:

$$N_\gamma = \frac{4E_p}{\gamma B^2} \cos(\alpha - \phi) \quad (9)$$

O factor " $N_\gamma$ " não depende unicamente do ângulo de atrito, mas também de  $\alpha$ .

Finalmente, a partir da análise dos três casos de estudos, Terzaghi chegou à formulação generalizada para a capacidade de carga da fundação descrita na Equação (10) (Cintra, Aoki e Albiero, 2011).

$$\sigma_r = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad (10)$$

Onde:

$c$  (kPa) é a coesão do solo;

$q$  (kPa) é a tensão efectiva vertical ao nível da base da sapata;

$\gamma$  (kN/m<sup>3</sup>) é o peso específico do solo;

$B$  (m) é a largura da sapata.

Os valores de  $N_c$ ,  $N_q$  e  $N_\gamma$  estão representados na Figura 8 abaixo:

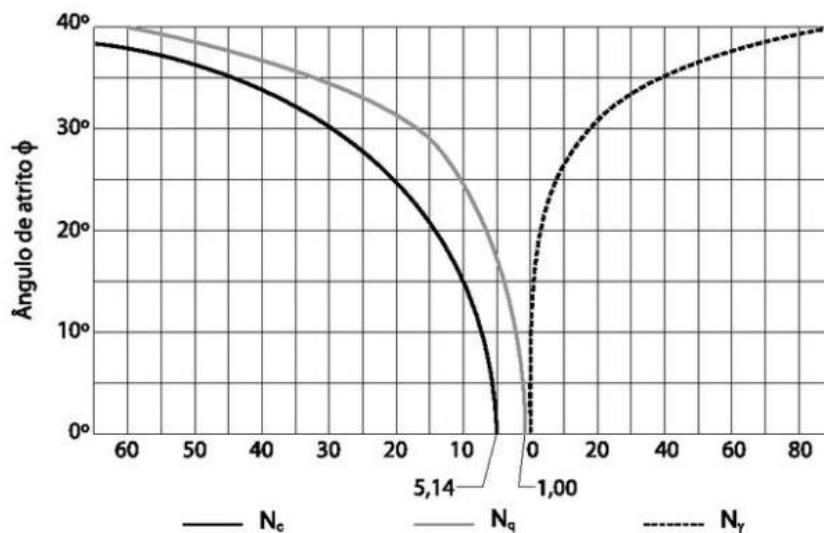


Figura 8 - Fatores de capacidade de carga

Fonte: Cintra e Aoki *apud* Terzaghi e Peck (1967)

Terzaghi propôs para o caso de ruptura por punção adoptar os seguintes valores para os parâmetros do solo:

$$\tan\phi^* = \frac{2}{3}\tan\phi \quad (11)$$

$$c^* = \frac{2}{3}c \quad (12)$$

Obtendo a Equação (13) da capacidade de carga para o caso de ruptura por puncionamento:

$$\sigma_r = c^*N_c^* + qN_q^* + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma^* \quad (13)$$

Os valores de  $N_c^*$ ,  $N_q^*$  e  $N_\gamma^*$  são determinados pelo valor da  $\tan\phi^*$ .

### 2.2.2 Contribuição de Vesic

Vesic também teve grande contribuição para o desenvolvimento do cálculo da capacidade de carga. Vesic respaldou-se em várias formulações teóricas e trabalhos práticos de outros autores. Ele propôs a utilização do factor de capacidade de carga  $N_\gamma$  (Equação (14)) desenvolvida por Albert Caquot e Jean Kérisel. Com isso e com os factores  $N_c$  e  $N_q$  ele calculou os valores dos factores da capacidade de carga em função de  $\phi$  (ângulo de atrito do solo) (Velloso e Lopes, 2011).

$$N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\phi \quad (14)$$

Os valores dos factores da capacidade de carga proposto por Vesic se encontra na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Fatores da Capacidade de Carga

$\emptyset$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$\emptyset$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5,14	1,00	0,00	28	25,80	14,72	16,72
				29	27,86	16,44	19,34
5	6,49	1,57	0,45	30	30,14	18,40	22,40
				31	32,67	20,63	25,99
10	8,35	2,47	1,22	32	35,49	23,18	30,22
				33	38,64	26,09	35,19
15	10,98	3,94	2,64	34	42,16	29,44	41,06
16	11,63	4,34	3,06	35	46,12	33,30	48,03
17	12,34	4,77	3,53	36	50,59	37,75	56,31
18	13,10	5,26	4,07	37	55,63	42,92	66,19
19	13,93	5,80	4,68	38	61,35	48,93	78,03
20	14,83	6,40	5,39	39	67,87	55,96	92,25
21	15,82	7,07	6,20	40	75,31	64,20	109,41
22	16,88	7,82	7,13	41	83,86	73,90	130,22
23	18,05	8,66	8,20	42	93,71	85,38	155,55
24	19,32	9,60	9,44	43	105,11	99,02	186,54
25	20,72	10,66	10,88	44	118,37	115,31	224,64
26	22,25	11,85	12,54	45	133,88	134,88	271,76
27	23,94	13,20	14,47				

Fonte: Cintra, Aoki e Albiero, (2011) *apud* Vesic (1975)

De acordo com Conduto, et al. (2001), Vesic também propôs os seguintes factores para o cálculo da capacidade de carga:

$S_c, S_q, S_\gamma$  = factores de forma

$d_c, d_q, d_\gamma$  = factores de profundidade

$i_c, i_q, i_\gamma$  = factores de inclinação da carga

$b_c, b_q, b_\gamma$  = factores de inclinação da base

$g_c, g_q, g_\gamma$  = factores de inclinação do solo

A equação da capacidade de carga está representada na Equação (15) abaixo:

$$q_u = c'N_cS_c d_c i_c b_c g_c + qN_q S_q d_q i_q b_q g_q + 0,5\gamma'BN_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma b_\gamma g_\gamma \quad (15)$$

Para o caso de solos coesivos, que possuem o ângulo de atrito igual a zero, a equação da capacidade de carga ficou simplificada:

$$q_u = (2 + \pi)c_u N_c S_c d_c i_c b_c g_c + q \quad (16)$$

Com tudo, a equação incluída no Eurocódigo 7 teve como base a equação proposta por Vesic (1975).

### 2.2.3 Contribuição de Meyerhof

Meyerhof, em 1953, propôs o conceito de área efectiva para os casos de cargas excêntricas. Segundo Meyerhof, para uma sapata de fundação de base B, largura L, no qual actua uma carga V e possui uma excentricidade  $e$ , as tensões actuantes na base não terão uma distribuição linear, por isso, para solucionar o problema de forma simplificada, adoptou-se uma área inferior, chamada de área efectiva, para que as tensões de compressões sejam consideradas uniformes.

Quando há actuação de momentos  $M_x$  e  $M_y$  em torno dos eixos do plano das bases da sapata, além da carga vertical V (Figura 10), segundo Fernandes (2011), “o sistema de forças generalizadas (V,  $M_x$ ,  $M_y$ ) actuando no baricentro da fundação é estaticamente equivalente à força V aplicada no ponto P de coordenadas  $e_x$  e  $e_y$ .”

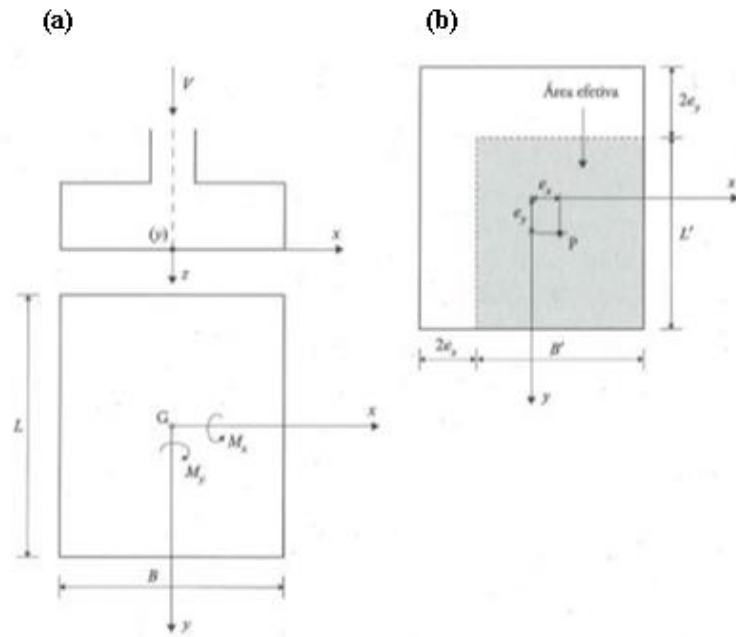


Figura 10 – Sapata retangular solicitada por carga vertical e momentos: (a) sistema de forças no baricentro da fundação e (b) área efetiva da sapata  
 Fonte: Fernandes (2011)

Portanto, a área efetiva da sapata é calculada de acordo com as equações abaixo:

$$e_x = \frac{M_y}{V} \quad (17)$$

$$e_y = \frac{M_x}{V} \quad (18)$$

$$B' = B - 2e_x \quad (19)$$

$$L' = L - 2e_y \quad (20)$$

$$A_{ef} = (B - 2e_x)(L - 2e_y) = B'L' \quad (21)$$

## 2.2.4 Determinação da tensão admissível do solo

A tensão admissível do solo, como mencionado acima, é obtida através de métodos analíticos, porém com o intuito de simplificar esse processo, é possível utilizar um quadro (Tabela 2), o qual fornece valores da tensão admissível para cada tipo de terreno, sob certas condições. A utilização da tabela é indicada para a realização de estimativas ou na elaboração de desenhos na fase de anteprojeto, ou até para construções de pequeno porte.

Tabela 2 - Tensão admissível do solo

Grupos	Tipo de terreno	Tensão admissível de cálculo (kPa) (*)	
		Solo seco	Solo submerso
Rochas	Rochas duras e sãs	10000	
	Rochas pouco duras ou medianamente alteradas	3000	
	Rochas brandas ou muitos alteradas	1000	
Solos incoerentes	Areias e misturas areias-seixo, bem graduadas e compactas	400-600	200-300
	Areias e misturas areias-seixo, bem graduadas mas soltas	200-400	100-200
	Areia uniforme compactos	200-400	100-200
	Areia uniforme soltas	100-200	50-100
Solos coerentes	Solos coerentes rijos	400-600	
	Solos coerentes duros	200-400	
	Solos coerentes duros	50-100	
	Solos coerentes moles	-	
	Solos coerentes muito moles	-	

Fonte: Brazão Farinha e Correia dos Reis (1998)

(\*) Aos valores indicados na tabela corresponde um coeficiente de segurança de cerca de 2 em relação à capacidade de carga por corte do terreno de fundação.

"Solo seco" significa que o nível freático se encontra a uma profundidade. abaixo do nível da fundação, superior à largura da sapata. Nos solos incoerentes, os valores

indicados referem-se a sapatas de largura  $b = 1$  metro. Pressupõe-se que se verificam as seguintes condições:

- no local da construção e zonas adjacentes o terreno é sensivelmente horizontal;
- as camadas de terreno são também sensivelmente horizontais;
- não existem formações mais moles. abaixo do nível das fundações;
- não pode haver intervenções locais de que possam resultar reduções da resistência do terreno da fundação.

As rochas são consideradas como os mais favoráveis terrenos de fundação, desde que sejam sãs. Se apresentam zonas alteradas ou fraturadas, devem ser cuidadosamente estudadas.

### **2.2.5 Pré-dimensionamento de sapatas quanto a sua forma em planta**

Para que o pré-dimensionamento da sapata seja feito é necessário determinar a sua geometria. Tendo em conta que para realizar o cálculo para obter as dimensões da sapata é indispensável ter a tensão admissível do solo e para obter a tensão admissível do solo é imprescindível que tenha a geometria da sapata, o resultado é um processo iterativo. Por tanto, para realizar esse pré-dimensionamento utilizou-se as informações da Tabela 2 para obter a tensão admissível do solo e em seguida realizar o cálculo das dimensões da sapata.

Pode-se destacar quatro tipos de sapatas (DA CUNHA TEIXEIRA, 2015 apud Quintã, 1987):

Sapata proporcionada: é uma sapata proporcionada à solicitação exercida sobre ela, ou seja, aos momentos a que está sujeita. (Figura 9 )

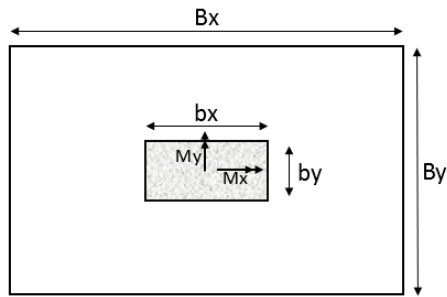


Figura 9 - Sapata proporcionada

Fonte: Elaborado pela autora.

Calcula-se da seguinte forma:

$$B_x = \sqrt{\frac{N \times 1,1}{\sigma_{adm}}} + 2e_x \quad (22)$$

$$B_y = \sqrt{\frac{N \times 1,1}{\sigma_{adm}}} + 2e_y \quad (23)$$

Sapata quadrada: é a sapata que possui dimensões iguais nas duas direções. (Figura 10).

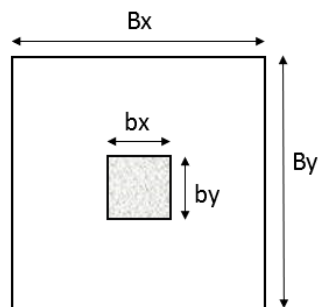


Figura 10 - Sapata quadrada

Fonte: Elaborado pela autora.

Cumpra a seguinte relação:

$$B_x = B_y \quad (24)$$

Calcula-se da seguinte forma:

$$B_x = B_y = e_x + e_y + \sqrt{(e_y - e_x)^2 + \frac{1,1 \times N_{Ed}}{\sigma_{adm}}} \quad (25)$$

Sapata com bordos equidistantes: é a sapata cuja distância entre a face do pilar e a face da sapata são iguais nas duas direções. (Figura 11)

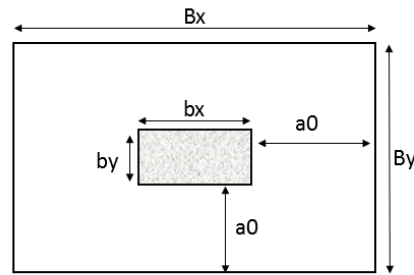


Figura 11 - Sapata com bordos equidistantes

Fonte: Elaborado pela autora.

Cumpra a seguinte relação:

$$B_x = b_x + 2a_0 \quad (26)$$

$$B_y = b_y + 2a_0 \quad (27)$$

Calcula-se da seguinte forma:

$$B_y = -\alpha + e_x + e_y + \sqrt{(\alpha + e_y - e_x)^2 + \frac{1,1 \times N_{Ed}}{\sigma_{adm}}} \quad (28)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{b_x - b_y}{2} \quad (29)$$

$$Bx = By + 2\alpha \quad (30)$$

Sapata homotética: é a sapata que possui dimensões proporcionais as dimensões do pilar. (Figura 12)

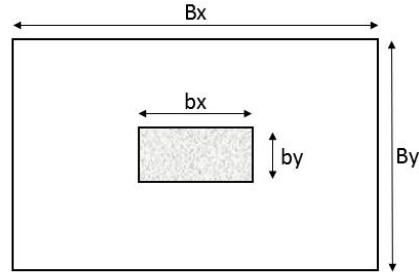


Figura 12 - Sapata homotética

Fonte: Elaborado pela autora.

Cumpra a seguinte relação:

$$\frac{b_x}{b_y} = \frac{B_x}{B_y} \quad (31)$$

Calcula-se da seguinte forma:

$$B_y = \frac{1}{\beta} \left( e_y \times \beta + e_x + \sqrt{(e_y \times \beta - e_x)^2 + \beta \frac{1,1 \times N_{Ed}}{\sigma_{adm}}} \right) \quad (32)$$

Onde:

$$\beta = \frac{b_x}{b_y} \quad (33)$$

$$B_x = B_y \times \beta \quad (34)$$

De acordo com a semelhança das equações acima pode-se simplificar as expressões de forma a se encaixarem em uma fórmula geral (35):

$$B_y = \frac{1}{\beta} \left( -\alpha + e_y \times \beta + e_x + \sqrt{(\alpha + e_y \times \beta - e_x)^2 + \beta \frac{1,1 \times N_{Ed}}{\sigma_{adm}}} \right) \quad (35)$$

$$B_x = B_y \times \beta + 2\alpha \quad (36)$$

Os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  estão definidos na Tabela 3:

Tabela 3 - Valores dos coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  para o pré-dimensionamento dos vários tipos de sapatas

<b>Tipo de Sapata</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\beta</math></b>
Homotética	0	$\frac{b_x}{b_y}$
Bordos equidistantes	$\frac{b_x - b_y}{2}$	1
Quadrada	0	1
Proporcionada	$e_x - e_y$	1

Fonte: Teixeira (2015)

## 2.3 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA SEGUNDO OS EUROCÓDIGOS 2 E 7

### 2.3.1 Eurocódigo 7

Nesta subsecção será abordado os conceitos do Eurocódigo 7 (EC7) aplicados no dimensionamento de fundações superficiais, em especial as sapatas isoladas. A aplicação do EC7 deve estar em conformidade com os demais Eurocódigos. Assim como o EC0 (Bases para o projeto de estruturas), EC1 (Ações em estruturas) e o EC2 (Projecto de estruturas de betão).

O EC7 está dividido em duas partes, a primeira é responsável por estabelecer as regras gerais para o dimensionamento geotécnico e a segunda se dedica a investigação geotécnica através de ensaios de campo e de laboratório.

De acordo com EC7 (2010) pode-se utilizar três métodos de cálculos: método analítico, método semiempírico e o método numérico. O presente trabalho fará o uso do método analítico através de formulações teóricas.

De acordo com EC0 (2010) a verificação dos estados limites devem ser realizada pelo método dos coeficientes parciais de segurança. Portanto, todas as combinações devem ser verificadas para que nenhum estado limite seja excedido.

### 2.3.1.1 Os valores de cálculo

Os valores representativos de cálculo, descritos no EC7 são mostrados abaixo:

- Os valores representativos de cálculo das ações são determinados pelo valor característico combinado com os coeficientes parciais, da seguinte forma:

$$F_d = \gamma_f \times F_{rep} \quad (37)$$

Sendo:

$$F_{rep} = \psi F_k \quad (38)$$

Onde:(37)

$F_k$  é o valor característico da ação;

$F_{rep}$  é o valor representativo da ação;

$\gamma_f$  é o coeficiente parcial relativo à ação, utilizado em situações persistentes ou transitórias;

$\psi$  coeficiente igual a 1 ou  $\psi_0$ ,  $\psi_1$  ou  $\psi_2$ , valores estabelecidos pelo EC0. Tem a ver com os critérios de combinação das ações.

- Os valores de cálculo dos parâmetros geotécnicos são determinados pelo valor característico dividido pelo coeficiente parcial, da seguinte forma:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (39)$$

Onde:

$X_k$  é o valor característico do parâmetro geotécnico;

$X_d$  é o valor de cálculo do parâmetro geotécnico;

$\gamma_M$  é o coeficiente parcial relativo a parâmetro geotécnico, utilizado em situações persistentes ou transitórias;

- Os valores de cálculo das grandezas geométricas podem ser representados pelos valores nominais, em caso de apresentar desvios dos parâmetros geométricos desfavoráveis devem ser considerados, como mostra a seguir:

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a \quad (40)$$

Onde:

$a_{nom}$  é o valor nominal;

$a_d$  é o valor de cálculo das grandezas geométricas;

$\Delta a$  representa a possibilidade de desvios desfavoráveis.

### 2.3.1.2 Estados limites últimos

O Eurocódigo 7 (2010) em 2.4.7 determina que a verificação do estado limite último deve ser feita quando for relevante para cada situação descritas a seguir:

- Perda de equilíbrio da estrutura ou do terreno (EQU);

- Rotura interna ou deformação excessiva da estrutura ou elementos estruturais (STR);
- Rotura ou deformação excessiva do terreno (GEO);
- Perda de equilíbrio da estrutura ou do terreno devida à pressão da água (UPL);
- Levantamento hidráulico (HYD).

Porém, o EC7 (2010, p.35) diz em nota que:

*“O estado limite GEO é frequentemente crítico no que respeita ao estabelecimento das dimensões dos elementos estruturais envolvidos em fundações ou estruturas de suporte e, por vezes, no que respeita à capacidade resistente dos elementos estruturais.”*

Portanto, será abordado na presente dissertação a verificação para o estado limite último geotécnico (GEO) e o estado limite último estrutural (STR). Para isso, será verificada a capacidade resistente do terreno ao carregamento e a capacidade resistente ao deslizamento e a verificação de segurança à flexão.

Para verificar a capacidade resistente de ruptura do terreno ao carregamento (GEO) deve satisfazer a Equação (41) abaixo:

$$E_d \leq R_d \quad (41)$$

Onde:

$E_d$  é o valor de cálculo do efeito das ações;

$R_d$  é o valor de cálculo das capacidades resistentes da fundação.

De acordo com o EC7 (2010) em 2.4.7.3.2, para determinar valores de cálculo dos efeitos das ações ( $E_d$ ), os coeficientes parciais para as ações deverão ser aplicados às próprias ações ( $F_{rep}$ ) ou aos seus efeitos (E):

$$E_d = E\{\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d\} \quad (42)$$

$$E_d = \gamma_E E\{F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d\} \quad (43)$$

De acordo com o EC7 (2010) em 2.4.7.3.3, para determinar valores de cálculo das capacidades resistentes  $R_d$ , os coeficientes parciais deverão ser aplicados às propriedades do terreno (X), às capacidades resistentes (R) ou a ambas:

$$R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d\} \quad (44)$$

$$R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k; a_d\}/\gamma_R \quad (45)$$

$$R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d\}/\gamma_R \quad (46)$$

O modo de aplicação de cada expressão é determinado através de três abordagens de cálculo diferentes. Porém, em Portugal o método utilizado é a abordagem de cálculo 1. Para este tipo de abordagem são aplicadas as expressões (45) e (46).

Portanto, em conformidade com o EC0, a combinação de ações para situação de projecto persistentes ou transitórias pode ser expressa como: (FERNANDES, 2011)

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (47)$$

Para a combinação de ações para situação de projecto sísmicas pode ser expressa como: (FERNANDES, 2011)

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} A_{Ed} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (48)$$

“+” :Significa “em combinação com”;

$\Sigma$  :significa “o efeito combinado de”;

$Gk,j$ : Valores característicos das ações permanentes;

$Qk,1$ : Valor característico da ação variável base;

$Qk,i$  Valores característicos das outras ações variáveis;

$A_{Ed}$ : Valor de cálculo da ação sísmica;

$\gamma_{Q,1}$ : Coeficiente de segurança parcial para a ação variável  $i$ ;

Abaixo, encontra-se o quadro (Tabela 4) para situações persistentes e transitórias na verificação de segurança a estados limites últimos para STR e o GEO, de acordo com a abordagem de cálculo 1. Onde a combinação 1 é para o STR e a combinação 2 é para o GEO.

Tabela 4 - Abordagem de Cálculo 1 - coeficientes de segurança parciais relativos às ações e às propriedades do terreno

Combinação	Ações ( $\gamma_F$ )			Propriedades do terreno ( $\gamma_M$ )		
	Permanentes ( $\gamma_G$ )		Variáveis ( $\gamma_Q$ )	Tg $\Phi'$	c'	c <sub>u</sub>
	Desfavoráveis	Favoráveis	Desfavoráveis			
1	1,35	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,30	1,25	1,25	1,40

Fonte: NP EN 1997-1 (2010)

Capacidade resistente do terreno

O método de cálculo analítico para determinar a capacidade resistente do terreno ao carregamento é apresentado no Anexo D do EC7. (Equações (49) e (66))

Para o caso de condições drenadas do solo a capacidade resistente do terreno ao carregamento é determinada da seguinte forma:

$$R/A' = c'N_c b_c S_c i_c + q'N_q b_q S_q i_q + 0,5\gamma'N_\gamma b_\gamma S_\gamma i_\gamma \quad (49)$$

Deste modo, a obtenção dos fatores corretivos são calculados da seguinte forma:

- Capacidade resistente do terreno ao carregamento:

$$N_q = e^{\pi t g \phi'} t g^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (50)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad (51)$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \phi' \quad (52)$$

- Inclinação da base da fundação:

$$b_c = b_q - (1 - b_q) / (N_c \tan \phi') \quad (53)$$

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \tan \phi')^2 \quad (54)$$

- Forma da fundação:

$$S_q = 1 + \left( \frac{B'}{L'} \right) \tan \phi' \quad \text{para uma forma retangular} \quad (55)$$

$$S_q = 1 + \tan \phi' \quad \text{para uma forma quadrada ou circular} \quad (56)$$

$$S_\gamma = 1 - 0,3 \left( \frac{B'}{L'} \right) \quad \text{para uma forma retangular} \quad (57)$$

$$S_\gamma = 0,7 \quad \text{para uma forma quadrada ou circular} \quad (58)$$

$$S_c = \frac{S_q N_q - 1}{N_q - 1} \quad \text{para uma forma retangular, quadrada ou circular} \quad (59)$$

- Inclinação da carga, causada por uma força horizontal  $H$ :

$$i_c = i_q - (1 - i_q)/(N_c \tan \phi') \quad (60)$$

$$i_q = [1 - H/(V + A'c' \cot \phi')]^m \quad (61)$$

$$i_y = [1 - H/(V + A'c' \cot \phi')]^{m+1} \quad (62)$$

Em que:

$$m = m_B = \frac{\left[2 + \left(\frac{B'}{L'}\right)\right]}{\left[1 + \left(\frac{B'}{L'}\right)\right]} \text{ quando H atua na direção de B'} \quad (63)$$

$$m = m_L = \frac{\left[2 + \left(\frac{B'}{L'}\right)\right]}{\left[1 + \left(\frac{B'}{L'}\right)\right]} \text{ quando H atua na direção de L'} \quad (64)$$

Nos casos em que a componente horizontal da carga atua numa direção formando um ângulo  $\theta$  com a direção de  $L'$ ,  $m$  poderá ser calculado por:

$$m = m_\theta = m_L \cos^2 \theta + m_B \sin^2 \theta \quad (65)$$

E para o caso de condições não drenadas do solo, a capacidade resistente do terreno ao carregamento é determinada da seguinte forma:

$$R/A' = (\pi + 2)c_u N_c b_c S_c i_c + q \quad (66)$$

Deste modo, a obtenção dos fatores corretivos sofrem algumas alterações, apresentando-se como:

Inclinação da base da fundação:

$$b_c = 1 - \frac{2\alpha}{(\pi + 2)} \quad (67)$$

Forma da fundação:

$$s_c = 1 + 0,2 \left( \frac{B'}{L'} \right) \text{ para uma forma retangular} \quad (68)$$

$$s_c = 1,2 \text{ para uma forma quadrada ou circular} \quad (69)$$

Inclinação da carga, causada por uma carga horizontal  $H$ :

$$i_c = \frac{1}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{H}{A'c_u}} \right] \text{ com } H \leq A'c_u \quad (70)$$

Além desses fatores corretivos, também é possível a introdução de outros como os coeficientes corretivos da capacidade resistente para ter em conta a presença do firme a profundidade  $H$  abaixo da base da fundação (Figura 13). Este problema foi estudado por Mandel e Salençon que obtiveram os fatores corretivos  $f_c$ ,  $f_q$  e  $f_\gamma$  (Fernandes, 2011).

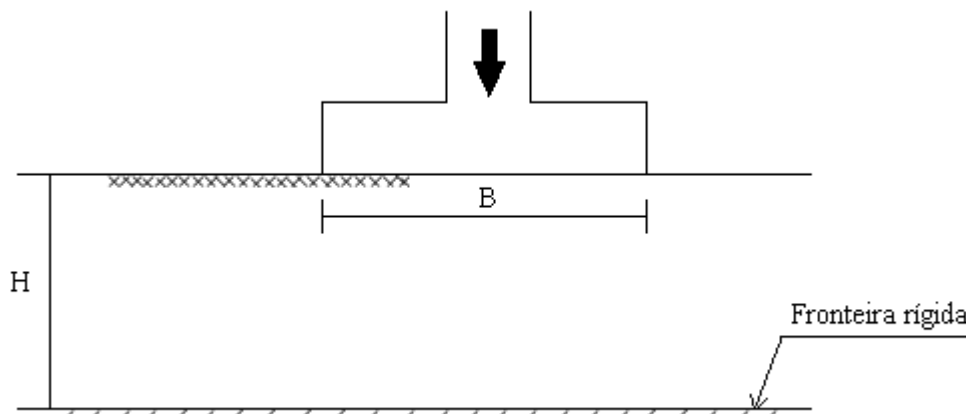


Figura 13– Profundidade  $H$  abaixo da base da fundação para cálculo de capacidade resistente

Fonte: Fernandes (1995), adaptado

Tabela 5 - Valores de  $f_c$ 

B/H $\phi$	0 a 1	1	2	3	4	5	6	8	10
0°	1	1 (B/H ≤ 1,41)	1,02	1,11	1,21	1,30	1,40	1,59	1,78
20°	1 (B/H ≤ 0,86)	1,01	1,39	2,12	3,29	5,17	8,29	22,00	61,50
30°	1 (B/H ≤ 0,63)	1,13	2,50	6,36	17,4	50,20	(*)	(*)	(*)
36°	1 (B/H ≤ 0,50)	1,37	5,25	23,40	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
40°	1 (B/H ≤ 0,42)	1,73	11,10	82,20	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)

Fonte: Fernandes, (2011)

Tabela 6- Valores de  $f_q$ 

B/H $\phi$	0 a 1	1	2	3	4	5	6	8	10
0°	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20°	1 (B/H ≤ 0,86)	1,01	1,33	1,95	2,93	4,52	7,14	18,70	51,90
30°	1 (B/H ≤ 0,63)	1,12	2,42	6,07	16,50	47,50	(*)	(*)	(*)
36°	1 (B/H ≤ 0,50)	1,36	5,14	22,80	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
40°	1 (B/H ≤ 0,42)	1,72	10,90	80,90	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)

Fonte: Fernandes, (2011)

Tabela 7 – Valores de  $f_y$ 

B/H $\phi$	0 a 1	1	2	3	4	5	6	8	10
0°	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20°	1	1	1 (B/H ≤ 2,14)	1,07	1,28	1,63	2,20	4,41	9,82
30°	1	1 (B/H ≤ 1,30)	1,20	2,07	4,23	9,90	24,80	(*)	(*)

36°	1 (B/H ≤ 0,98)	1	1,87	5,60	21,00	(*)	(*)	(*)	(*)
40°	1 (B/H ≤ 0,81)	1,05	3,27	16,60	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)

Fonte: Fernandes, (2011)

Portanto, as equações (49) e (66) podem ser reescritas da seguinte forma:

Para condições drenadas do solo:

$$R/A' = c'N_c b_c S_c i_c f_c + q'N_q b_q S_q i_q f_q + 0,5\gamma'N_\gamma b_\gamma S_\gamma i_\gamma f_\gamma \quad (71)$$

Para condições não drenadas do solo:

$$R/A' = (\pi + 2)c_u N_c b_c S_c i_c f_c + q \quad (72)$$

### 2.3.1.3 Capacidade resistente ao deslizamento

A capacidade resistente ao deslizamento deve satisfazer a seguinte expressão (Equação (73)).

$$H_d \leq R_d \quad (73)$$

Em condições drenadas o valor da capacidade resistente ao deslizamento ( $R_d$ ) é calculado da seguinte forma:

$$R_d = V' \tan \delta_d \quad (74)$$

Para fundações de betão moldadas no local:

$$\delta_d = \emptyset \quad (75)$$

Para fundações pré-fabricadas:

$$\delta_d = \frac{2}{3} \phi \quad (76)$$

Em condições não drenadas o valor da capacidade resistente ao deslizamento ( $R_d$ ) é calculado da seguinte forma:

$$R_d = A' c_{u;d} \quad (77)$$

Onde:

$$c_u = 17 + 0,3\sigma'_{v_0} \quad (78)$$

### 2.3.2 Influência do nível freático

Para o cálculo da capacidade de carga do solo deve ser analisado a influência do nível freático.

Por isso, será feita uma análise da zona plastificada abaixo da sapata de acordo com o quadro de Meyerhof (Figura 14).

Meyerhof, em seus estudos, relacionou a influência do solo através do coeficiente de atrito com a menor dimensão da sapata ( $B$ ), considerando a outra dimensão como infinita. Com isso, obteve-se a profundidade ( $d$ ) e a distância ( $f$ ) de solo mobilizado pelo carregamento da sapata (Fernandes, 1995).

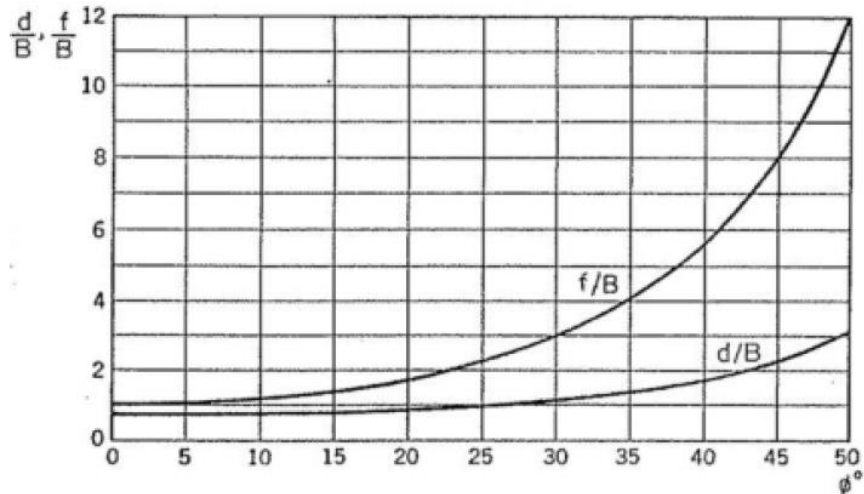


Figura 14 - Dimensões da zona plastificada da sapata

Fonte: Fernandes (2011)

Conclui-se que a zona plastificada é designada pela zona do solo afetada pelo carregamento da sapata. (Figura 15)

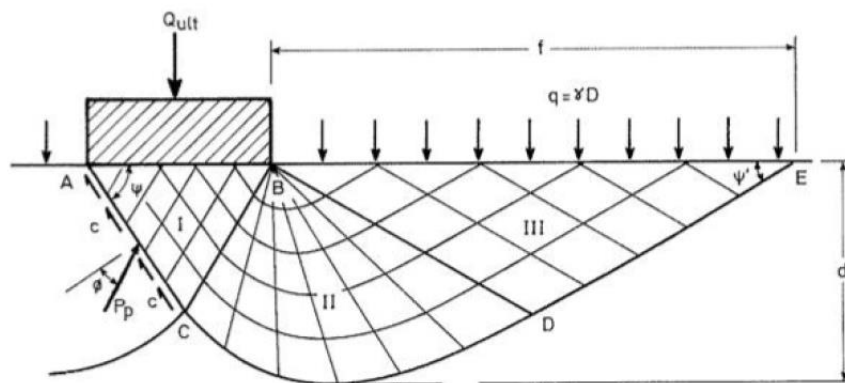


Figura 15 - Zona plastificada da sapata

Fonte: Fernandes 2011

Para o cálculo de  $d/b$  utilizou-se uma aproximação da curva do gráfico de Meyerhof para obter a seguinte expressão (79):

$$\frac{d}{B} = 0,0006 \phi^4 - 0,0087\phi^3 + 0,0534\phi^2 - 0,0949\phi + 0,7439 \quad (79)$$

O peso específico do solo ( $\gamma'$ ) influencia no valor da tensão admissível do solo, por isso, deve ser analisado a influência do nível freático para os três possíveis casos de estudos.

- Caso 1: O nível freático encontrasse na base da fundação ou acima dela. Neste caso, o peso específico do solo que será adotado é o submerso.

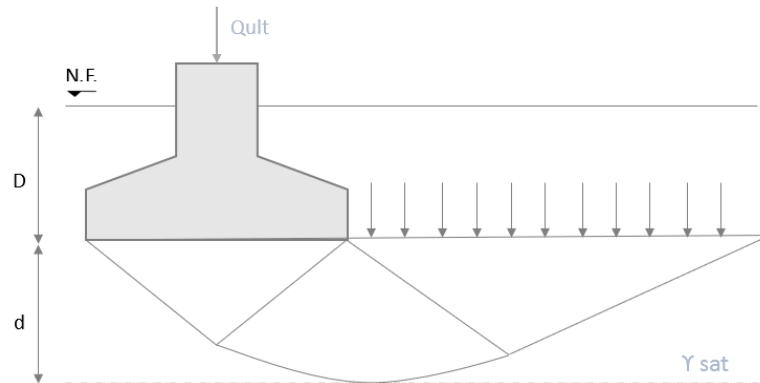


Figura 16 - Caso 1: O nível freático encontrasse na base da fundação ou acima dela.

Fonte: Elaborado pela autora.

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (80)$$

Sendo  $\gamma_w$  o peso específico da água, cujo valor é de  $9,81 \text{ kN/m}^3$ .

- Caso 2: O nível freático encontra-se entre a base da fundação e o limite da zona plastificada.

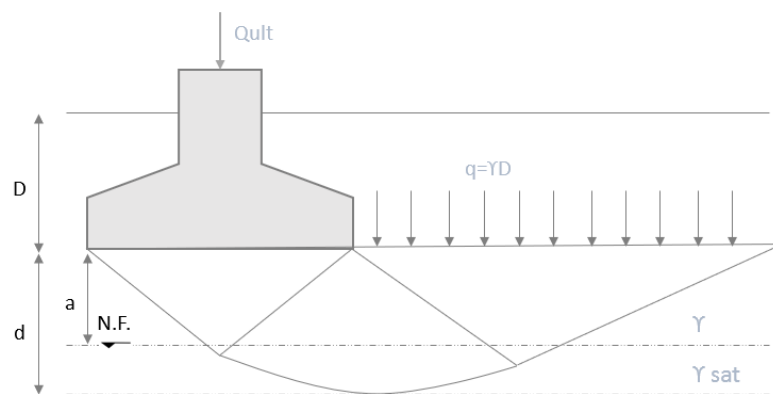


Figura 17 - Caso 2: O nível freático encontra-se entre a base da fundação e o limite da zona plastificada.

Fonte: Elaborado pela autora.

Neste caso o peso específico será obtido pela seguinte expressão:

$$\gamma' = \frac{(a \times \gamma) + [(d - a) \times (\gamma_{sat} - \gamma_w)]}{d} \quad (81)$$

- Caso 3: Nível freático encontra-se abaixo do limite da zona plastificada do solo.

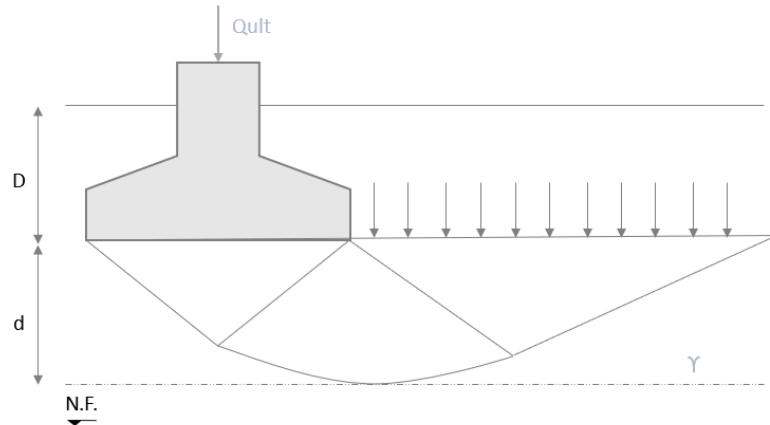


Figura 18 - Caso 3: Nível freático encontra-se abaixo do limite da zona plastificada do solo

Fonte: Elaborado pela autora.

Neste caso, o nível freático não afeta a capacidade de carga do solo, portanto o peso volúmico a utilizar será o natural.

$$\gamma' = \gamma \quad (82)$$

### 2.3.3 Eurocódigo 2

O EC 2 é aplicado a projetos de edifícios e de obras de engenharia civil de betão simples, betão armado e betão pré-esforçado. Ele descreve os princípios e os requisitos de segurança, de utilização e durabilidade das estruturas de betão e para isso, utiliza-se o conceito de estado limite com o método dos coeficientes parciais.

Considerando que as sapatas são fundações superficiais constituídas por betão, o seu projeto estrutural deve seguir as normas estabelecidas pelo Eurocódigo 2.

### 2.3.3.1 Bases para o projeto

De acordo com o EC2, o projeto de estruturas de betão deve estar em conformidade com as regras indicadas no Eurocódigo 0, por tanto, o cálculo em relação aos estados limites devem ser realizado pelo método dos coeficientes parciais de segurança, mencionado no subcapítulo anterior.

No tópico 2.4.2.4 do EC2 encontra-se os coeficientes parciais de segurança relativos aos materiais. Por tanto, os coeficientes parciais de segurança relativos aos materiais,  $\gamma_c$  e  $\gamma_s$ , são definidos para os estados limites últimos, de acordo com o quadro abaixo (Tabela 8).

Tabela 8 - Coeficientes parciais relativos aos materiais para os estados limites últimos

Situação de projeto	$\gamma_c$ para betão	$\gamma_s$ para aço de armaduras para betão armado
Persistentes Transitórias	1,5	1,15
Acidentais	1,2	1,0

Fonte: NP EN 1992 -1 -1 (2010) -adaptado

Os valores de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão ( $f_{cd}$ ) e da tensão de cedência à tração do aço das armaduras ( $f_{yd}$ ), podem ser obtidos pelas seguintes equações:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (83)$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (84)$$

Onde:

$f_{cd}$  é o valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade;

$f_{yd}$  é o valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado.

No t3pico 2.4.2.5 do EC2, estabelece que os valores de c3lculo para os coeficientes de resist3ncia do terreno, relativos a materiais de funda33es, devem ser calculados de acordo com o EC7.

### 2.3.3.2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE SAPATAS

O dimensionamento estrutural da sapata inicia-se com a altura. De acordo com Appleton, C3mara e Marc3o (2009) as sapatas podem ser classificadas como sapatas r3gidas e sapatas flex3veis.

Para que a sapata seja considerada r3gida o crit3rio adoptado para estabelecer a sua altura 3 determinado pela seguinte express3o:

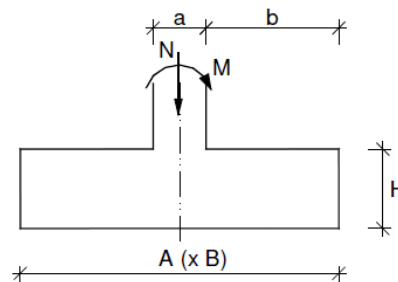


Figura 19– Sapata r3gida

Fonte: Appleton, C3mara e Marc3o, (2009)

$$H \geq \frac{A - a}{4} \quad (85)$$

Neste caso, as tens3es no solo s3o consideradas uniformes. J3 as sapatas flex3veis, por possuírem uma altura (H) pequena, apresentam grande deformabilidade, por isso, as tens3es no solo n3o podem ser consideradas uniformes (Appleton, C3mara e Marc3o, 2009).

### 2.3.3.3 Dimensionamento de armadura para sapata rígida – Verificação de segurança à flexão

O dimensionamento das armaduras para sapatas rígidas é feito utilizando-se o método das escoras e tirantes, também conhecido como método das bielas, o modelo consiste em analisar as forças nas escoras e tirantes e dimensionar as armaduras necessárias para resistir às tracções. (Appleton, Câmara e Marcão, 2009).

No EC2 (2010, p.74) diz em nota que:

*“Os modelos de escoras e tirantes são constituídos por escoras que representam campos de tensão de compressão, por tirantes que representam as armaduras e por nós. As forças nos elementos de um modelo de escoras e tirantes deverão ser determinadas mantendo, no estado limite último, o equilíbrio com as cargas aplicadas.”*

De acordo com o EC2, o Modelo de escoras e tirantes pode ser utilizado para as verificações em relação ao estado limite último e para a definição das disposições construtivas.

A seguir é mostrado como é feito o dimensionamento das armaduras da sapata rígida de acordo com o Método das escoras e tirantes.

- Sapata sem excentricidade de carga

Neste caso, está sendo exercido um esforço axial (N) sobre a sapata.

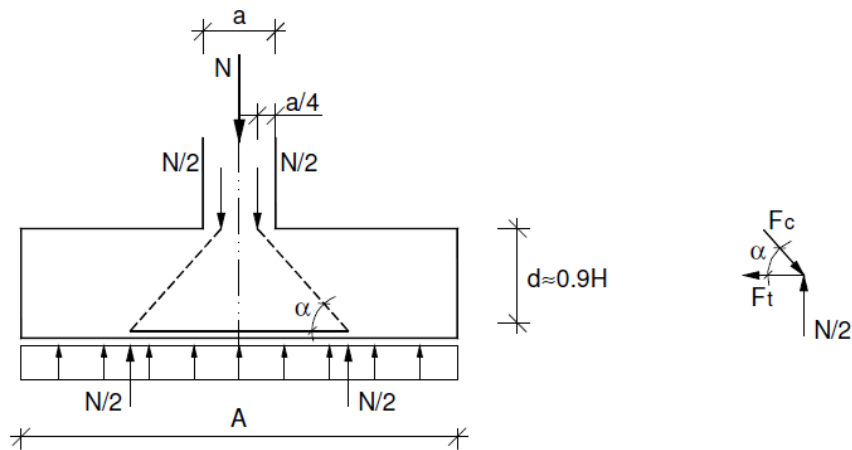


Figura 20– Sapata rígida sem excentricidade de carga

Fonte: Appleton, Câmara e Marcão, (2009)

Como as dimensões da base da sapata são conhecidas, é possível determinar a força de tracção.

Primeiro determina-se a tangente do ângulo  $\alpha$ :

$$tg_{\alpha} = \frac{d}{\frac{A - a}{4}} \quad (86)$$

Onde:

$d$  é a altura útil da sapata;

$A$  é a dimensão analisada da sapata;

$a$  é a dimensão do pilar;

Depois, através do equilíbrio do nó indicado, obtém-se a segunda equação:

$$tg_{\alpha} = \frac{N/2}{F_t} \quad (87)$$

Igualando as Equações (86) e (87) é possível determinar a expressão para o cálculo da força de tracção:

$$F_t = \frac{N(A - a)}{8d} \quad (88)$$

Portanto, a área de armadura ( $A_s$ ) na sapata pode ser determinada pelas seguintes equações:

$$A_s = \frac{F_t}{f_{syd}} \rightarrow \left(\frac{A_s}{S}\right) = \frac{F_t}{f_{syd}} \cdot \frac{1}{X} \quad (89)$$

Sendo:

X: área carregada na direcção ortogonal.

$\left(\frac{A_s}{S}\right)$ : área de armadura por metro.

- Sapata com excentricidade de carga

O cálculo para sapatas rígidas com excentricidade é realizado de forma semelhante ao de sapatas sem cargas excêntricas, através do equilíbrio das forças no nó indicado.

Primeiramente é necessário saber se as tensões no solo actuam em mais ou menos da metade da sapata, para isso deve ser calculado a excentricidade ( $e$ ).

$$e = \frac{M}{N} \quad (90)$$

Onde:

M é o momento aplicado na sapata;

N é o esforço axial aplicado na sapata.

- Se  $e > \frac{A}{4}$ , as tensões no solo actuam em menos da metade da sapata;
- Se  $e < \frac{A}{4}$ , as tensões no solo actuam em mais da metade da sapata.

Tensões no solo em menos da metade da sapata ( $e > \frac{A}{4}$ )

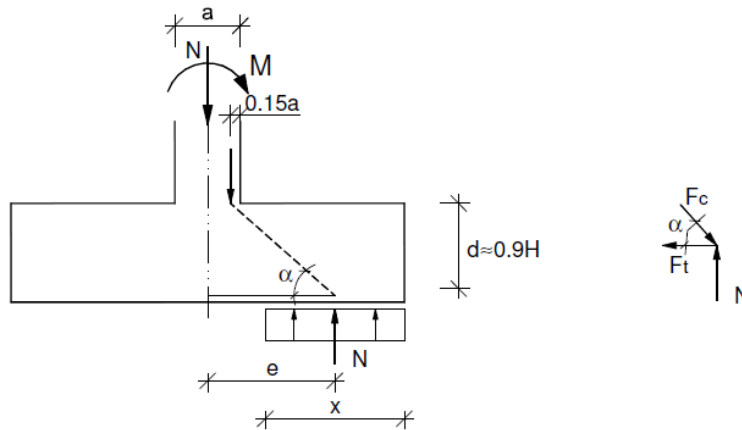


Figura 21– Sapata rígida com tensões no solo em menos da metade da sapata

Fonte: Appleton, Câmara e Marcão, (2009)

$$x = \left( \frac{A}{2} - e \right) \times 2 = A - 2e \quad (91)$$

Primeiro determina-se a tangente do ângulo  $\alpha$ :

$$tg\alpha = \frac{d}{e - 0,35a} \quad (92)$$

Depois, através do equilíbrio do nó indicado, obtém-se a segunda equação:

$$tg\alpha = \frac{N}{F_t} \quad (93)$$

Igualando as Equações (92) e (93) é possível determinar a expressão para o cálculo da força de tracção:

$$F_t = \frac{N(e - 0,35a)}{d} \quad (94)$$

Portanto, a área de armadura ( $A_s$ ) na sapata pode ser determinada pelas seguintes equações:

$$A_s = \frac{F_t}{f_{syd}} \rightarrow \left( \frac{A_s}{S} \right) = \frac{F_t}{f_{syd}} \cdot \frac{1}{y} \quad (95)$$

Sendo  $y$  a área carregada na direcção ortogonal.

Tensões no solo em mais da metade da sapata ( $e < \frac{A}{4}$ .)

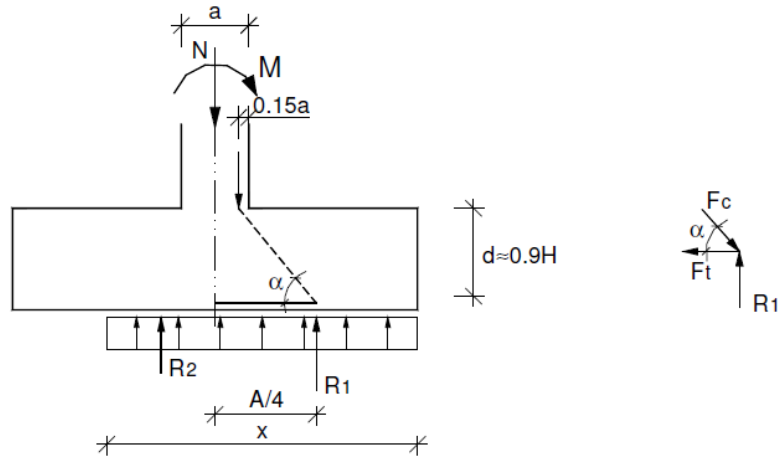


Figura 22– Sapata rígida com tensões no solo em mais da metade da sapata

Fonte: Appleton, Câmara e Marcão, (2009)

$$x = \left( \frac{A}{2} - e \right) \times 2 = A - 2e \quad (96)$$

Primeiro determina-se a tangente do ângulo  $\alpha$ :

$$tg_{\alpha} = \frac{d}{A/4 - 0,35a} \quad (97)$$

Depois, através do equilíbrio do nó indicado, obtém-se a segunda equação:

$$tg_{\alpha} = \frac{R_1}{F_t} \quad (98)$$

Igualando as Equações (97) e (98) é possível determinar a expressão para o cálculo da força de tracção:

$$F_t = \frac{R_1(A/4 - 0,35a)}{d} \quad (99)$$

O valor da reacção R1 é determinado de acordo com a seguinte relação:

$$\frac{N}{A - 2e} = \frac{R_1}{A/2} \rightarrow R_1 = \frac{A}{2} \times \frac{N}{A - 2e} \quad (100)$$

Portanto, a área de armadura ( $A_s$ ) na sapata pode ser determinada pelas seguintes equações:

$$A_s = \frac{F_t}{f_{syd}} \rightarrow \left(\frac{A_s}{S}\right) = \frac{F_t}{f_{syd}} \cdot \frac{1}{y} \quad (101)$$

Sendo y a área carregada na direcção ortogonal.

### 3 DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE CÁLCULO EM VBA

#### 3.1 Visual Basic for Applications (VBA)

O Visual Basic for Applications (VBA) é uma linguagem de programação que torna possível estender aplicativos do Office, como o Excel neste caso. Essa linguagem permite maneiras diferentes de criar, formatar e manipular documentos, e-mails, banco de dados, formulários, planilhas e apresentações. A automatização de tarefas repetitivas é um dos usos mais comuns do VBA (Microsoft, 2022).

O presente trabalho utilizou-se da ferramenta Excel VBA para criar um programa que pudesse realizar o dimensionamento geotécnico e estrutural de sapatas de fundação. As verificações do programa são realizadas de acordo com os Eurocódigos, detalhado no capítulo 2 deste trabalho. É importante ressaltar que o programa não leva em conta todos os coeficientes corretivos apresentado no EC7, descritos anteriormente.

O programa trabalha com os seguintes coeficientes corretivos: capacidade resistente do terreno ao carregamento ( $N_c$ ,  $N_q$  e  $N_\gamma$ ); forma da fundação ( $S_c$ ,  $S_q$  e  $S_\gamma$ ); presença de um extrato rígido ( $f_c$ ,  $f_q$  e  $f_\gamma$ ).

Para o cálculo do coeficientes corretivos para a presença de um extrato rígido utilizou-se os valores das Tabela 5 - Valores de  $f_c$ , Tabela 6- Valores de  $f_q$  e Tabela 7 – Valores de  $f_\gamma$ , para gerar os gráficos (disponíveis no Anexo A). A partir dos gráficos foi possível obter as equações das retas para  $f_c$ ,  $f_q$  e  $f_\gamma$  de acordo com o ângulo de atrito. Essas equações foram introduzidas no programa e utilizadas para calcular os coeficientes corretivos para a presença de um extrato rígido.

A escolha do programa Excel surge do facto de ser um programa amplamente utilizado e conhecido mundialmente.

Com tudo, o Programa Sapatas permite o cálculo de diversas combinações oferecendo aos utilizadores inúmeras soluções, garantindo assim a otimização do processo de dimensionamento de sapatas.

Para isso, foi desenvolvida uma interface gráfica intuitiva e desta forma permite que o utilizador tenha uma interação fácil e rápida com o programa.

### 3.2 Apresentação do programa de cálculo

Os cálculos realizados no programa estão divididos em duas etapas, sendo elas:

- 1) Dimensionamento geotécnico (GEO)
- 2) Dimensionamento estrutural (STR)

A seguir será apresentado o passo-a-passo do programa com a finalidade de facilitar o entendimento e manuseio do mesmo.

- Passo 1: a princípio deve-se escolher se as combinações serão introduzidas manualmente pelo usuário ou se o programa realizará o cálculo das combinações das ações actuantes na base da sapata, conforme a Figura 23.

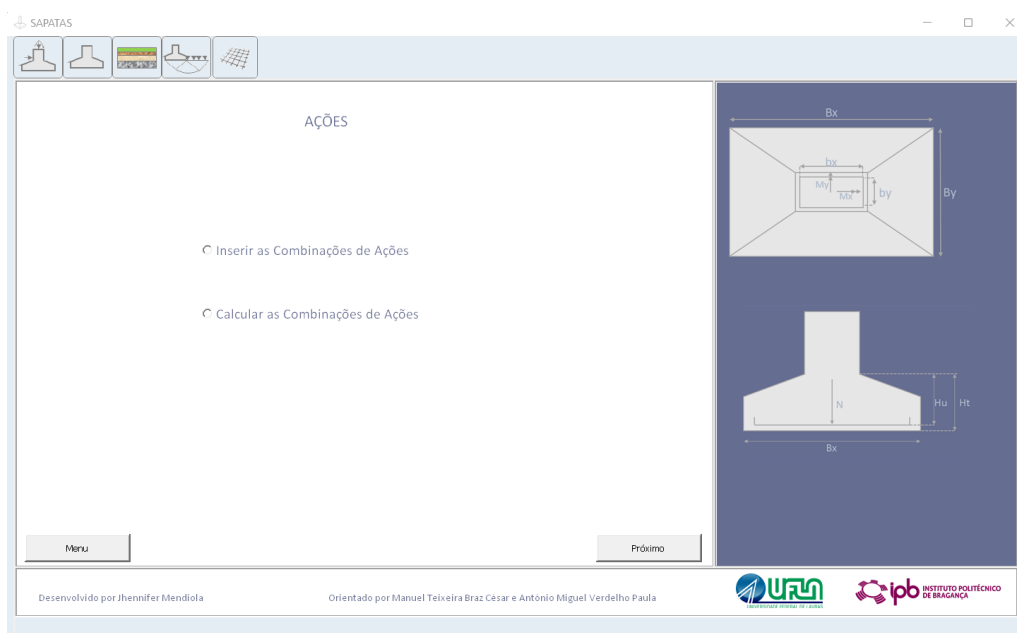


Figura 23– Opção de combinações de acções em sapatas isoladas

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 2 – Opção 1: se a opção for “Inserir as Combinações de Ações”, deve-se então introduzir os dados das ações actuantes na base da sapata, conforme a Figura 24.

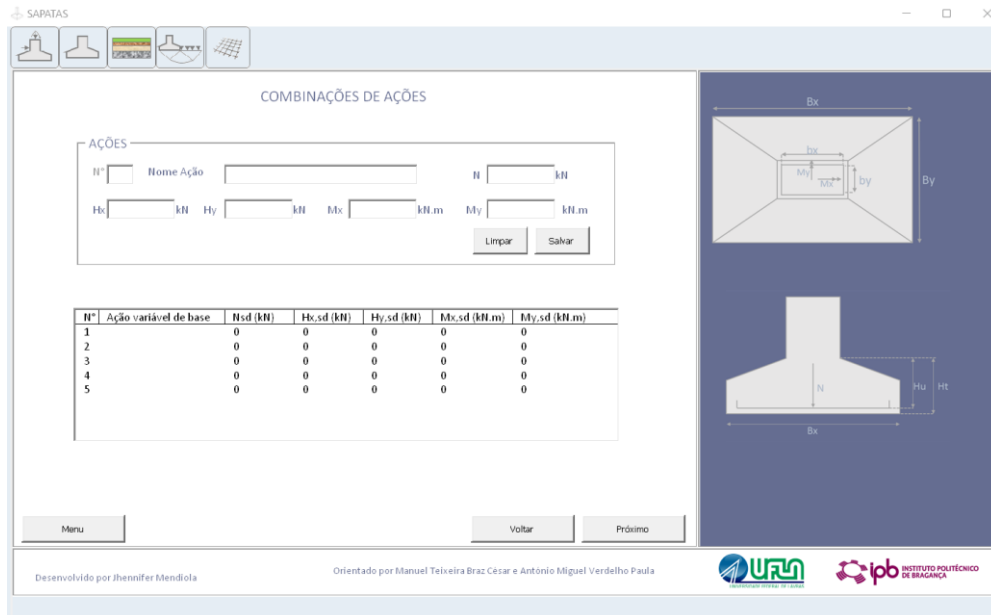


Figura 24– Introdução dos dados das ações actuantes na base da sapata para Opção 1

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 2 – Opção 2: se a opção for “Calcular as Combinações de Ações” o programa irá apresentar as principais ações actuantes na base da sapata. O usuário terá apenas que seleccionar os valores que deseja alterar.

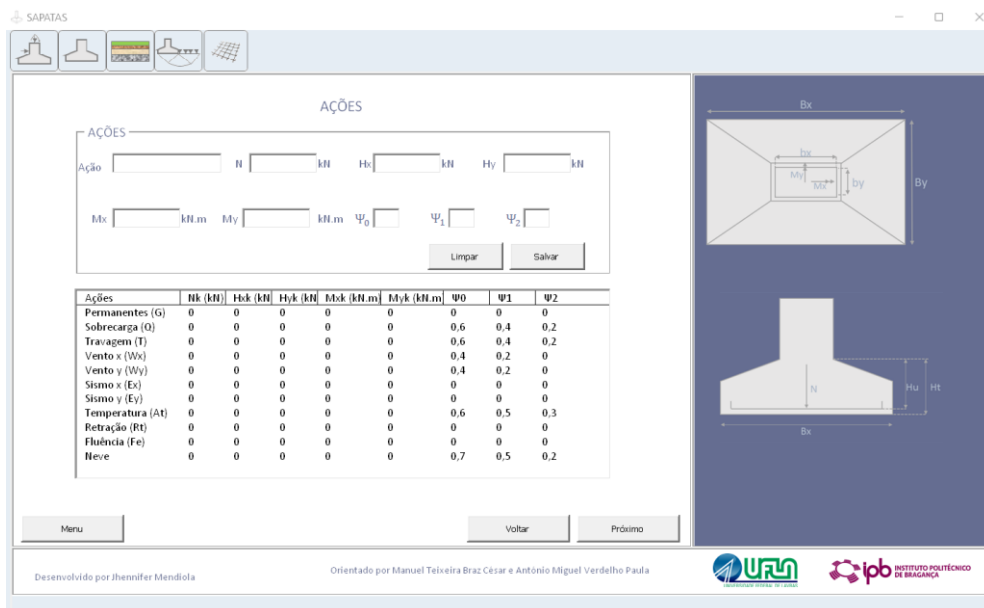


Figura 25– Apresentação das ações actuantes na base da sapata para a Opção 2

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 3: poderá alterar os coeficientes de segurança para o cálculo das combinações das ações.

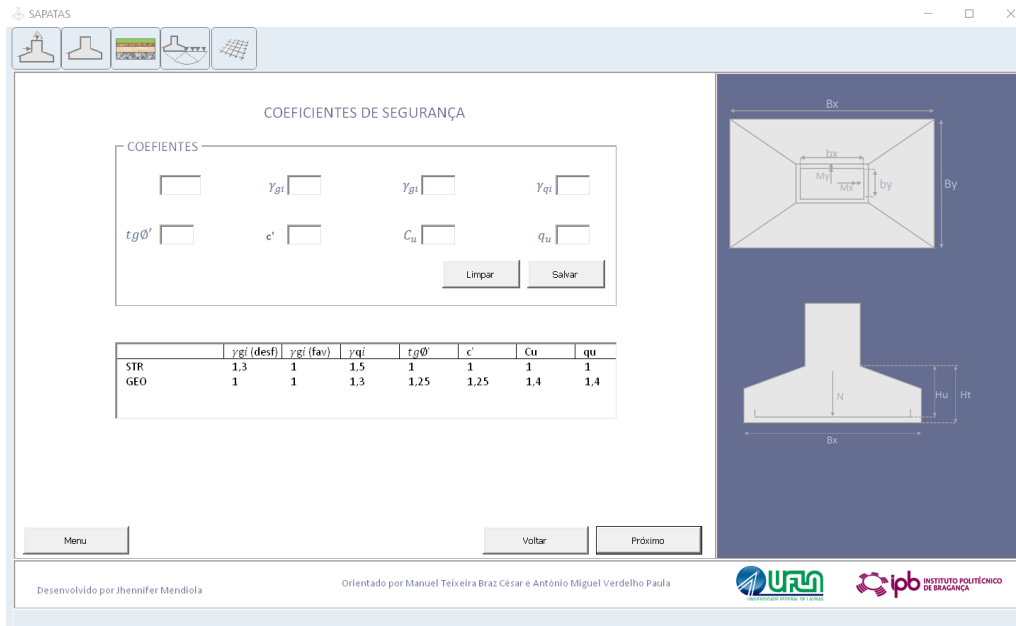


Figura 26– Alteração dos coeficientes de segurança para o cálculo das combinações das ações

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 4: o programa realizará o cálculo para todas as combinações de ações para o estado GEO.

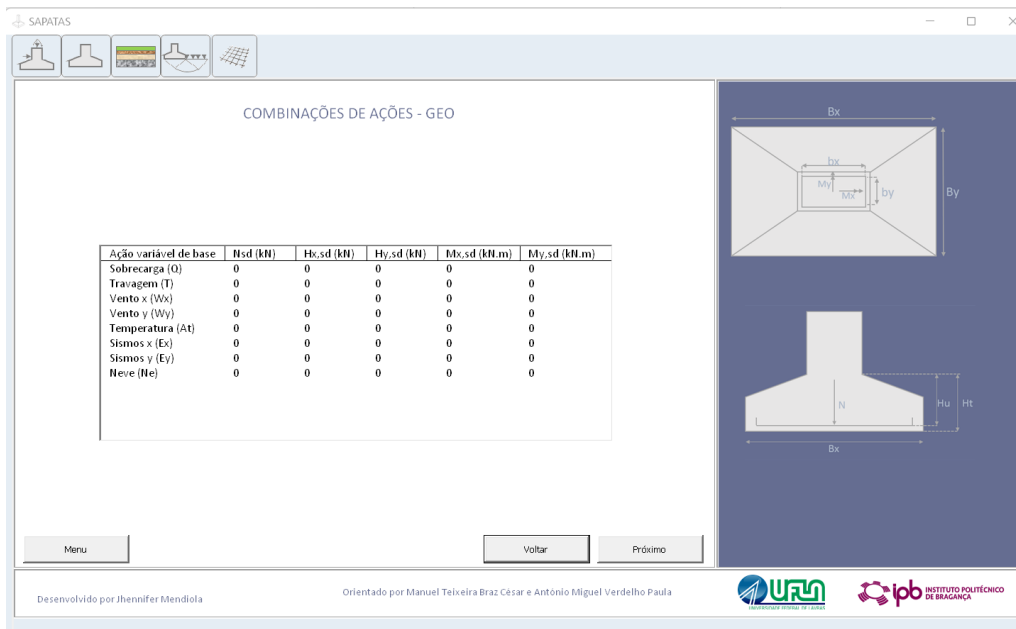


Figura 27– Cálculo das ações para o estado GEO

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 5: deve-se realizar o cálculo do pré-dimensionamento da sapata. É introduzido pelo usuário o tipo de solo que será assentada a sapata, e automaticamente será informada a tensão admissível do solo (obtida pela Tabela 2). Além disso, o usuário terá que introduzir as informações das dimensões do pilar (em metros) e o tipo de sapata que deseja (homotética, quadrada, bordos equidistantes ou proporcionada). Após inserir estes dados será possível realizar o pré-dimensionamento da sapata para todas as ações actantes. O usuário também deverá introduzir as informações do tipo de betão e aço que será utilizado.

Figura 28– Pré-dimensionamento de sapatas

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 6: apresenta-se todas as informações das dimensões da sapata.

Neste passo é apresentado os valores das dimensões da sapata calculados para todas as combinações de ações, de acordo com o tipo de sapata escolhido (homotética, quadrada, bordos equidistantes ou proporcionada).

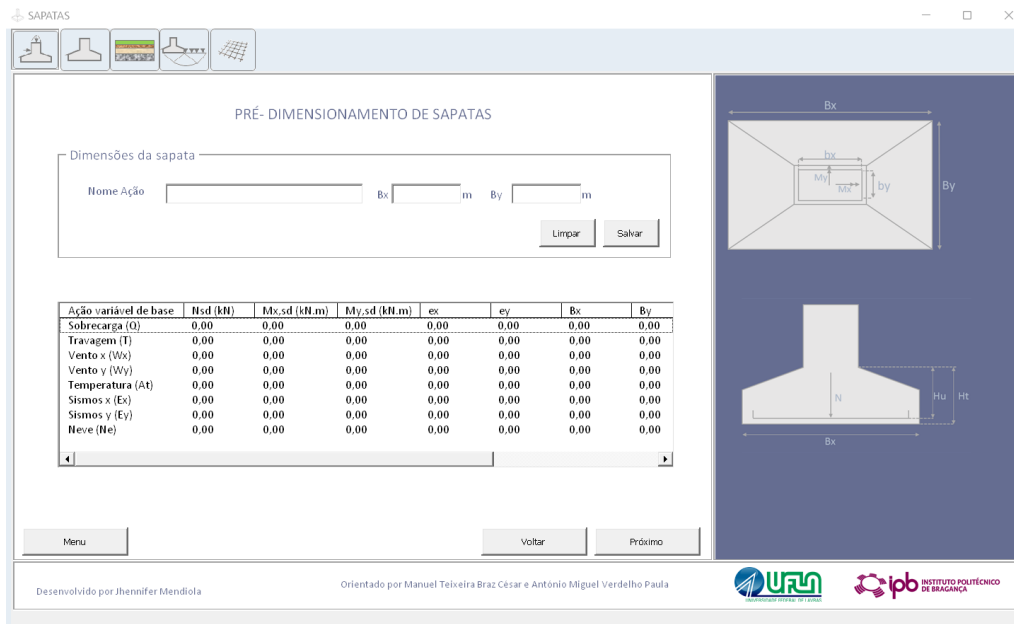


Figura 29– Apresentação das informações das dimensões da sapata

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 7: será introduzido os dados referentes ao tipo de solo, profundidade da sapata, presença de extrato rígido e nível de água, além disso, o usuário deverá escolher o tipo de tensões: tensões totais ou tensões efetivas.

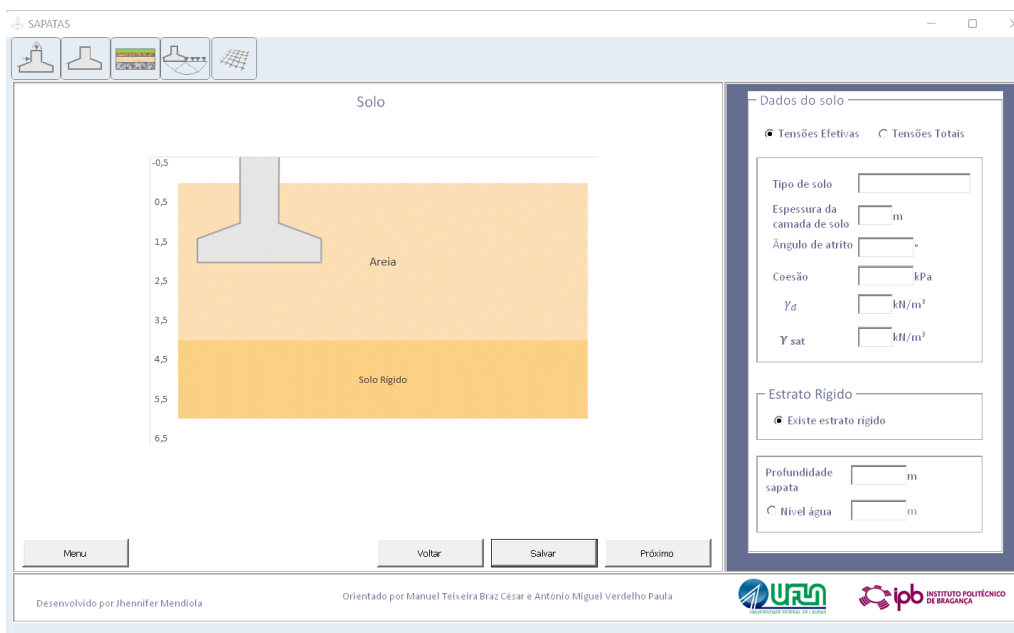


Figura 30– Introdução do tipo de solo, profundidade da sapata, presença de extrato rígido, nível de água e tipos de tensões

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 8: através das informações do solo e o pré-dimensionamento da sapata é possível calcular a capacidade de carga de acordo com as Equações (71) e (72).

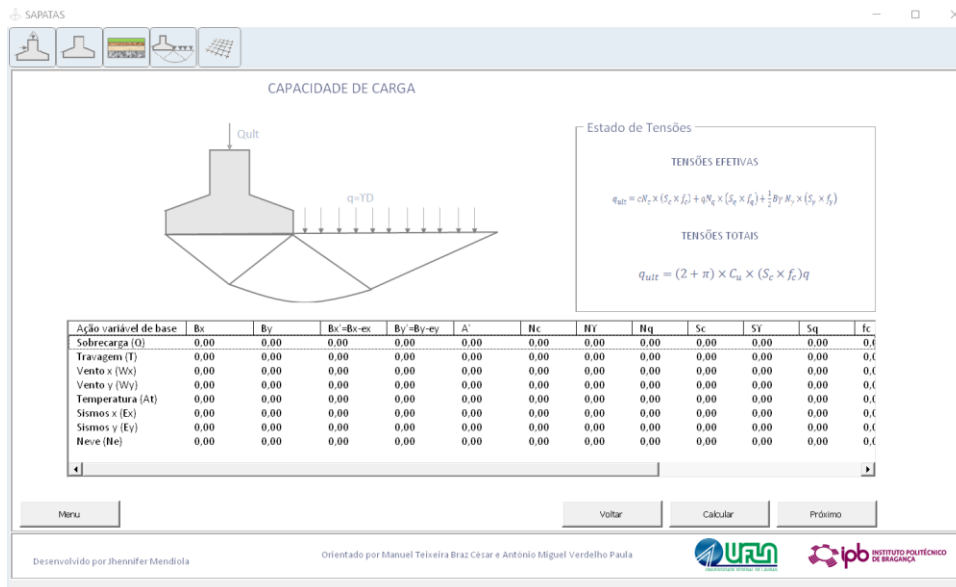


Figura 31– Apresentação das informações das dimensões da sapata e dos coeficientes corretivos

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 10: o programa realizará a verificação da capacidade de carga e caso não seja verificado o usuário deverá retornar a página de pré-dimensionamento da sapata (Passo 6) e alterar os valores das dimensões da sapata. O programa irá verificar novamente e caso não seja verificado o processo deverá ser repetido.

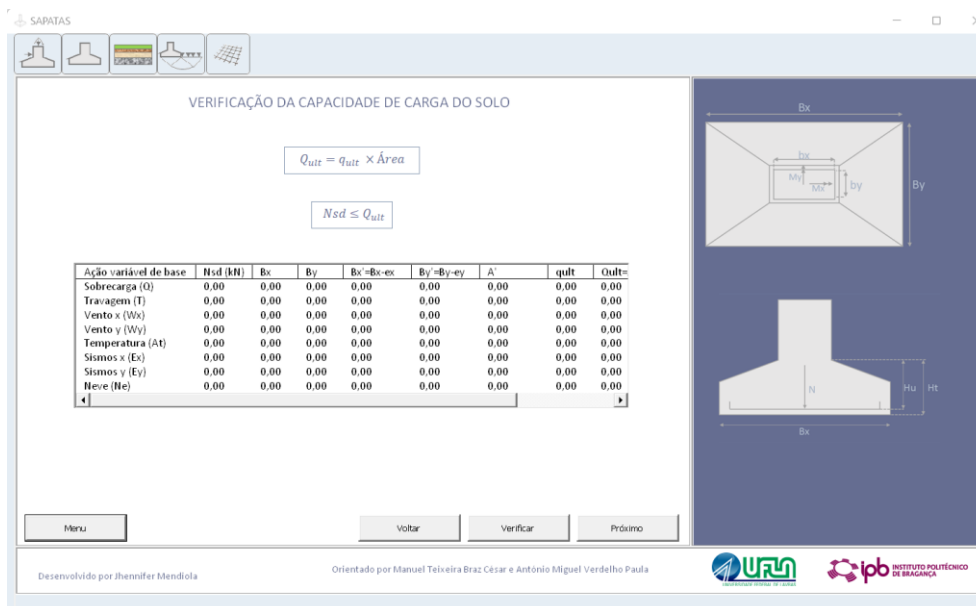


Figura 32– Verificação da capacidade de carga

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 11: é feita a verificação ao deslizamento da base da sapata. O processo é semelhante a verificação da capacidade de carga, caso não seja verificado, o usuário deverá retornar a página de pré-dimensionamento da sapata e alterar o valor das dimensões da sapata.

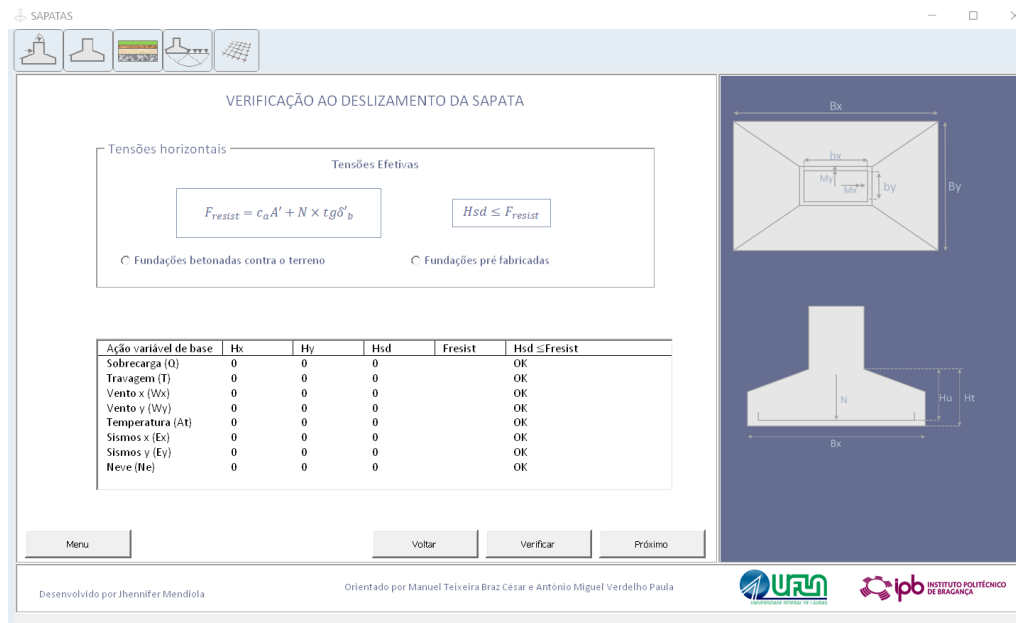


Figura 33– Verificação ao deslizamento da base da sapata

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 12: é finalizado o cálculo geotécnico da sapata e agora inicia-se o cálculo estrutural. Nesta etapa o usuário irá introduzir as dimensões escolhida para a sapata, assim o programa irá prosseguir com os demais cálculos.

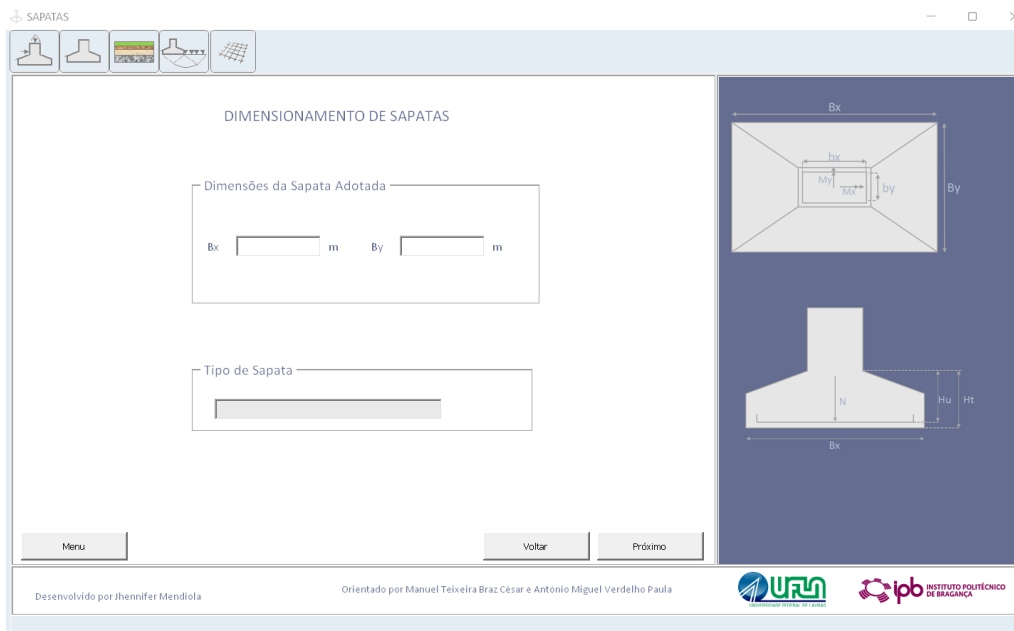


Figura 34–Início do cálculo estrutural: dimensões adotadas para a sapata

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 13: se o usuário escolher no Passo 1 para o programa realizar o cálculo das combinações das ações, nesta etapa será apresentado as ações combinadas para o caso STR. Caso contrário, as combinações das ações já foram introduzidas pelo usuário no início.

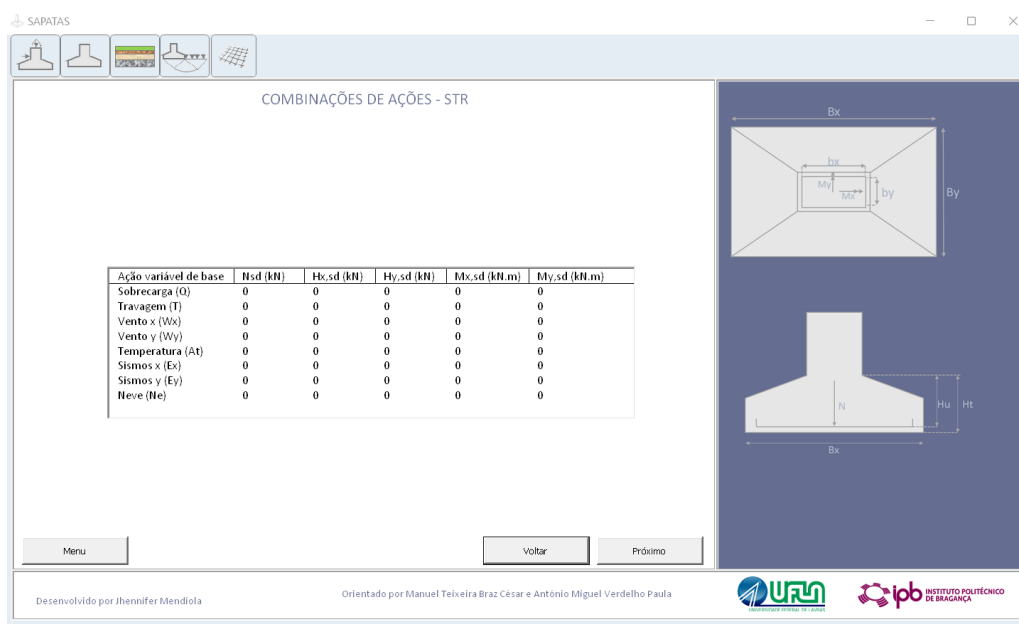


Figura 35– Cálculo das ações combinadas para o caso STR

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 14: A partir da altura da sapata que o usuário introduzir, o programa indicará se a sapata será rígida ou flexível. Caso a sapata seja flexível o usuário deverá redimensioná-la.

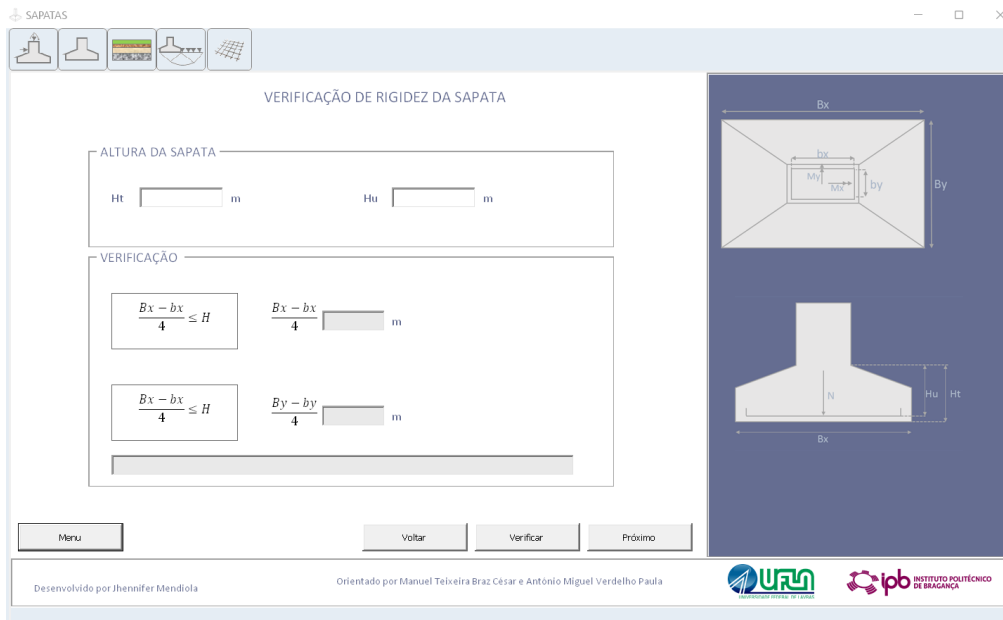


Figura 36– Indicação de sapata rígida ou flexível

Fonte: Elaborado pela autora.

- Passo 15: Caso a sapata seja rígida, o programa irá dimensionar as armaduras pelo método das bielas.

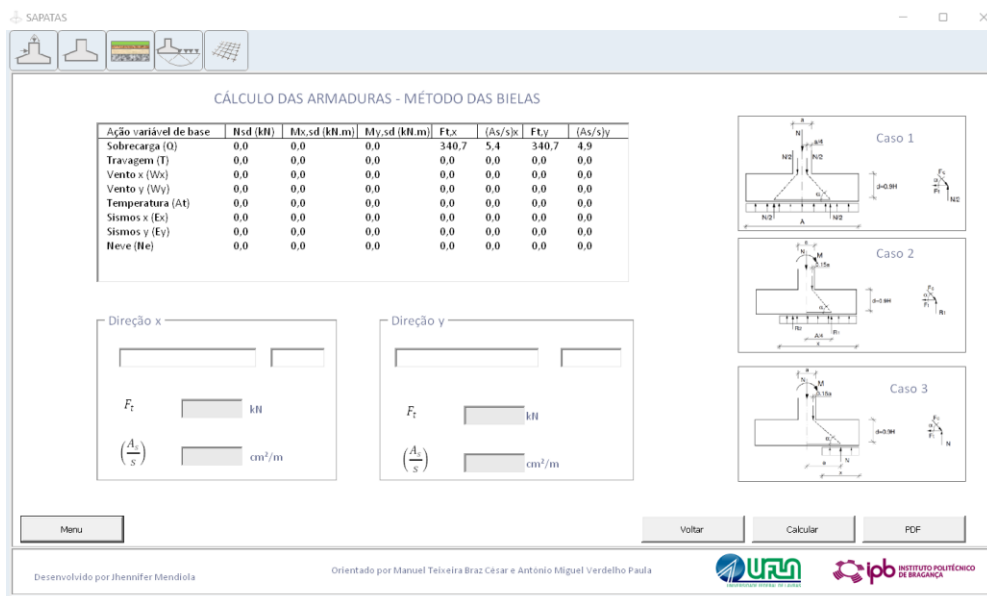


Figura 37– Sapata rígida, dimensionamento estrutural pelo Método das Bielas

Fonte: Elaborado pela autora.

Ao finalizar o dimensionamento estrutural da sapata o usuário poderá emitir o relatório em PDF com todas as informações do dimensionamento da sapata. No Anexo A encontra-se um modelo do relatório gerado.

Abaixo encontra-se os diagramas do funcionamento do programa, tanto para a parte geotécnica (Figura 38) quanto para a parte estrutural (Figura 39).

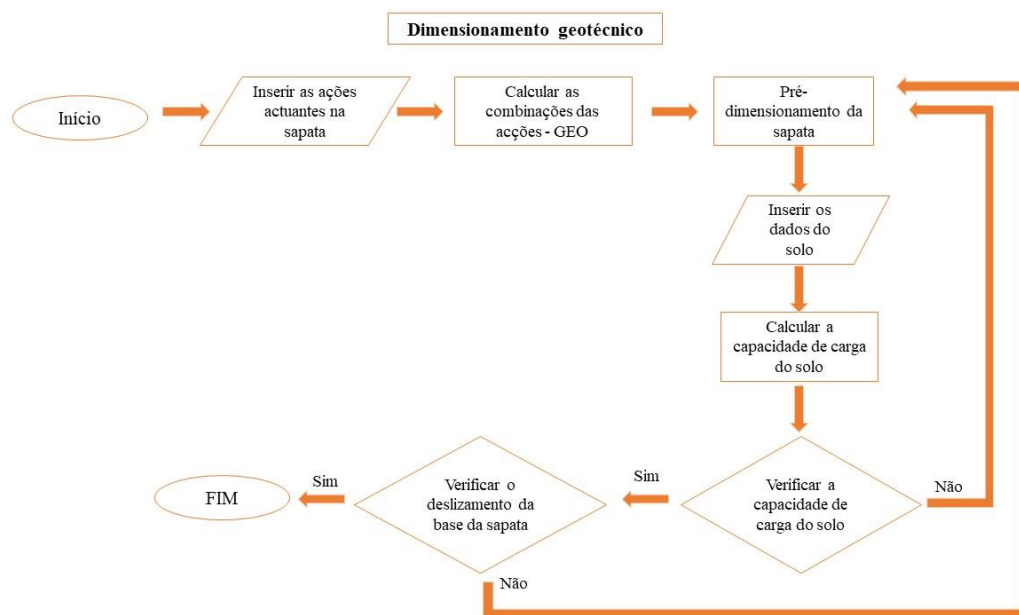


Figura 38 - Diagrama do Dimensionamento Geotécnico do Programa

Fonte: Elaborado pela autora.

O programa está dividido em duas partes, a parte geotécnica e a parte estrutural. Ao iniciar o programa o operador deverá introduzir os primeiros dados, que são as ações actuantes na sapata. Caso opte por realizar as combinações, o software irá realizar o cálculo para o caso GEO. Em seguida, a partir da escolha do tipo de solo feita pelo usuário, o programa irá apresentar a tensão admissível do solo, utilizando os valores pré-determinados pela Tabela 2. Com esse valor é possível realizar o pré-dimensionamento da sapata. Posteriormente, o usuário deverá introduzir todas as informações do solo no qual a sapata estará apoiada. A partir desses dados introduzidos o programa irá calcular a capacidade de carga do solo com a equação disposta pelo EC 7. Em seguida é feita a verificação da capacidade do solo e a verificação ao deslizamento, finalizando a primeira etapa.

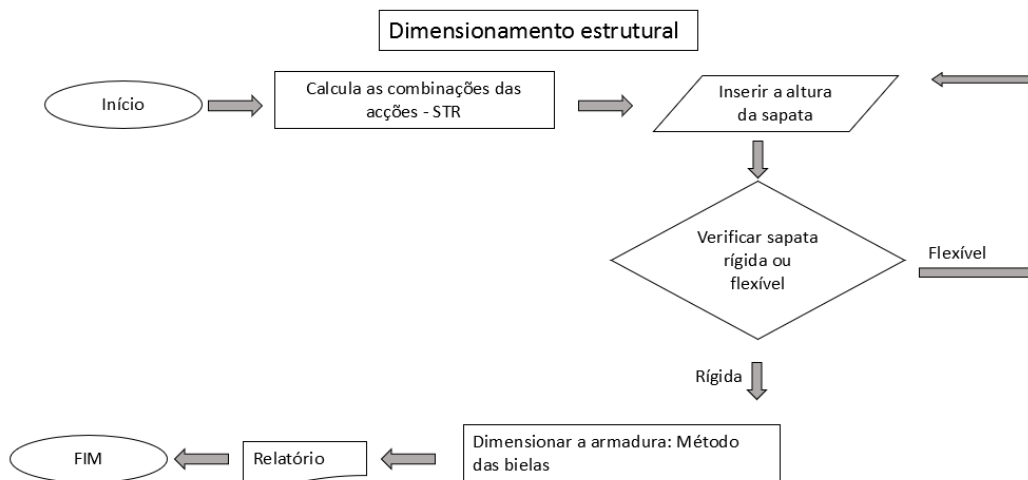


Figura 39- Diagrama do Dimensionamento Estrutural do Programa

Fonte: Elaborado pela autora.

A segunda etapa do processo é iniciada. Como os valores das ações já foram introduzidos no início da primeira etapa, o programa irá calcular as combinações das ações para o caso STR. Em seguida, o usuário deverá introduzir uma altura para a sapata e o programa irá fazer a verificação para sapata rígida ou flexível. Caso a sapata seja rígida o programa realiza o dimensionamento da armadura e ao final gera-se um relatório em PDF e o processo é finalizado.

#### 4 APLICAÇÃO DO PROGRAMA EM CASOS PRÁTICOS

A presente dissertação irá estudar o comportamento do solo para três tipos de sapatas isoladas centradas com esforços axial diferentes, Sapata 1, 2 e 3. A Sapata 1 receberá uma carga de 100 kN, a Sapata 2 receberá uma carga de 200 kN e a Sapata 3 de 400 kN. O pilar apoiado nas sapatas terá as seguintes dimensões 0,40 m x 0,25 m.

Para cada sapata será analisado quatro casos de estudos. No primeiro caso, as três sapatas estarão situadas na superfície do terreno (Figura 40). No segundo caso as sapatas estarão a uma profundidade de 2 metros (Figura 41). O terceiro caso as sapatas estarão situadas na superfície do terreno e este terreno apresenta um estrato rígido a uma profundidade 2,5 m do nível do terreno (Figura 42). No quarto caso, as sapatas estarão a uma profundidade de 2 metros e o estrato rígido do solo estará a uma profundidade de 2,5 m do nível do terreno (Figura 43).

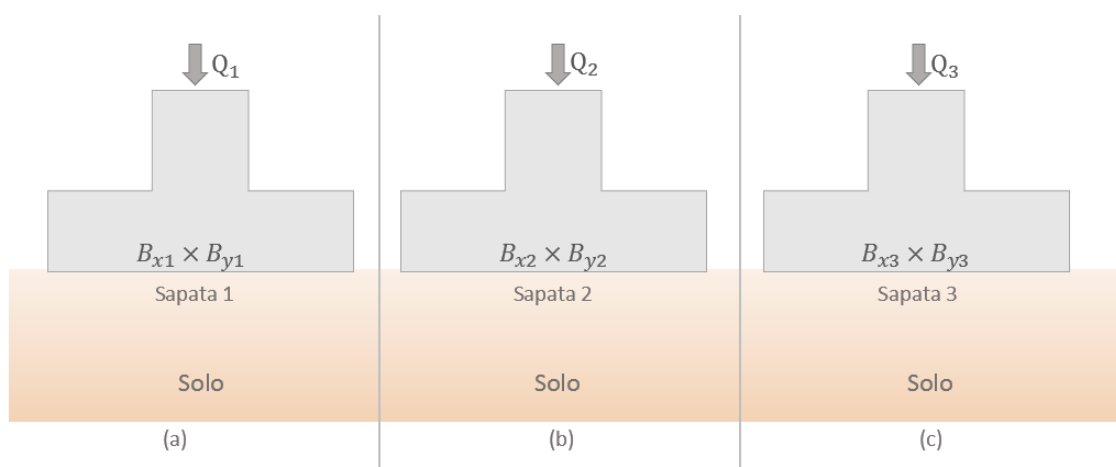


Figura 40- Caso de estudo 1: (a) Sapata 1 na superfície do terreno; (b) Sapata 2 na superfície do terreno; (c) Sapata 3 na superfície do terreno

Fonte: Elaborado pela autora.

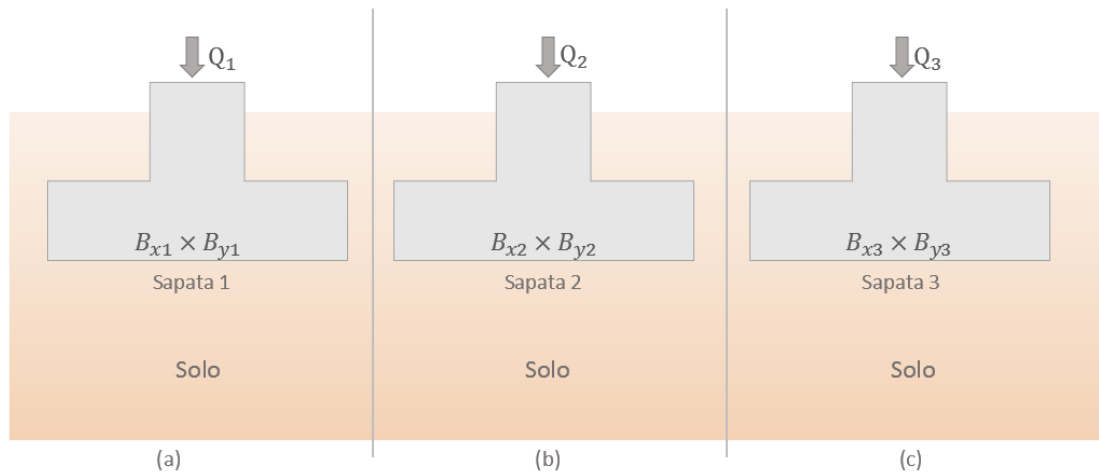


Figura 41- Caso de estudo 2: (a) Sapata 1 a dois metros de profundidade; (b) Sapata 2 a dois metros de profundidade; (c) Sapata 3 a dois metros de profundidade

Fonte: Elaborado pela autora

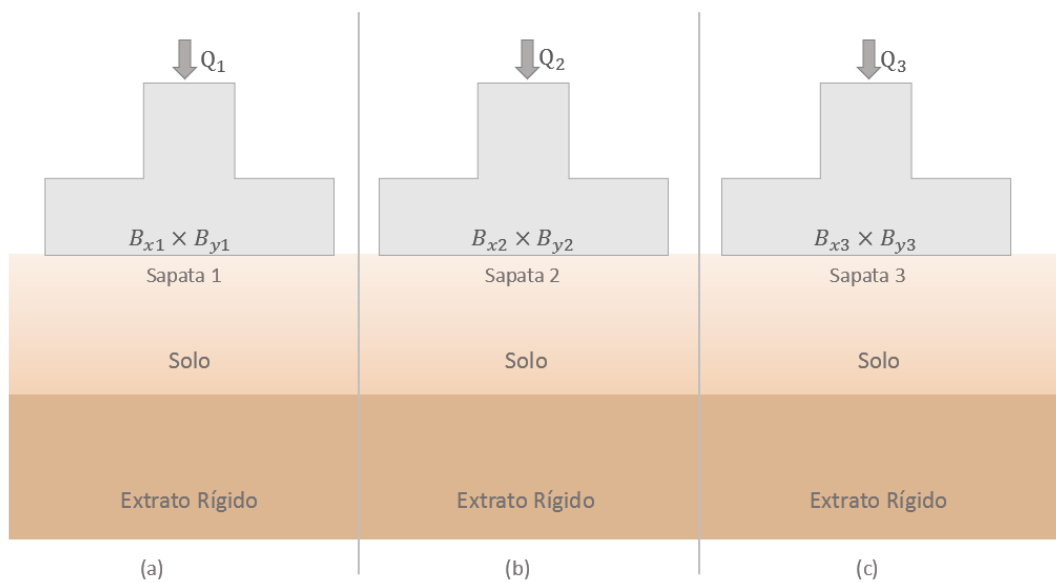


Figura 42- Caso de estudo 3: (a) Sapata 1 na superfície do terreno e presença de extrato rígido; (b) Sapata 2 na superfície do terreno e presença de extrato rígido; (c) Sapata 3 na superfície do terreno e presença de extrato rígido

Fonte: Elaborado pela autora

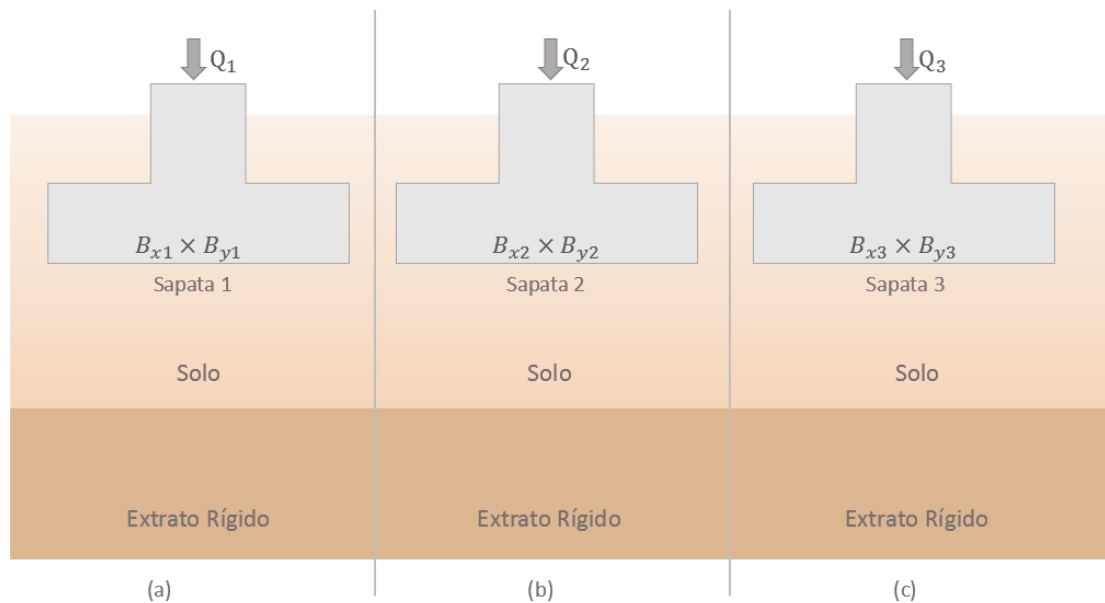


Figura 43- Caso de estudo 4: (a) Sapata 1 a dois metros de profundidade e presença de extrato rígido; (b) Sapata 2 a dois metros de profundidade e presença de extrato rígido; (c) Sapata 3 a dois metros de profundidade e presença de extrato rígido

Fonte: Elaborado pela autora

Para cada um dos casos de estudos será feita uma análise com três tipos de solo diferentes. O primeiro tipo de solo será um solo arenoso mediantemente graduado. O segundo tipo de solo será um solo arenoso bem graduado e compacto. O último tipo solo será um solo argiloso. Abaixo, encontra-se as propriedades dos solos analisados.

Para cada uma das sapatas será obtida a tensão admissível do solo pelo método pré-determinado pela Tabela 2, com o valor da tensão admissível será possível realizar o pré-dimensionamento das sapatas e em seguida será calculado a capacidade de carga do solo pelas equações (71) e (72). Nestes estudos optou-se por dimensionar sapatas com bordos equidistante de acordo com as equações (35) e (36) e a Tabela 3.

Os solos que serão estudados estão descritos abaixo:

Solo 1: Areia mediantemente graduado

$$\phi' = 30^\circ$$

$$c = 0 \text{ kPa}$$

$$\gamma_{sat} = 19 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_{adm} = 300 \text{ kN/m}^2$$

Solo 2: Areia bem graduada e compacta

$$\phi' = 40^\circ$$

$$c = 0 \text{ kPa}$$

$$\gamma' = 21 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma' = 19 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_{adm} = 500 \text{ kN/m}^2$$

Solo 3: Argila média

$$\gamma' = 17 \text{ kN/m}^3$$

$$c_u = 17 + 0,3 \times \sigma'_{v0}$$

$$\sigma'_{v0} = (\gamma' - 9,81)Z$$

$$\sigma_{adm} = 150 \text{ kN/m}^2$$

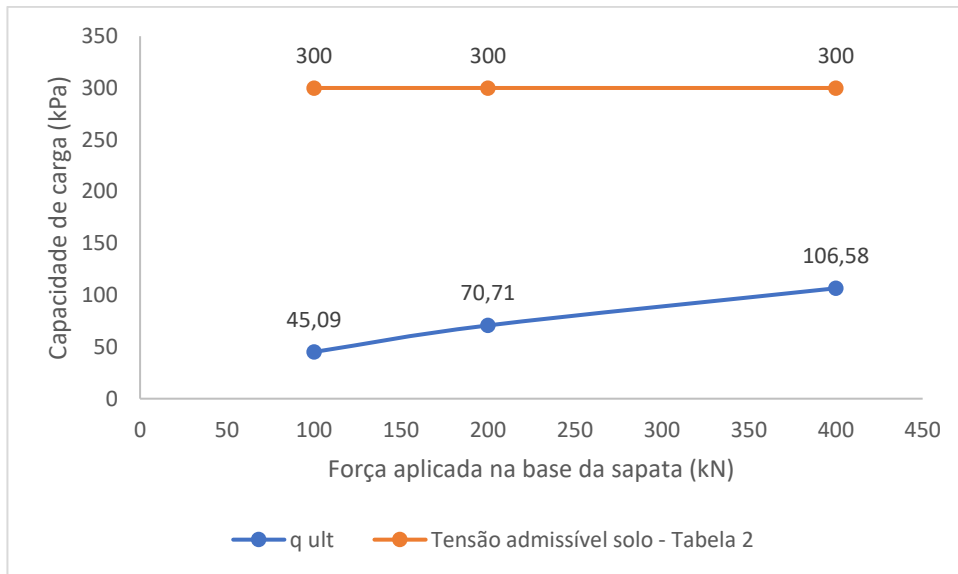
#### **4.1 Areia mediamente graduada**

Neste subcapítulo será realizado os estudos de cada caso para uma Areia mediamente graduada, as características desse tipo de solo foram informadas acima.

#### 4.1.1 Caso 1: sapatas localizadas na superfície do terreno

Abaixo no Gráfico 1 encontra-se os valores da capacidade de carga para o caso 1 e a tensão admissível do solo.

Gráfico 1 - Areia mediamente compacta - Caso 1



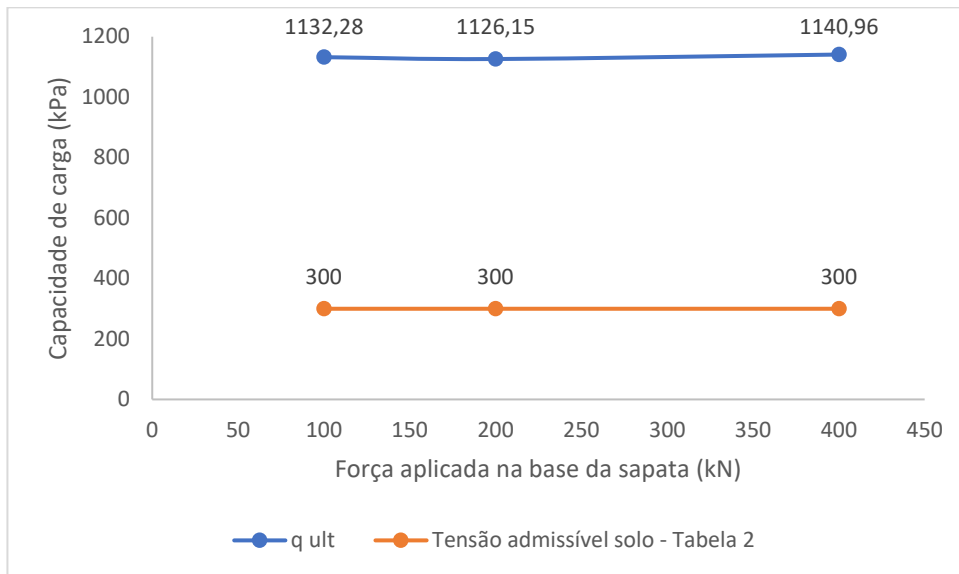
Fonte: Elaborado pela autora

Ao comparar o valor obtido pela Tabela 2 para a tensão admissível do solo para cada uma das sapatas com o valor obtido pelo método analítico do Anexo D do Eurocódigo 7 (Equação (71)), verifica-se que os valores são discrepantes. Portanto, pode-se concluir que a utilização do método analítico apresenta valores mais conservadores e, portanto, seria o mais indicado a se utilizar a favor da segurança.

#### 4.1.2 Caso 2: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno

No Gráfico 2 encontra-se os valores da capacidade de carga para o caso 2 e a tensão admissível do solo.

Gráfico 2 - Areia mediamente compacta - Caso 2



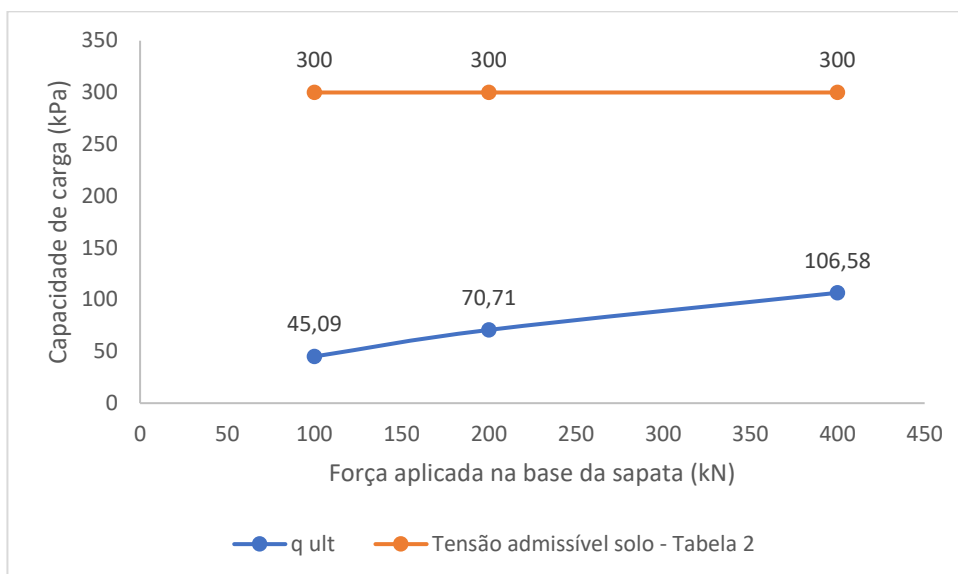
Fonte: Elaborado pela autora

Comparando os resultados agora obtidos para o segundo caso de estudo pelo método analítico com os valores adquiridos pela Tabela 2, pode-se observar que os valores utilizados pela Tabela 2 são mais conservadores que os valores obtidos pelo método analítico. É importante ressaltar que a profundidade de assentamento das sapatas influencia no aumento da capacidade de carga do solo.

#### 4.1.3 Caso 3: sapatas localizadas na superfície do terreno e presença de extrato rígido

Abaixo no Gráfico 3 encontra-se os valores da capacidade de carga para o caso 3 e a tensão admissível do solo.

Gráfico 3 - Areia mediamente compacta (estrato rígido) - Caso 3



Fonte: Elaborado pela autora

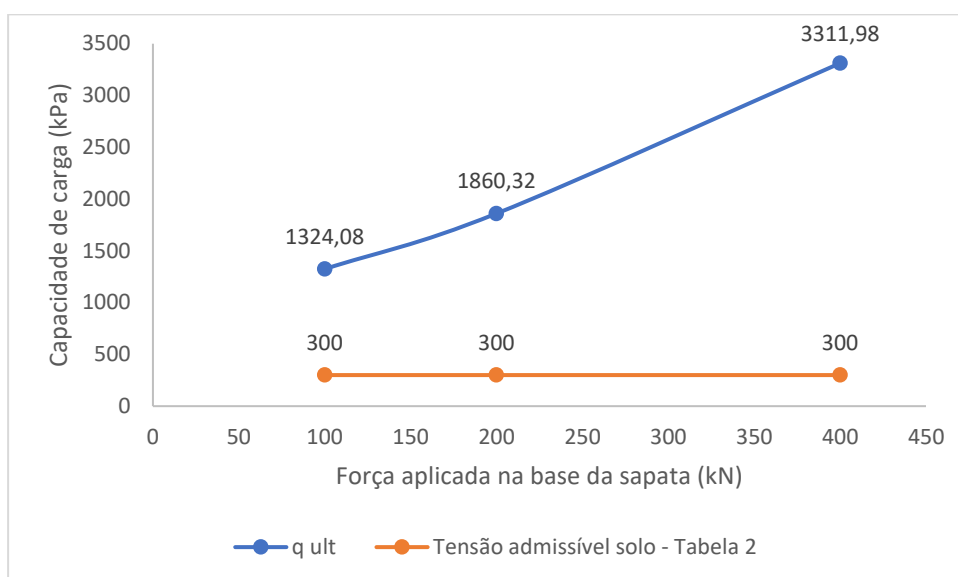
Para o terceiro caso de estudos, pode-se observar que ocorre algo semelhante ao primeiro caso de estudo. Ou seja, os valores obtidos pelo método analítico são inferiores aos valores adquiridos pelo Quadro. Portanto, a favor da segurança deve-se adotar o menor valor encontrado para a capacidade de carga do solo.

Também, verificou-se que a presença de um extrato rígido a uma profundidade de 2,5m e a sapata assentada no nível do terreno não influenciou no valor da capacidade de carga.

#### 4.1.4 Caso 4: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno e presença de extrato rígido

Abaixo encontra-se o Gráfico 4 com os valores da capacidade de carga para o caso 4 e a tensão admissível do solo.

Gráfico 4 - Areia mediamente compacta (estrato rígido) - Caso 4



Fonte: Elaborado pela autora

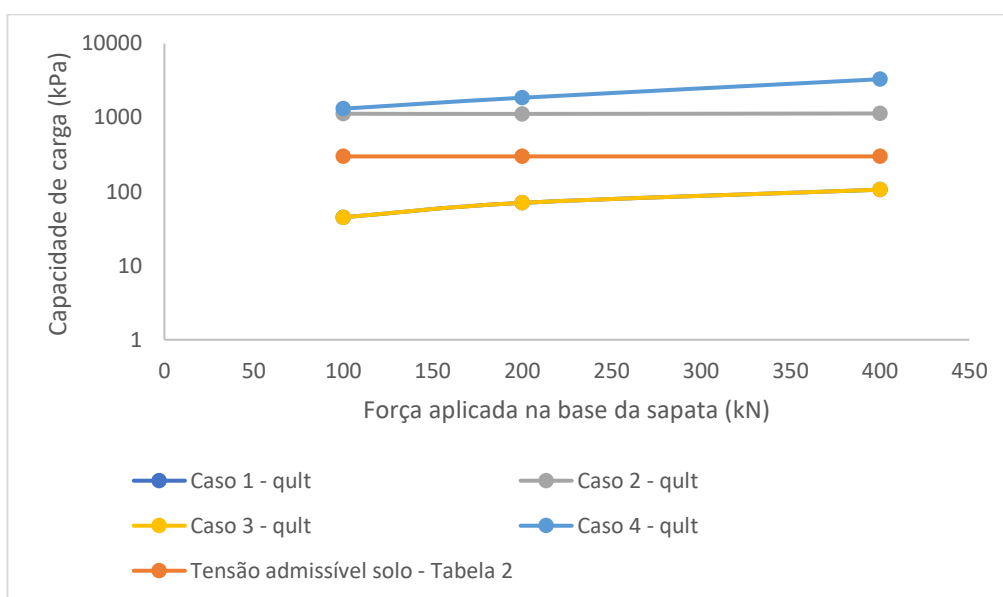
Para o presente caso de estudos pode-se observar que os valores da capacidade de carga do solo são muito maiores pelo método analítico em comparação ao da Tabela 2. Neste caso constata-se que a presença do estrato rígido na camada inferior do solo aumenta muito a sua capacidade de carga.

Pode-se ressaltar que a Tabela 2 não leva em questão a presença de um estrato rígido para a obtenção da tensão admissível do solo, pois independentemente do haver ou não a tensão admissível do solo é a mesma.

#### 4.1.5 Comparação dos quatro casos para o mesmo tipo de solo:

A seguir é apresentado o gráfico com todos os casos de estudos para o solo analisado (Areia mediamente compacta).

Gráfico 5 - Areia mediamente compacta - Todos os casos



Fonte: Elaborado pela autora

Pode-se verificar que a profundidade em que a sapata será assentada é um fator que influencia no valor da capacidade de carga do solo para o caso analítico, isso é facilmente observado pelo gráfico acima, já que a capacidade de carga do solo para o primeiro e terceiro caso de estudos, onde as sapatas estão ao nível do terreno, são bem mais baixos que os valores para os casos de estudos dois e quatro, onde as sapatas estão assentadas a uma profundidade de dois metros. No gráfico, os casos um e três apresentam os mesmos valores, com sobreposição das curvas.

A Tabela 2 não leva em consideração a profundidade de assentamento da sapata, por isso, para todos os casos estudados o valor da tensão admissível do solo são os mesmos. Além disso, é importante ressaltar que a presença de um estrato rígido não influencia nos valores obtidos pela Tabela, diferentemente do caso analítico, onde é possível observar um aumento considerável da capacidade do solo.

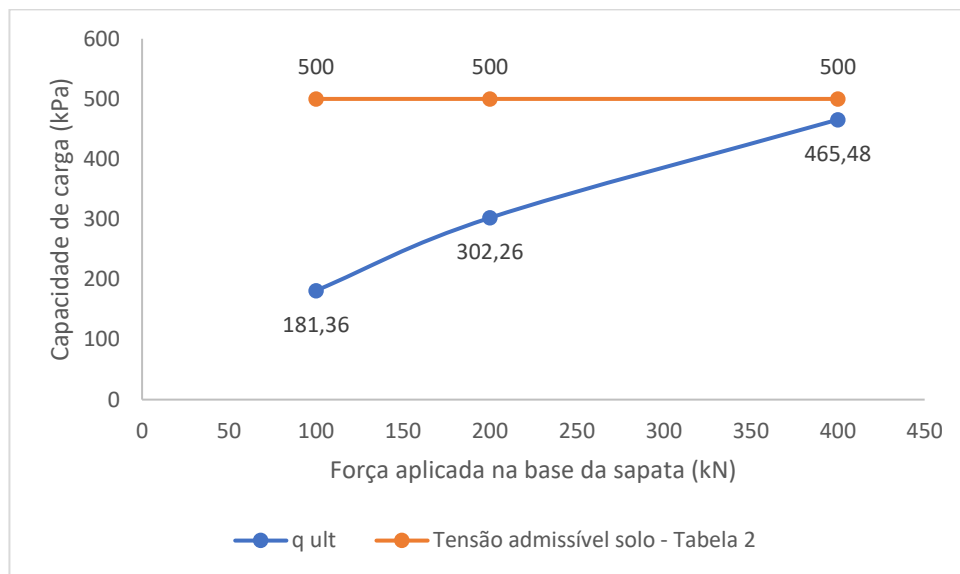
## 4.2 Areia bem graduada e compacta

Neste subcapítulo será realizado os estudos de cada caso para uma Areia bem graduada e compacta, as características desse tipo de solo foram informadas acima.

#### 4.2.1 Caso 1: sapatas localizadas na superfície do terreno

Abaixo no Gráfico 6 encontra-se os valores da capacidade de carga para o caso 1 e a tensão admissível do solo.

Gráfico 6 - Areia bem graduada e compacta - Caso 1



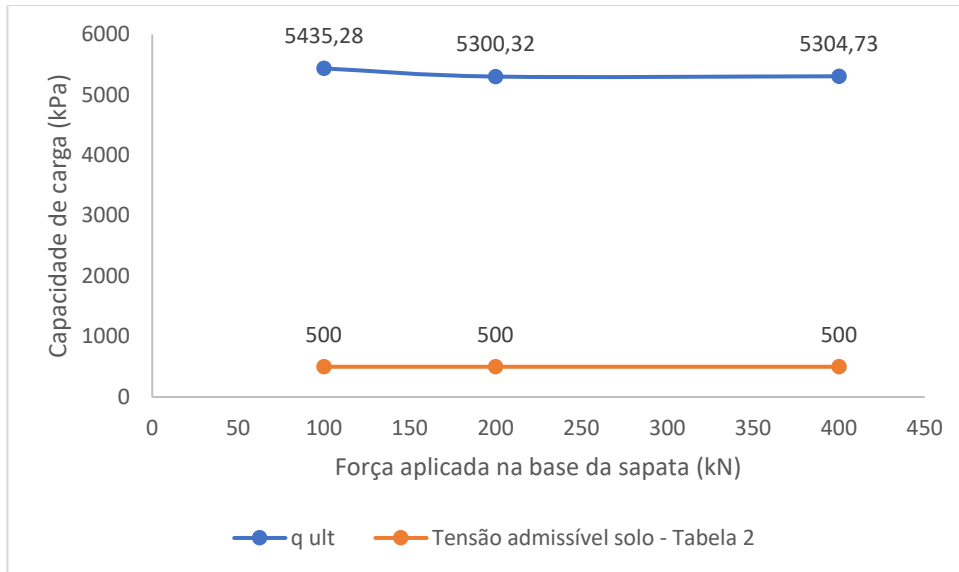
Fonte: Elaborado pela autora

Este caso é bem semelhante ao caso um para o solo de Areia mediantemente graduada. Ao comparar o valor obtido para a tensão admissível do solo para cada uma das sapatas apresentado pela Tabela 2 com o valor obtido pelo método analítico do Anexo D do Eurocódigo 7 (Equação (71)), verifica-se que os valores são discrepantes. Desse modo, pode-se concluir que a utilização do método analítico apresenta valores mais conservadores e, portanto, seria o mais indicado a se utilizar a favor da segurança.

#### 4.2.2 Caso 2: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno

O Gráfico 7 apresenta os valores da capacidade de carga para o caso 2 e a tensão admissível do solo.

Gráfico 7 - Areia bem graduada e compacta - Caso 2



Fonte: Elaborado pela autora

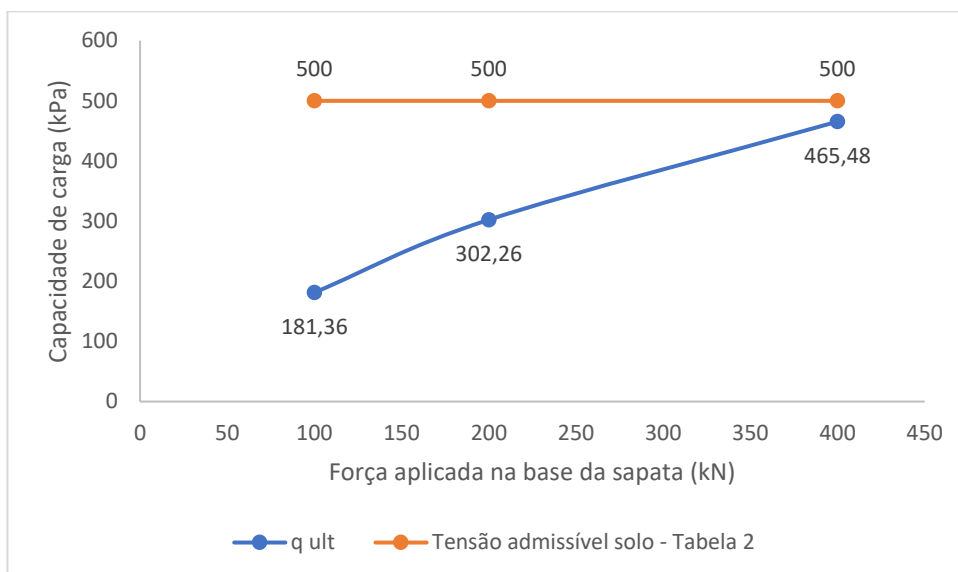
Neste caso, pode-se notar que a capacidade de carga do solo sofreu um grande aumento em relação ao valor obtido pela Tabela 2, como a sapata está assentada a uma profundidade de 2 metros deve-se considerar o peso específico da camada de solo acima, por isso, o valor é bem maior se compararmos com o caso anterior, onde a sapata está assentada na superfície do terreno.

Verifica-se que a Tabela não leva em consideração o peso específico da camada de solo acima da sapata.

#### 4.2.3 Caso 3: sapatas localizadas na superfície do terreno e presença de extrato rígido

O Gráfico 8 apresenta os valores da capacidade de carga para o caso 3 e a tensão admissível do solo.

Gráfico 8 - Areia bem graduada e compacta (estrato rígido) - Caso 3



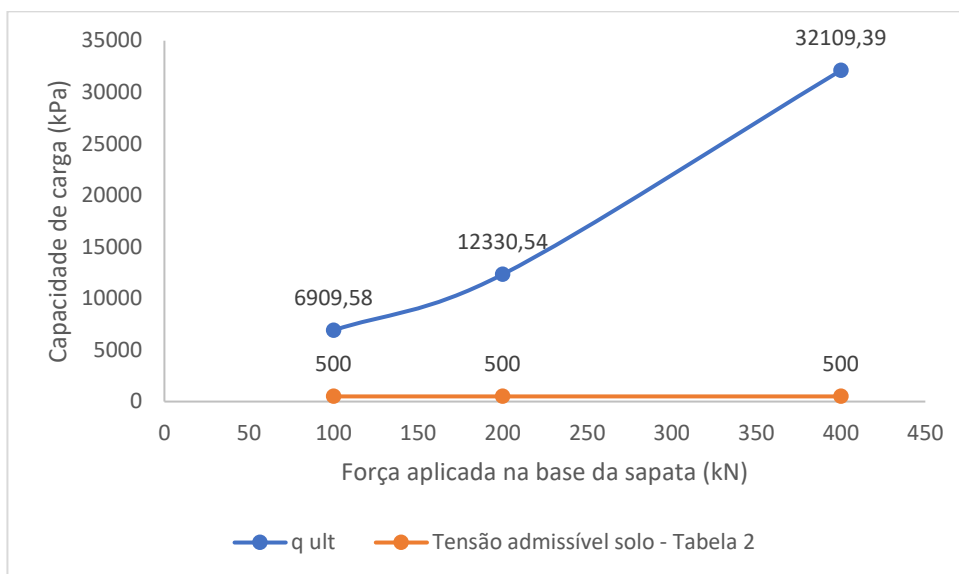
Fonte: Elaborado pela autora

Este caso é semelhante ao caso dois, pode-se atentar ao facto de que o extrato rígido não teve nenhuma influência nos valores obtido, isso se deve a profundidade da qual se encontra o extrato rígido em relação a base da sapata.

#### 4.2.4 Caso 4: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno e presença de extrato rígido

O Gráfico 9 encontra-se os valores da capacidade de carga para o caso 4 e a tensão admissível do solo.

Gráfico 9 - Areia bem graduada e compacta (estrato rígido) - Caso 4



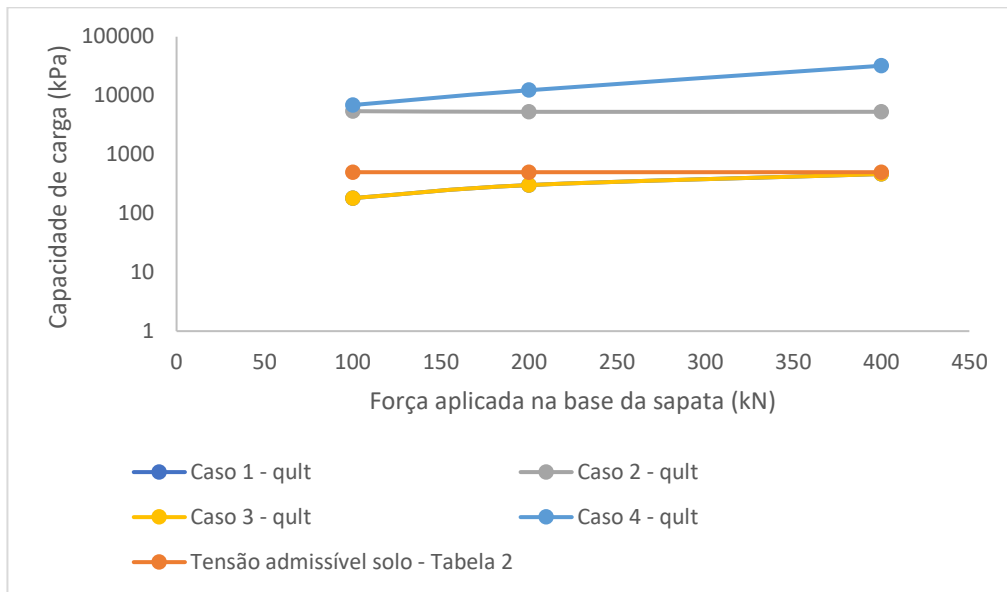
Fonte: Elaborado pela autora

Neste caso observa-se que os valores obtidos pela equação são muito superiores aos valores obtidos pelo quadro. Constata-se que a presença do extrato rígido na camada inferior do solo aumentou muito a sua capacidade.

Além da presença do extrato rígido, nota-se que a profundidade de assentamento da sapata foi outro fator que influenciou no aumento da capacidade, pois deve-se considerar o peso específico do solo acima da sapata.

#### 4.2.5 Comparação dos quatros casos para o mesmo tipo de solo:

Gráfico 10 - Areia bem graduada e compacta - Todos os casos



Fonte: Elaborado pela autora

Para estes casos de estudos pode-se constatar que ocorreu algo semelhante aos casos de estudos anteriores para o solo de Areia mediantemente graduado.

Verifica-se que a tensão admissível do solo adquirida pela equação (71) aumenta quando as sapatas estão assentadas a uma profundidade de 2 metros, como nos casos dois e quatro. Novamente, ocorreu a sobreposição da curva para o caso um e caso três devido à repetição dos valores calculados.

Constata-se também que a presença de um extrato rígido a certa profundidade da base da sapata aumenta a capacidade de carga do solo. No caso três, a distância entre a sapata e o extrato rígido é de 2,5 metros e nesta situação a sua presença não influenciou nos valores obtidos pela equação. Já no quarto caso de estudo a sapata está localizada muito próxima do extrato rígido e é possível notar a sua influência, pois os valores obtidos são bem mais altos se comparado com os valores obtidos para o caso dois, onde as mesmas sapatas estão situadas a uma mesma profundidade, porém não existe o extrato rígido.

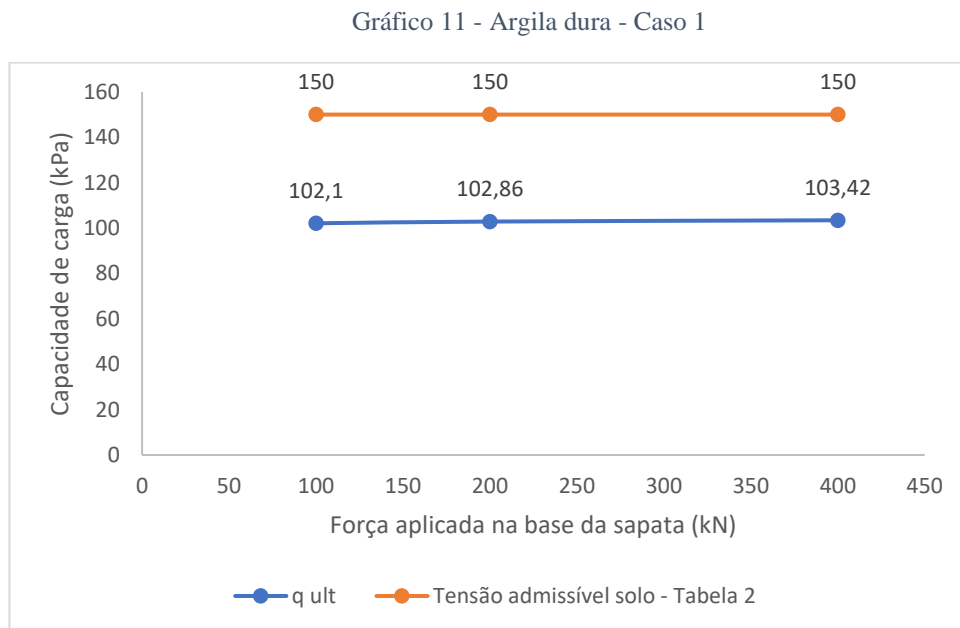
Conclui-se que a capacidade de carga do solo é influenciada por diversos fatores, como a profundidade de assentamento da sapata e a presença de um extrato rígido, portanto o método analítico representa melhor este valor, pois pela Tabela 2 nota-se que não se tem em consideração esses fatores de influência.

### 4.3 Argila dura

Neste subcapítulo será realizado os estudos de cada caso para uma Argila dura, as características desse tipo de solo foram informadas acima.

#### 4.3.1 Caso 1: sapatas localizadas na superfície do terreno

No Gráfico 11 encontra-se os valores da capacidade de carga para o caso 1 e a tensão admissível do solo.



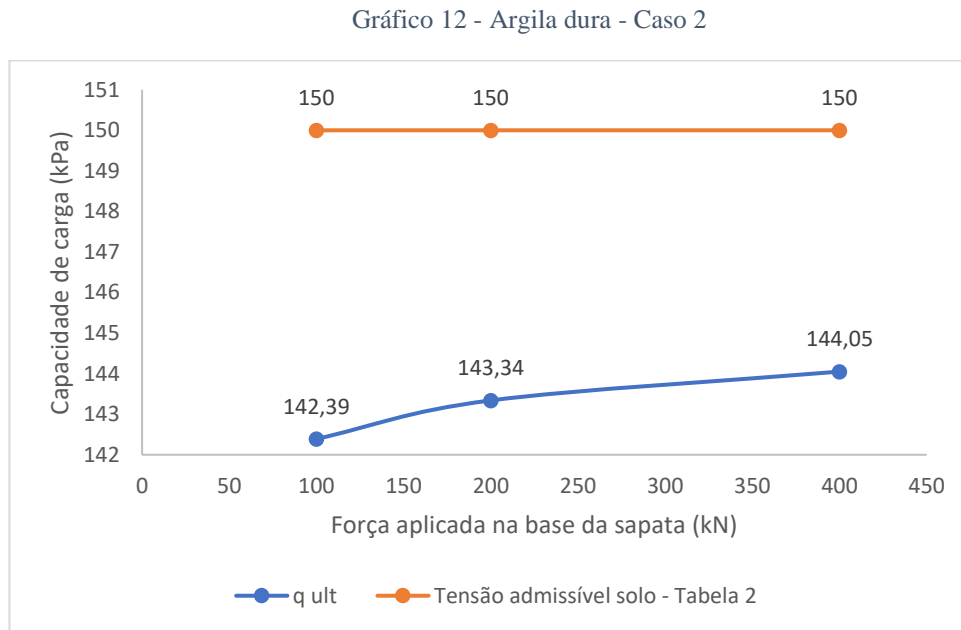
Fonte: Elaborado pela autora

Ao comparar os valores obtidos para a tensão admissível do solo para cada uma das sapatas pelo quadro com o valor obtido pela equação (72), verifica-se que os valores do método analítico são inferiores.

Conclui-se que a utilização do método analítico apresenta valores mais conservadores e, portanto, seria o mais indicado a se utilizar a favor da segurança

### 4.3.2 Caso 2: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno

No Gráfico 12 encontra-se os valores da capacidade de carga para o caso 2 e a tensão admissível do solo.



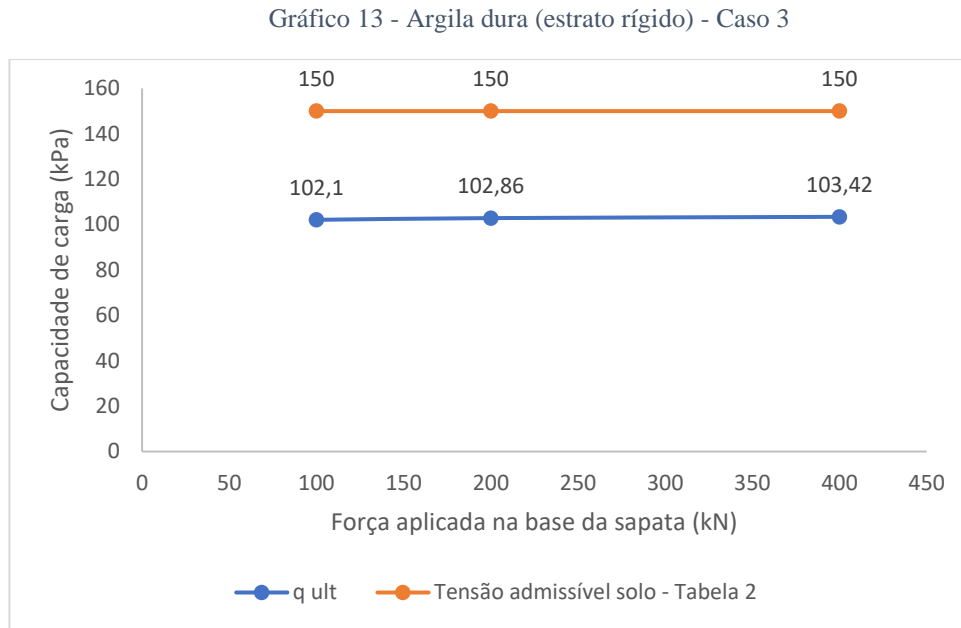
Fonte: Elaborado pela autora

O valor obtido pela equação é inferior ao valor obtido pelo quadro. Observa-se que a profundidade do assentamento da sapata influencia no aumento da capacidade de carga, pois o coeficiente de coesão não drenado varia com a profundidade.

Identifica-se também a proximidade dos valores obtidos pelos dois métodos, sendo assim, para este caso seria possível utilizar os valores obtidos pela Tabela 2. No entanto, é importante realizar a verificação através do método analítico.

### 4.3.3 Caso 3: sapatas localizadas na superfície do terreno e presença de extrato rígido

No Gráfico 13 encontra-se os valores da capacidade de carga para o caso 3 e a tensão admissível do solo.



Fonte: Elaborado pela autora

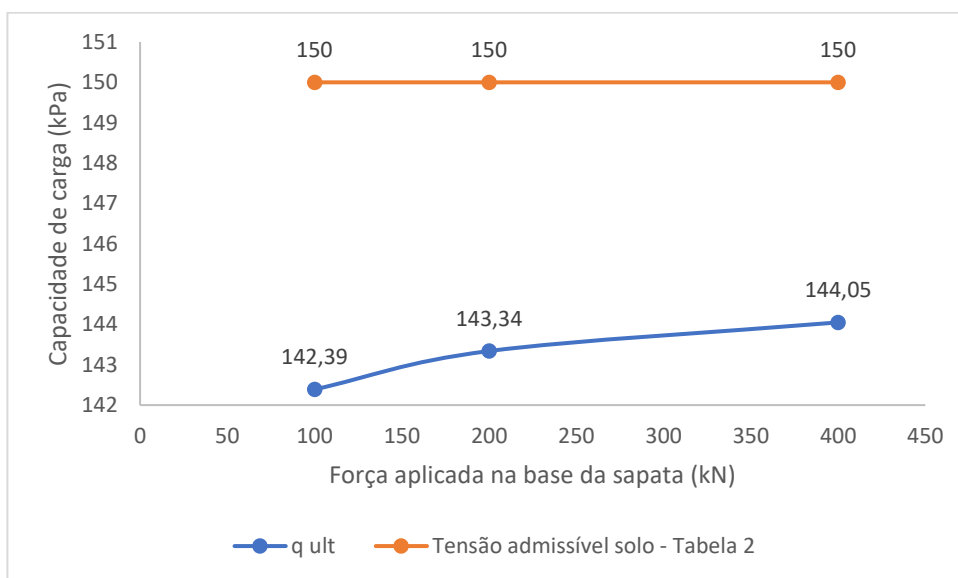
O caso três é semelhante ao caso um, observa-se que os valores adquiridos pela equação são menores aos obtidos pelo quando.

Nota-se também que a presença de um extrato rígido não influenciou a capacidade de carga para o método analítico, isso se deve a que a distância entre a sapata e o extrato rígido é de 2,5 metros e nesta situação a sua presença não influenciou nos valores obtidos pela equação

#### 4.3.4 Caso 4: sapatas localizadas a dois metros da superfície do terreno e presença de extrato rígido

O Gráfico 14 encontra-se os valores da capacidade de carga para o caso 4 e a tensão admissível do solo.

Gráfico 14 - Argila dura (estrato rígido) - Caso 4



Fonte: Elaborado pela autora

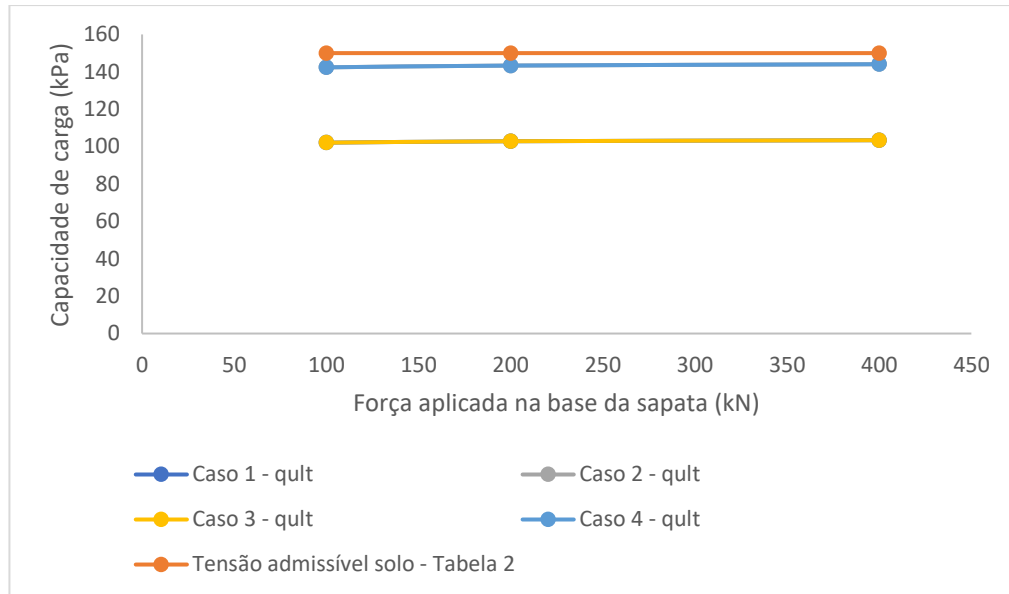
Neste caso, ocorre algo semelhante ao caso dois, pois as sapatas estão assentadas a uma profundidade de 2 metros.

Consta-se que a presença de um extrato rígido não influenciou os valores obtidos pelo método analítico.

Como os valores obtido pelo Quadro são superiores aos da equação, para que o dimensionamento das sapatas seja realizado a favor da segurança, o recomendado é utilizar o método que possui os valores mais conservadores. Novamente, destaca-se a proximidade dos valores obtidos pelos dois métodos.

#### 4.3.5 Comparação dos quatros casos para o mesmo tipo de solo:

Gráfico 15 - Argila média - Todos os casos



Fonte: Elaborado pela autora

Ao analisar os valores obtidos pelo método analítico dos quatros casos de estudo, pode-se observar que todos apresentam valores inferiores aos da Tabela 2. Portanto, a favor da segurança, o indicado seria adotar os valores do primeiro método.

O gráfico acima explicita os valores iguais calculados para o caso um e o caso três, o mesmo ocorre para o caso dois e caso 4, havendo assim a sobreposição das curvas.

Pode-se verificar que a profundidade em que a sapata será assentada é um fator que influencia no valor da capacidade de carga do solo para o caso analítico, pois o coeficiente de coesão não drenado é obtido de acordo com a profundidade, é possível observar isso no gráfico.

Outro fator importante é a presença de extrato rígido, para estes casos estudados concluiu-se que não teve nenhuma influência na capacidade de carga do terreno.

Apesar dos valores encontrados por cada um dos métodos serem distintos, quando comparado os valores do método analítico com os valores do quadro, constata-se que estão bem próximos. No entanto, convém sempre verificar este valor através do método analítico.

## 5 CONCLUSÃO

De acordo com o trabalho verificou-se que o processo de pré-dimensionamento de sapatas é muito importante e com isso deve-se dar muita atenção a esta etapa, porém realizar os cálculos manualmente leva muito tempo além de estar sujeito a erros cometidos pelo projetista.

Outro ponto importante, é que os métodos utilizados para obter a capacidade de carga do terreno, o método analítico e o método prescritivo que se utiliza de uma tabela, podem apresentar valores diferentes para o mesmo tipo de solo.

Diante disso, a pesquisa teve como objetivo geral o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o dimensionamento de sapatas de acordo com os EC2 e EC7. Constata-se que o objetivo geral foi atendido, pois conseguiu-se elaborar folha de cálculo desenvolvida em VBA para auxiliar o projetista no dimensionamento de sapatas.

Ademais, tinha-se como objetivo específico a análise de dois métodos utilizados para a obtenção da capacidade de carga do solo. O primeiro método é baseado em valores pré-determinados por uma tabela, denominado Tensão admissível do solo. Já no segundo método, a capacidade de carga é determinada através de equações.

Concluiu-se que, para a maioria dos casos, os valores obtidos pela Tabela 2 são mais conservadores que os valores obtidos pelo método analítico. Apenas quando as sapatas estão assentadas sobre a superfície do terreno que os valores da Tabela 2 são superiores ao obtidos pelo método analítico.

Verificou-se ainda, que pelo método analítico, o valor da capacidade de carga do solo é influenciado por alguns fatores, como a profundidade de assentamento da sapata e a presença de um extrato rígido.

Percebe-se que o trabalho desenvolvido teve suas limitações, pois poderia abranger mais funcionalidades no programa, porém devido a limitação de tempo não foi possível. Visto que, o trabalho iniciou-se com o aprendizado da linguagem de programação VBA. Primeiro, buscou-se o conhecimento na área de programação e utilização da ferramenta Excel VBA. Depois, à medida que os estudos relacionados ao

dimensionamento de sapatas foram avançando, foi se desenvolvendo a ferramenta computacional.

Para que a ferramenta apresentasse de forma intuitiva e de fácil utilização para o usuário, por isso buscou-se conhecimentos no desenvolvimento de interface gráfica. Ao final de cada etapa concluída na programação da ferramenta, vários testes foram realizados para ter a certeza de seu funcionamento e neste processo vários erros e “*bugs*” surgiram e a busca por solucioná-los demandaram muita pesquisa e tempo.

Desta maneira, concluiu-se a elaboração do Programa Sapatas, da melhor forma possível, de acordo com os recursos disponíveis, habilidades aprendidas e com o tempo estipulado.

## **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

- Adicionar ao programa ferramentas que possibilitam calcular o assentamento das sapatas;
- Também poderia adicionar ao programa ferramentas para dimensionar sapatas flexíveis;
- Além de dimensionar sapatas de canto, sapatas corridas e sapatas com pilar não centralizado;
- Realizar a verificação ao punçoamento para sapatas flexíveis;
- Correções no código do programa para eventuais erros que ele possa apresentar.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, ABNT NBR 6122: 2010 Projecto e execução de fundações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

Appleton, Júlio; Câmara, José; Marcão, Carla. Folhas de apoio às aulas da disciplina de Estruturas de betão II, IST, Ano letivo 2008/2009.

Brazão Farinha, J. S.; Correia Dos Reis, A. Tabelas técnicas. Edições Técnicas ETL, 1998.

Coduto, Donald P.; Kitch, William A.; Yeung, Manchu Ronald. Foundation design: principles and practices. USA: Prentice Hall, 2001.

Cintra, José Carlos A., et al. Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos. Oficina de Textos, 2013.

Cintra, José Carlos A.; Aoki, Nelson; Albiero, José Henrique. Fundações diretas: projeto geotécnico. Oficina de textos, 2011.

Da Cunha Teixeira, Jorge Fernando. Elaboração de um programa de cálculo automático para dimensionamento de sapatas retangulares de betão armado submetidas a esforços de flexão composta desviada, de acordo com as disposições do EC2 e EC7. 2015.

De Alencar Velloso, Dirceu; De Rezende Lopes, Francisco. Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. Oficina de Textos, 2011.

Hachich, Waldemar Et Al. Fundações. Teoria e prática, Pini Lta, Brasil, 1998.

Introdução ao VBA no Office. Microsoft,2022. Disponível em:<<https://learn.microsoft.com/pt-br/office/vba/library-eference/concepts/getting-started-with-vba-in-office/>>. Acesso em: 10 de jul. de 2022.

Matos Fernandes, Manuel. Mecânica dos Solos. Introdução à Engenharia Geotécnica. Volume 2. Porto: FEUP edições, 2011.

Mandel, J.; Salencon, J. Force portante d'un sol sur une assise rigide (étude théorique. Geotechnique, v. 22, n. 1, p. 79-93, 1972.

NP EN 1990. 2009, Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1992-1-1. 2010, Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1997-1. 2010, Eurocódigo 7 – Projeto geotécnico. Parte 1: Regras gerais. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

## 7 ANEXO A: FATORES CORRETIVOS ( $F_C$ , $F_V$ , $F_Q$ )

Gráfico 16 - Fator corretivo  $f_c$  (ângulo de atrito  $0^\circ$ )

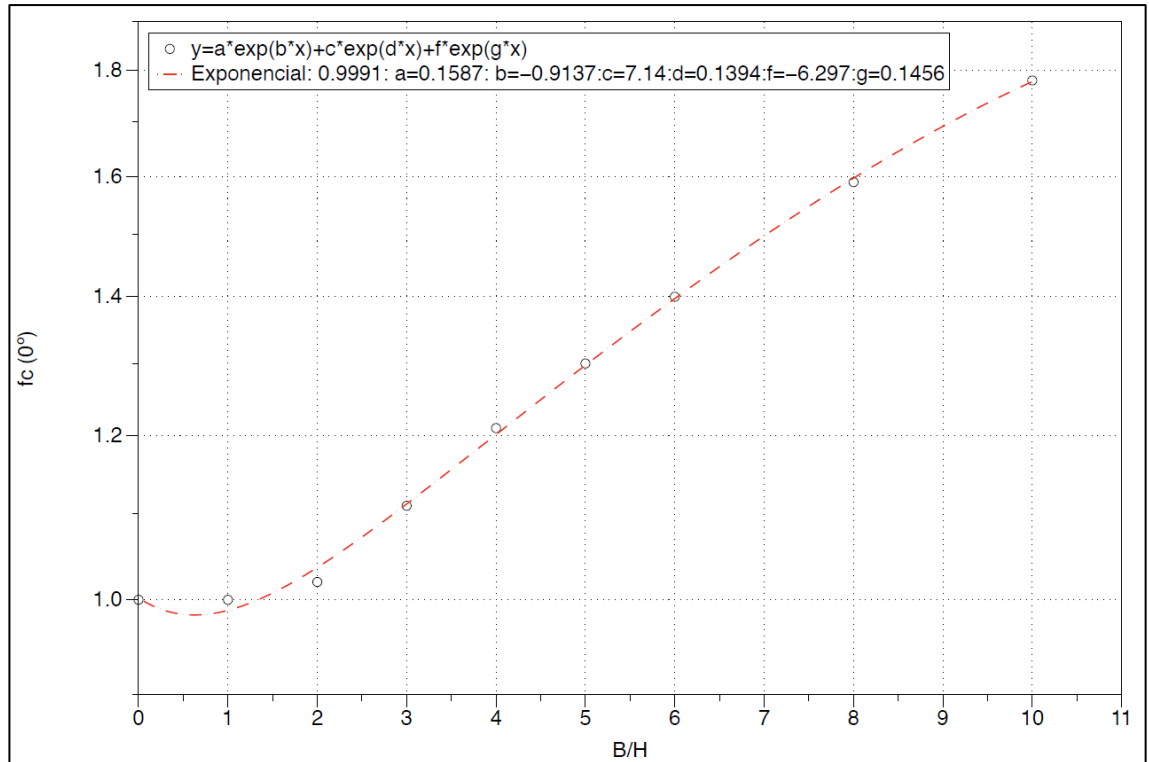


Gráfico 17 - Fator corretivo  $f_c$  (ângulo de atrito  $10^\circ$ )

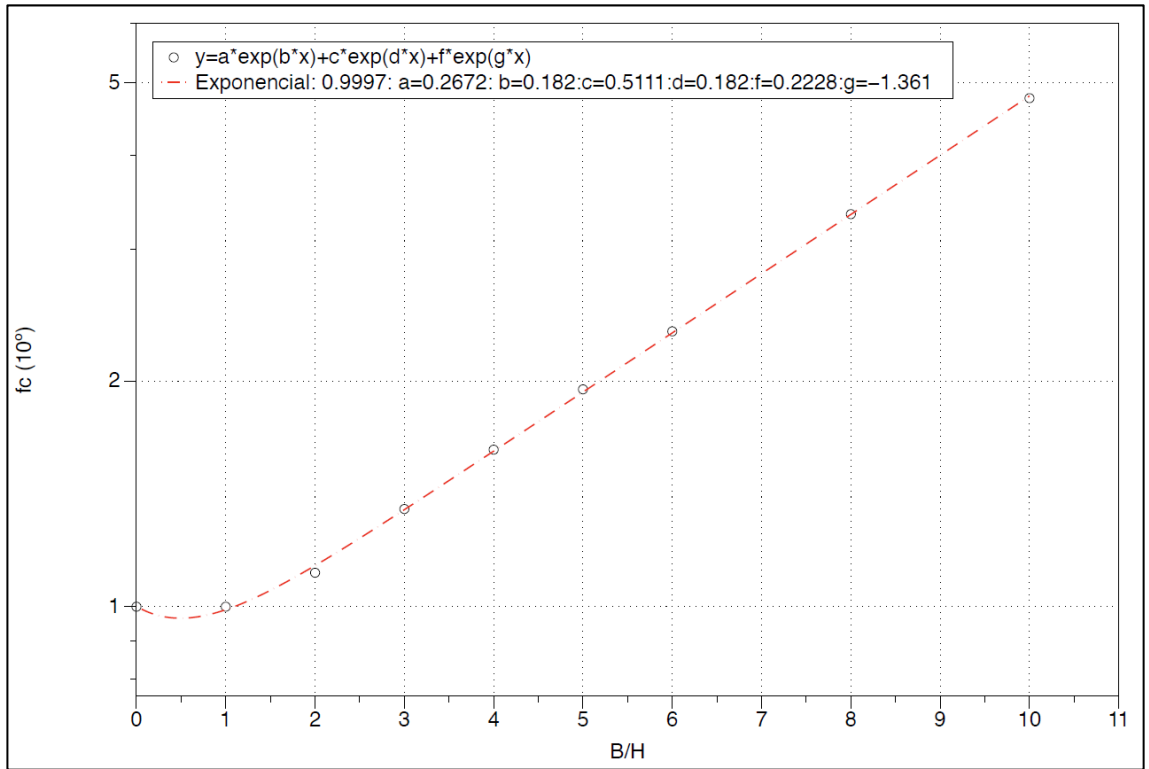


Gráfico 18 - Fator corretivo  $f_c$  (ângulo de atrito  $20^\circ$ )

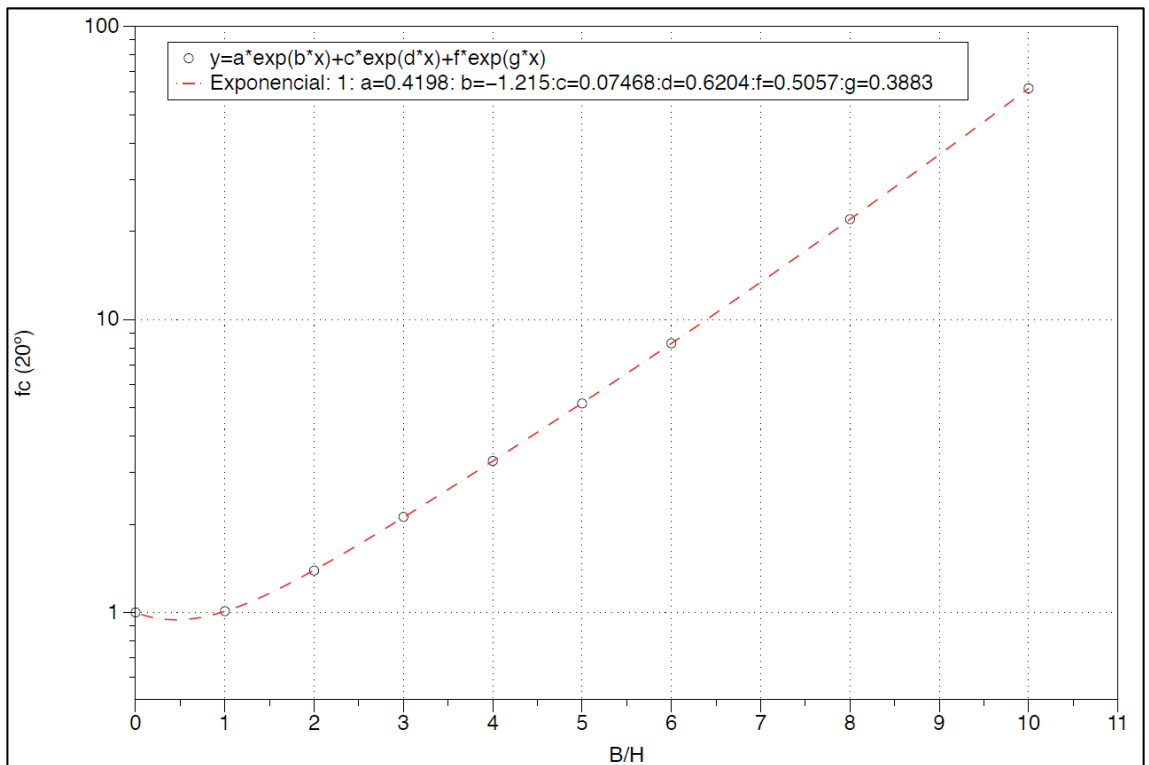


Gráfico 19 - Fator corretivo  $f_c$  (ângulo de atrito  $30^\circ$ )

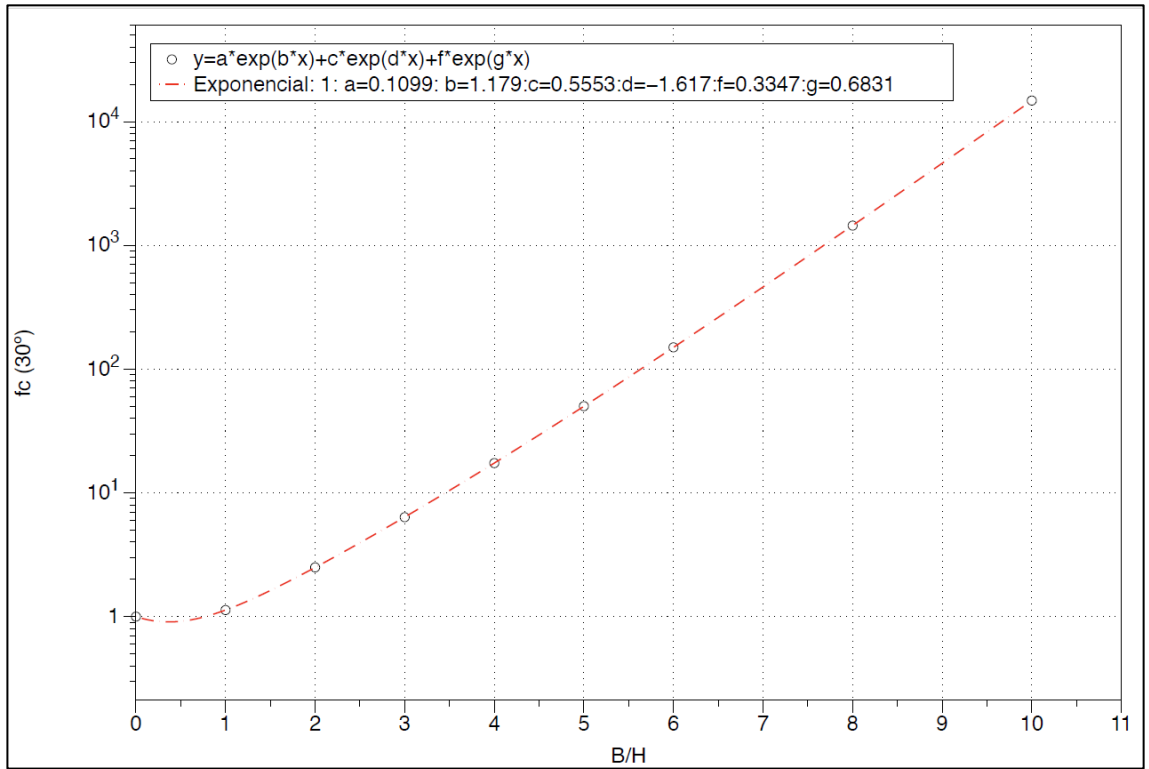


Gráfico 20 - Fator corretivo  $f_c$  (ângulo de atrito  $36^\circ$ )

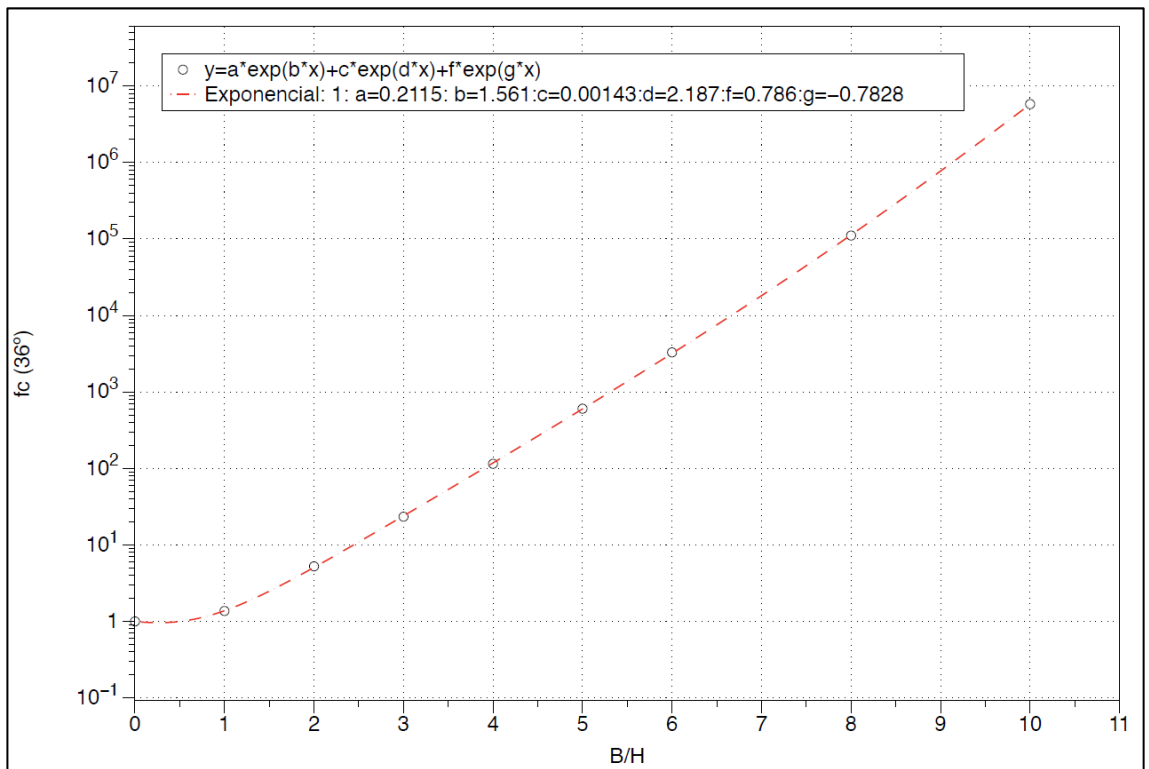


Gráfico 21 - Fator corretivo  $f_c$  (ângulo de atrito  $40^\circ$ )

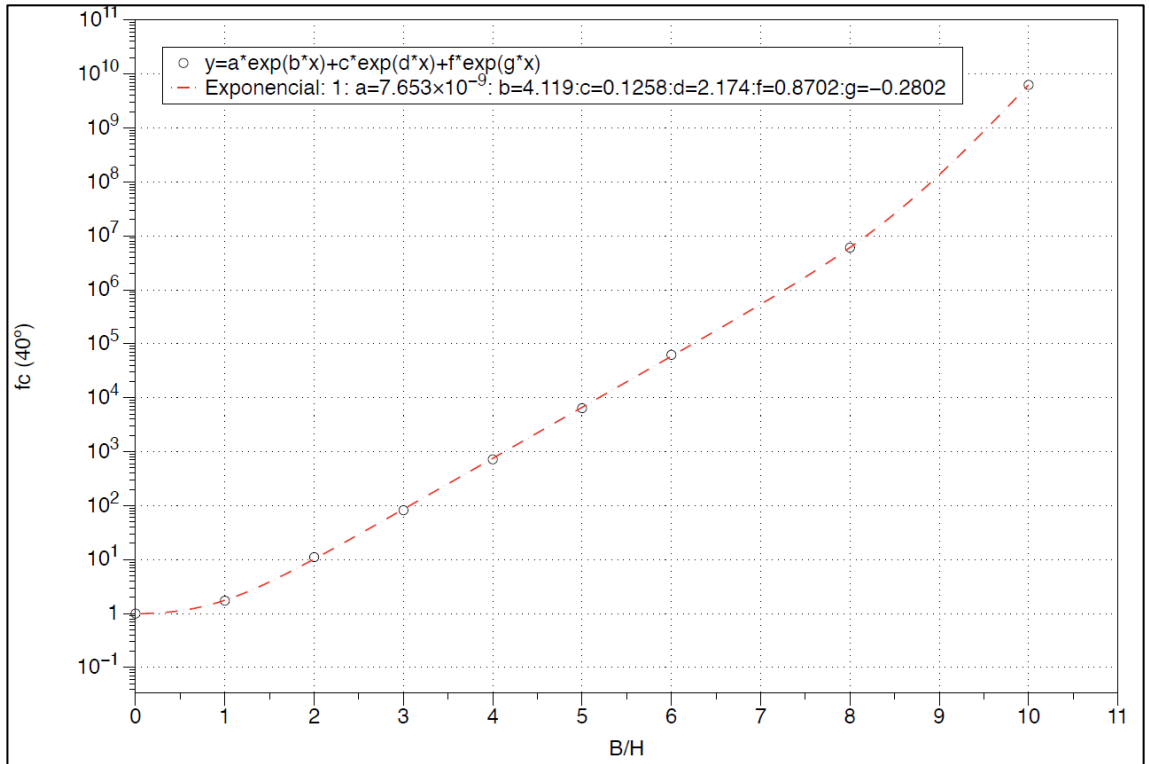


Gráfico 22 - Fator corretivo  $f_c$  (ângulo de atrito  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 36^\circ$  e  $40^\circ$ )

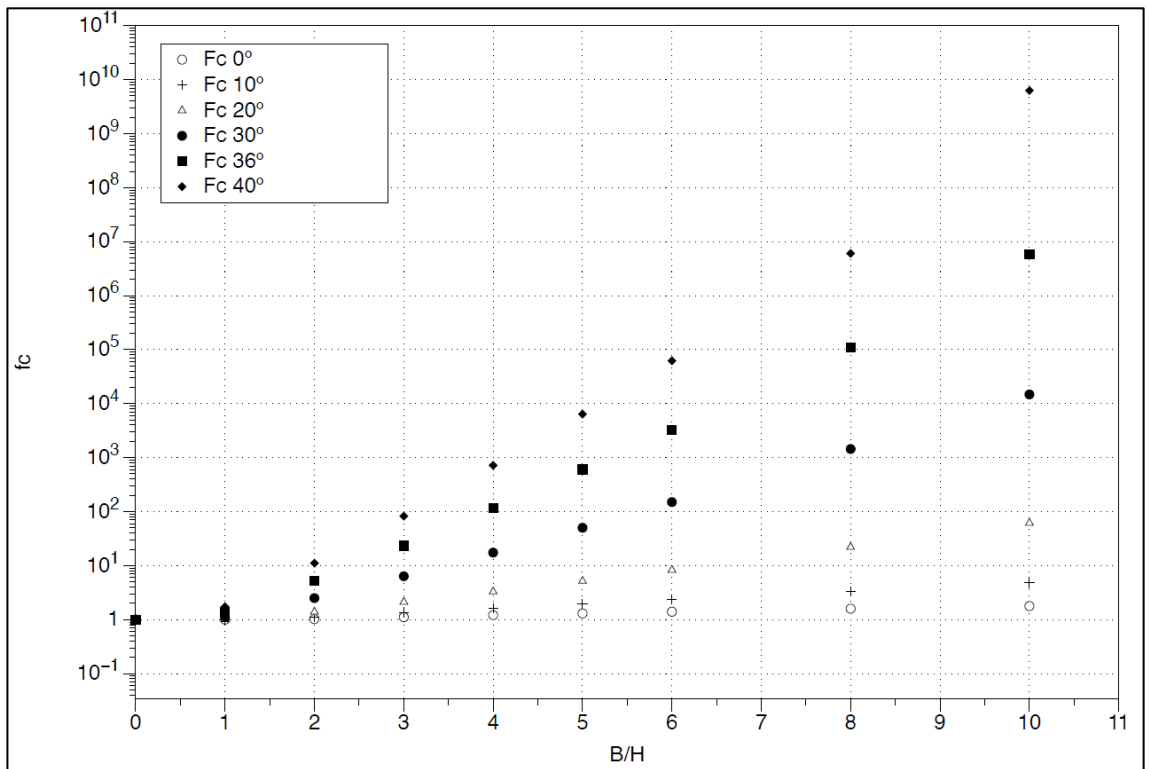


Gráfico 23 - Fator corretivo  $f_\gamma$  (ângulo de atrito  $0^\circ$ )

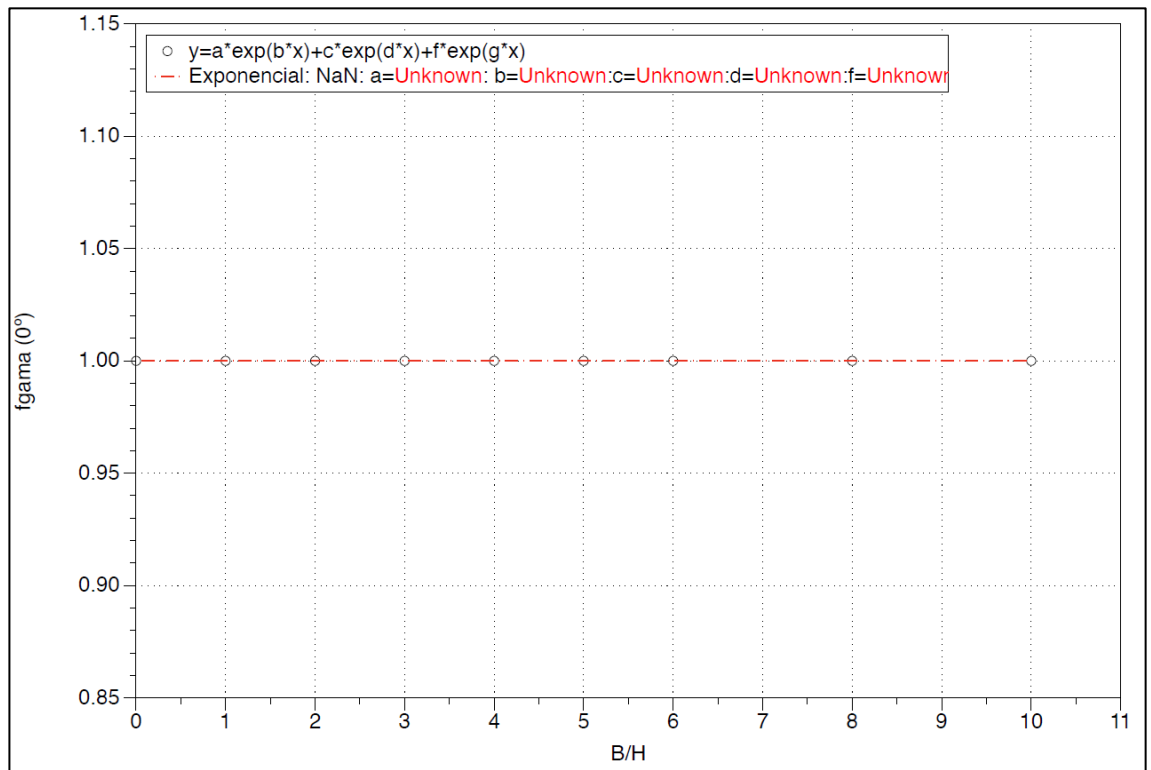


Gráfico 24 - Fator corretivo  $f_\gamma$  (ângulo de atrito  $10^\circ$ )

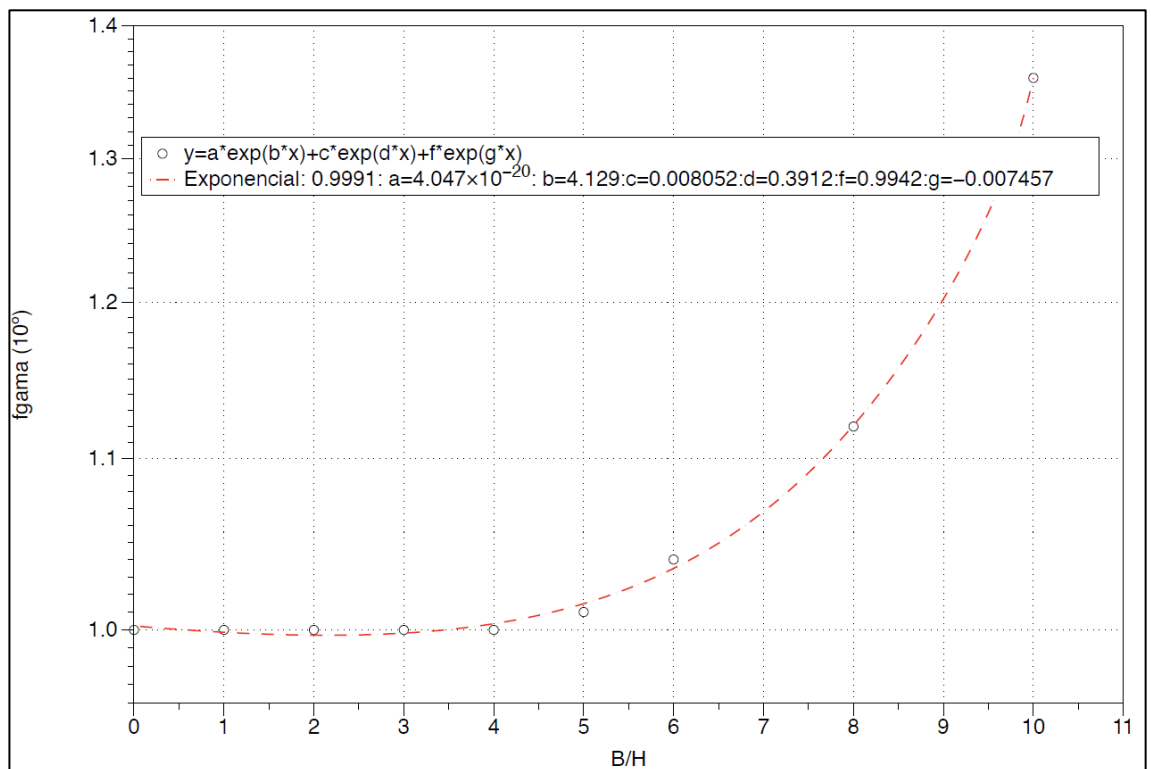


Gráfico 25 - Fator corretivo  $f_\gamma$  (ângulo de atrito 20°)

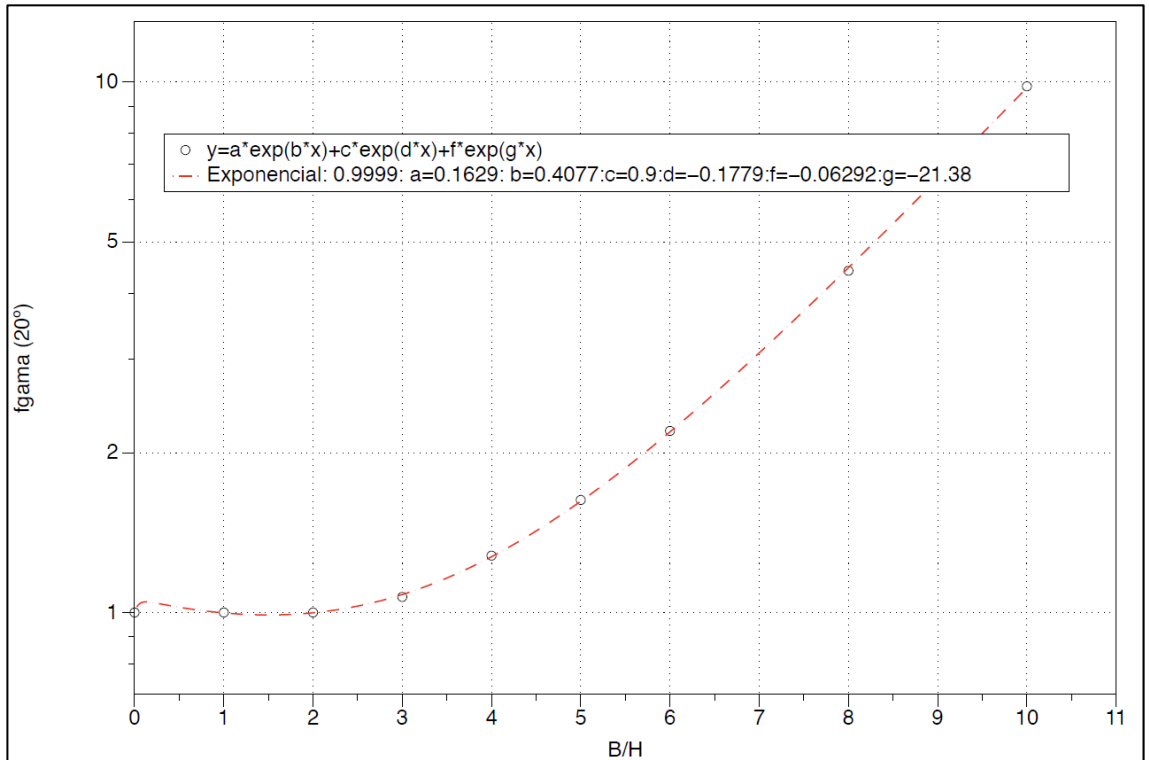


Gráfico 26 - Fator corretivo  $f_\gamma$  (ângulo de atrito 30°)

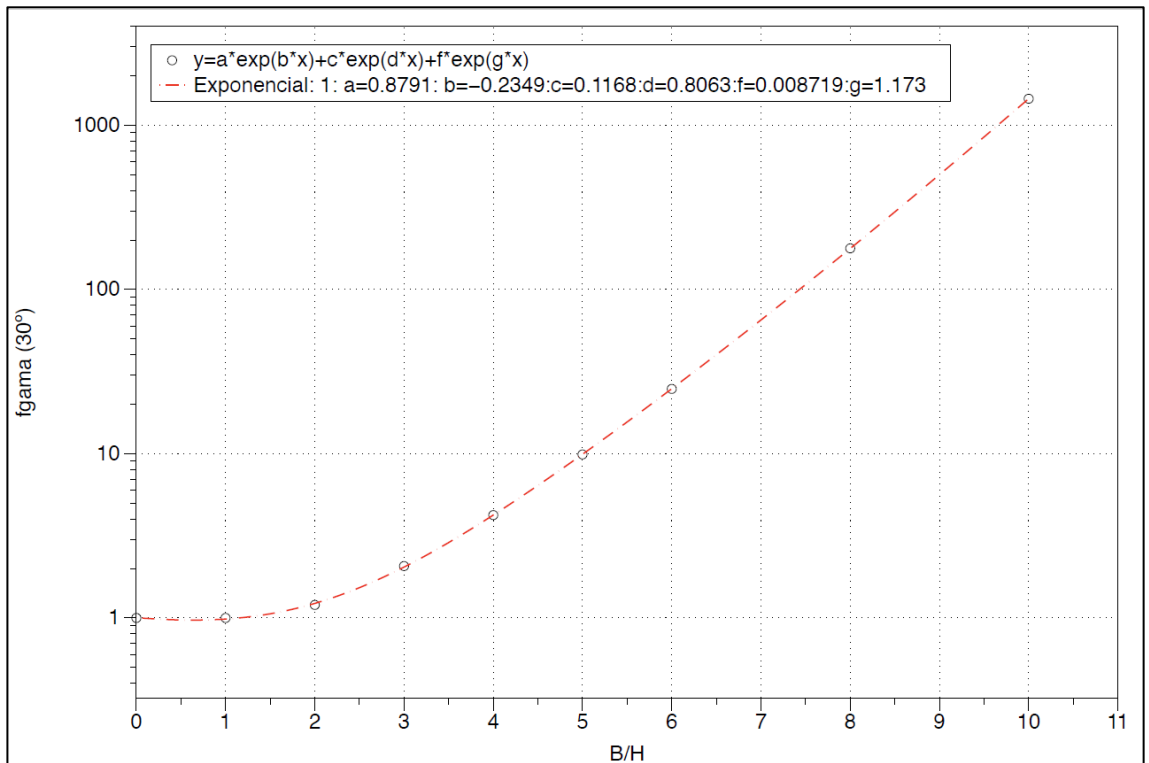


Gráfico 27 - Fator corretivo  $f_y$  (ângulo de atrito  $36^\circ$ )

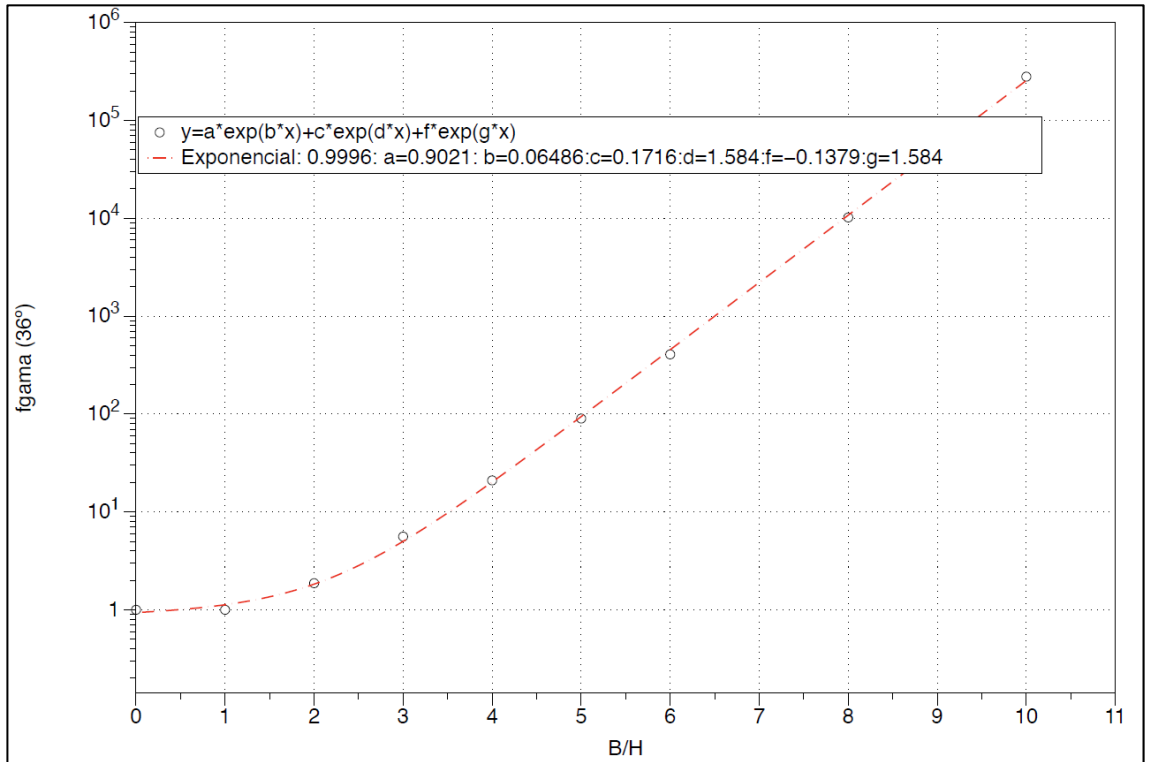


Gráfico 28 - Fator corretivo  $f_y$  (ângulo de atrito  $40^\circ$ )

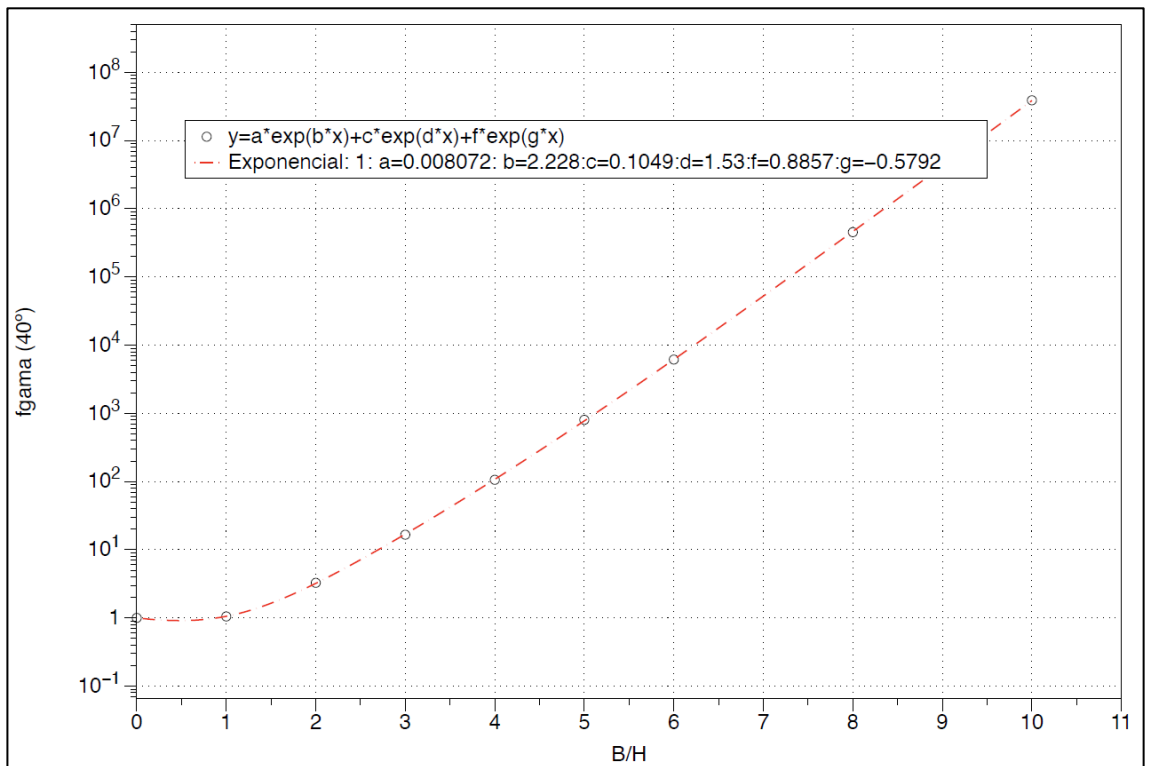


Gráfico 29 - Fator corretivo  $f_y$  (ângulo de atrito  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 36^\circ$  e  $40^\circ$ )

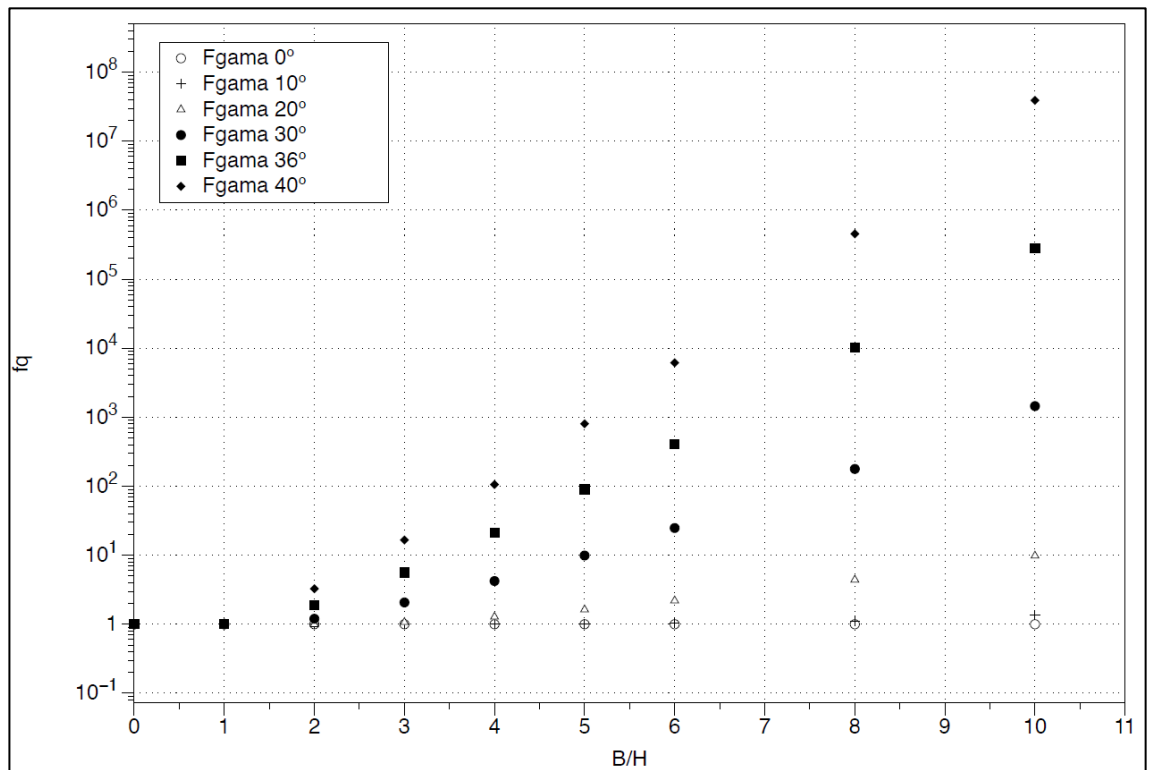


Gráfico 30 - Fator corretivo  $f_q$  (ângulo de atrito  $0^\circ$ )

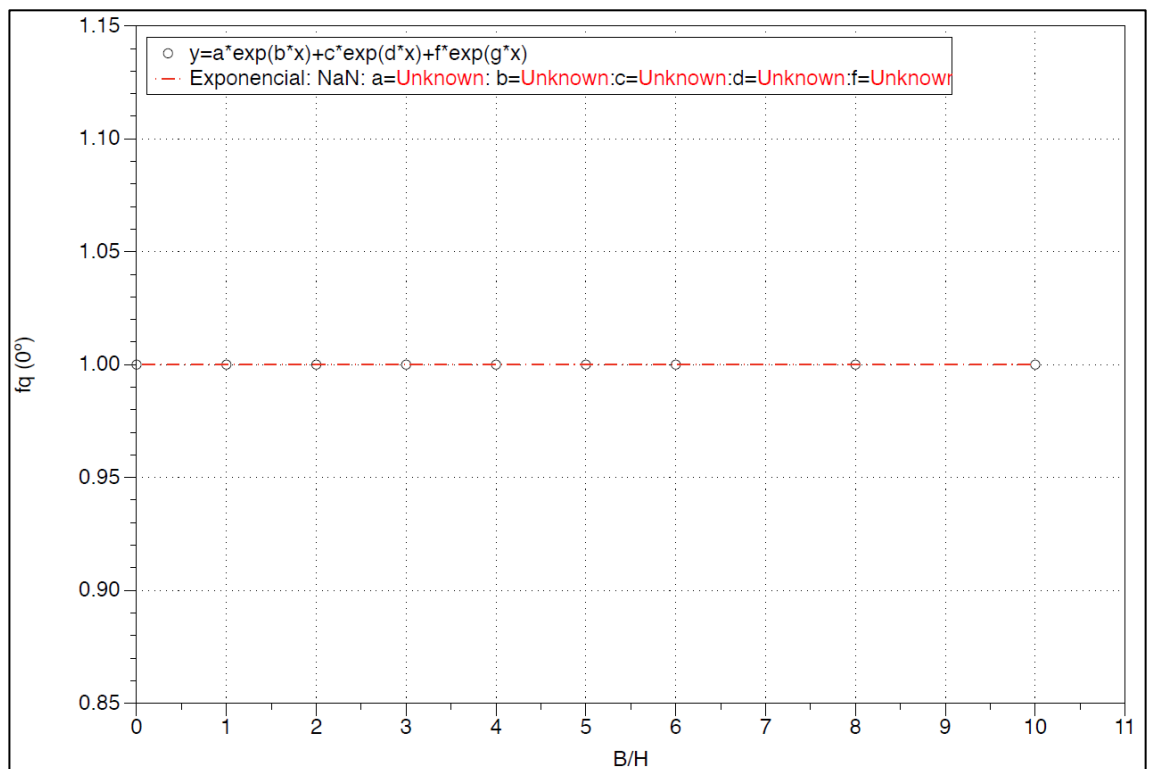


Gráfico 31 - Fator corretivo fq (ângulo de atrito 10°)

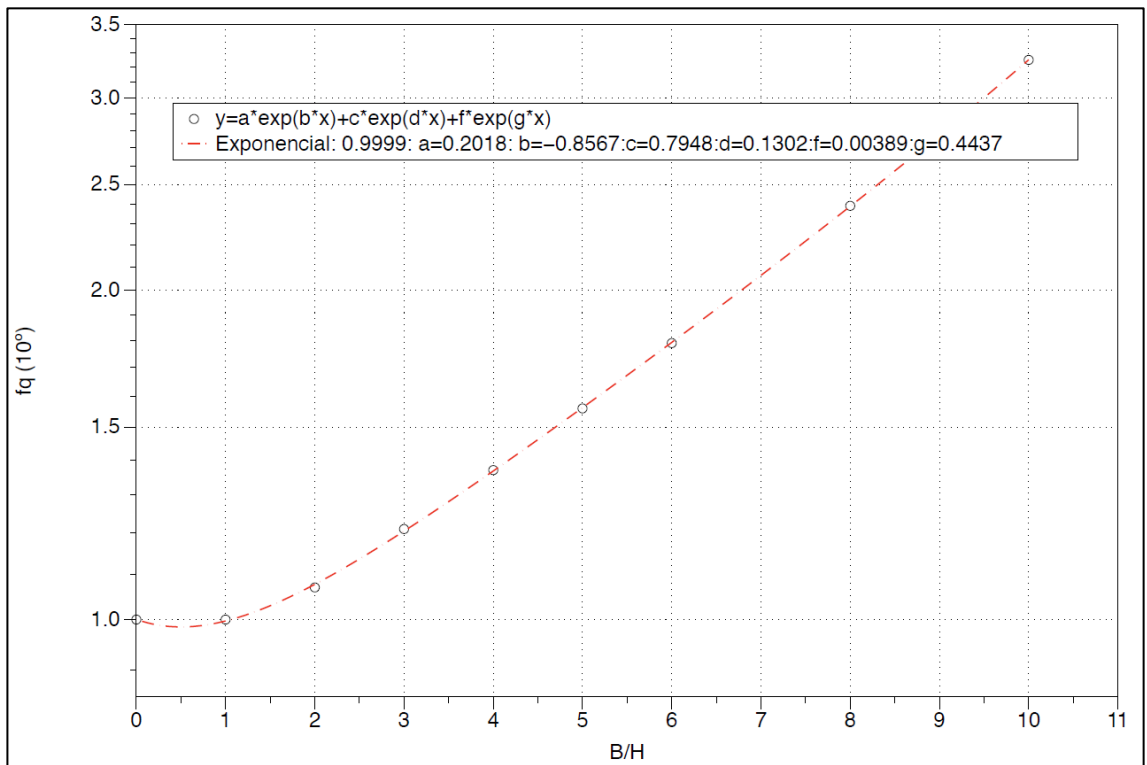


Gráfico 32 - Fator corretivo fq (ângulo de atrito 20°)

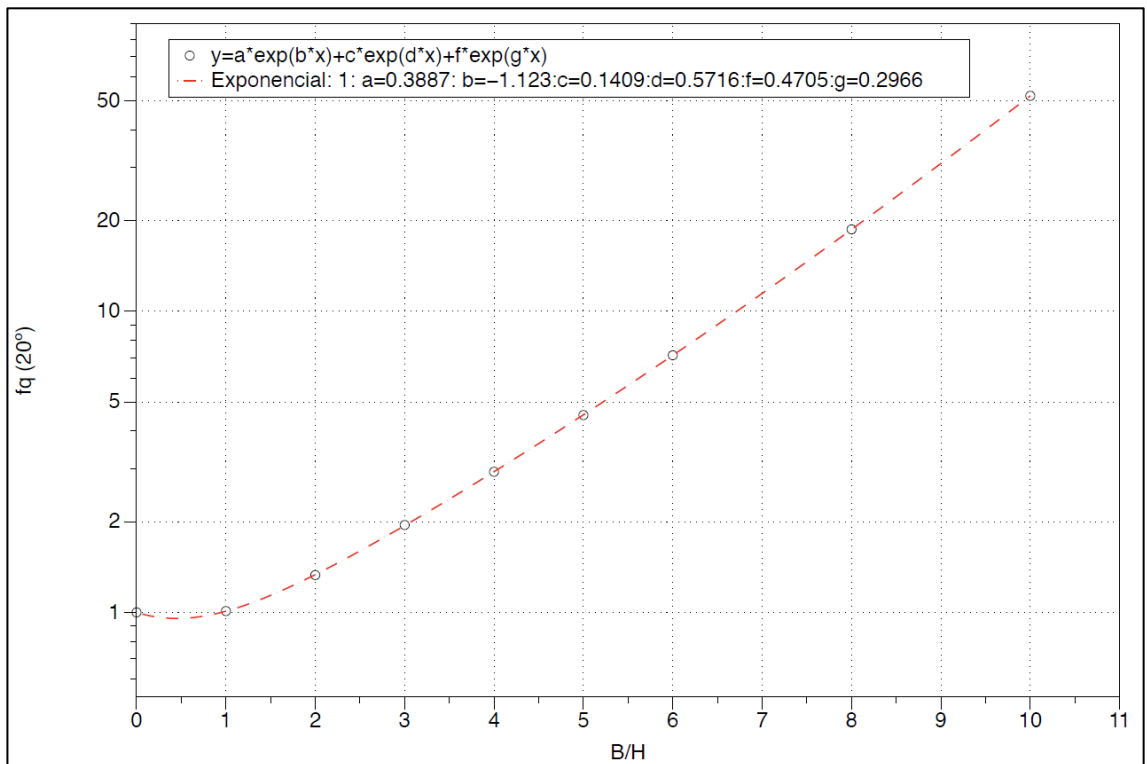


Gráfico 33 - Fator corretivo fq (ângulo de atrito 30°)

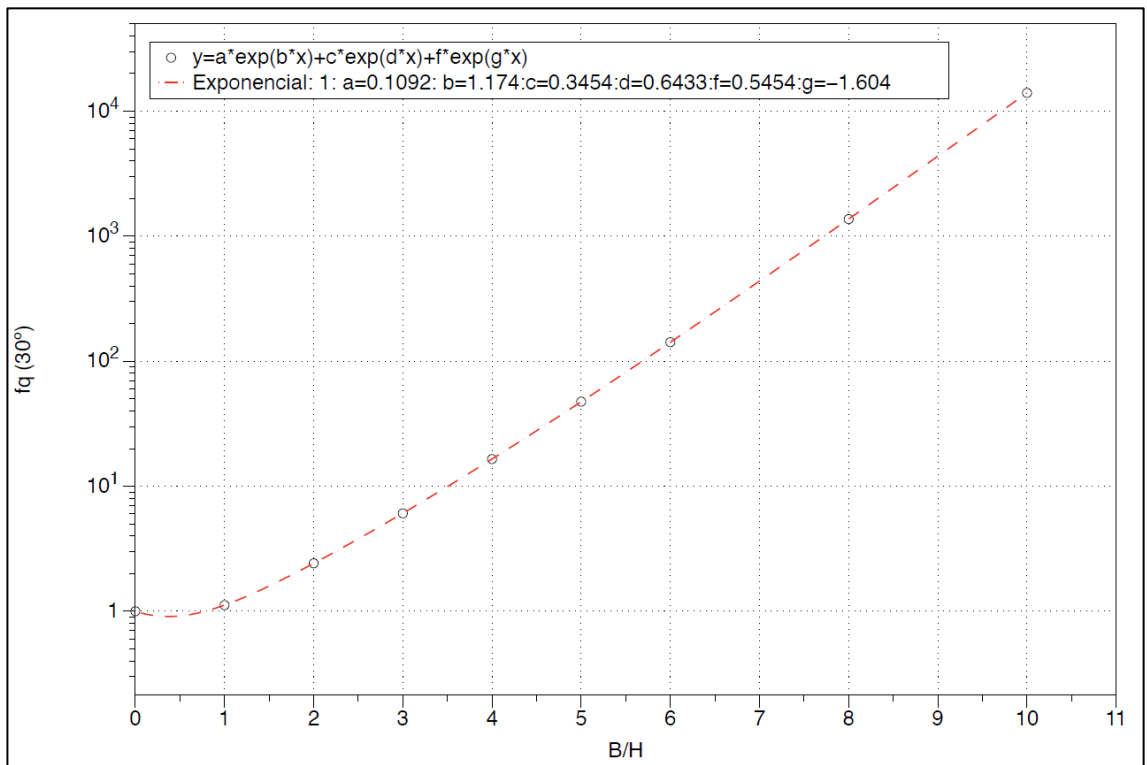


Gráfico 34 - Fator corretivo fq (ângulo de atrito 36°)

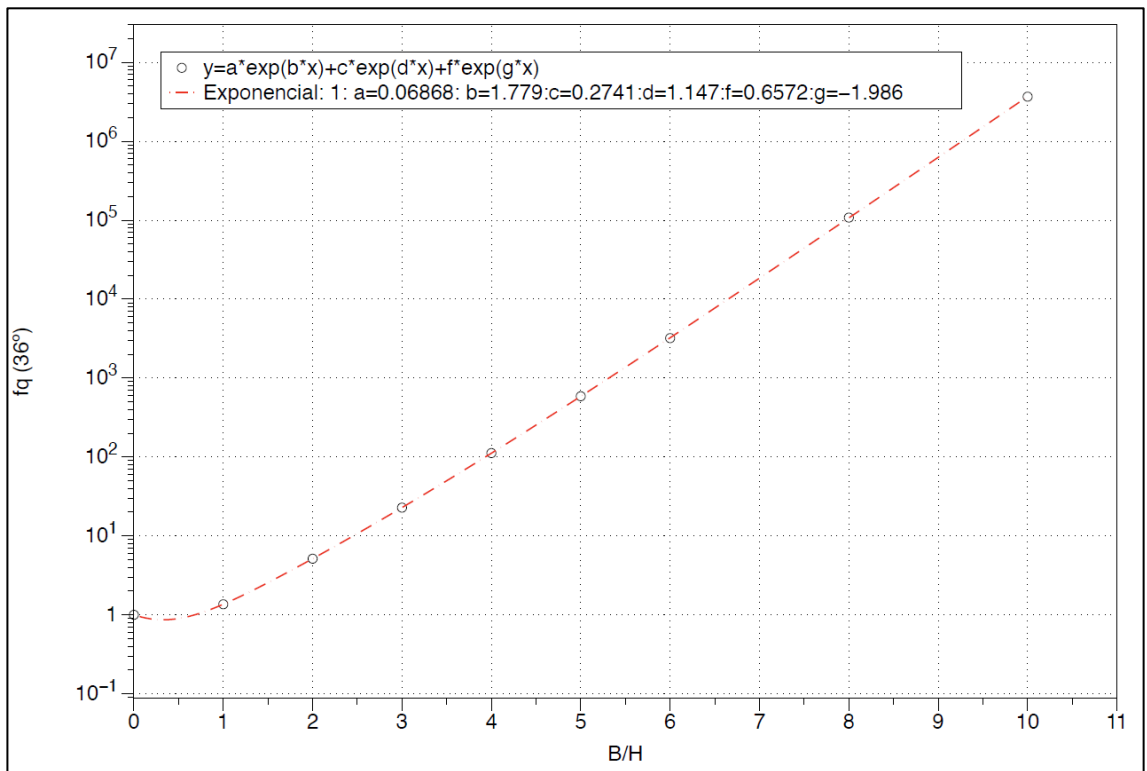


Gráfico 35 - Fator corretivo fq (ângulo de atrito 40°)

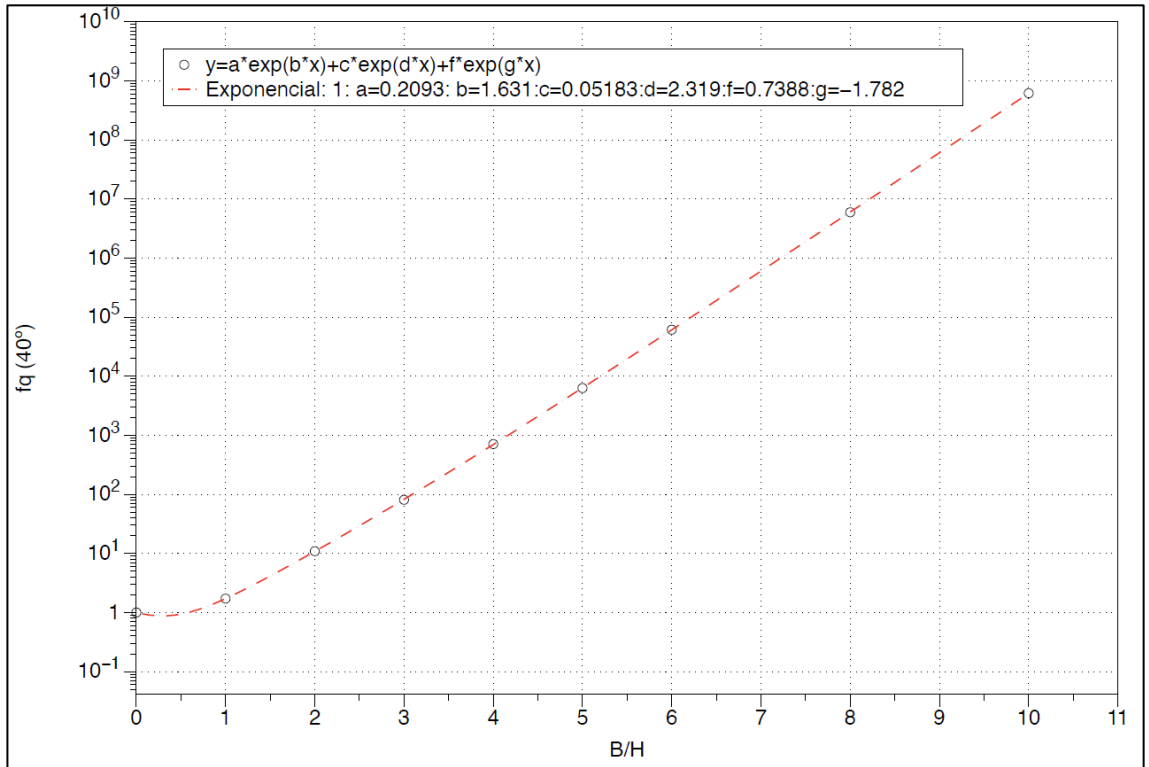
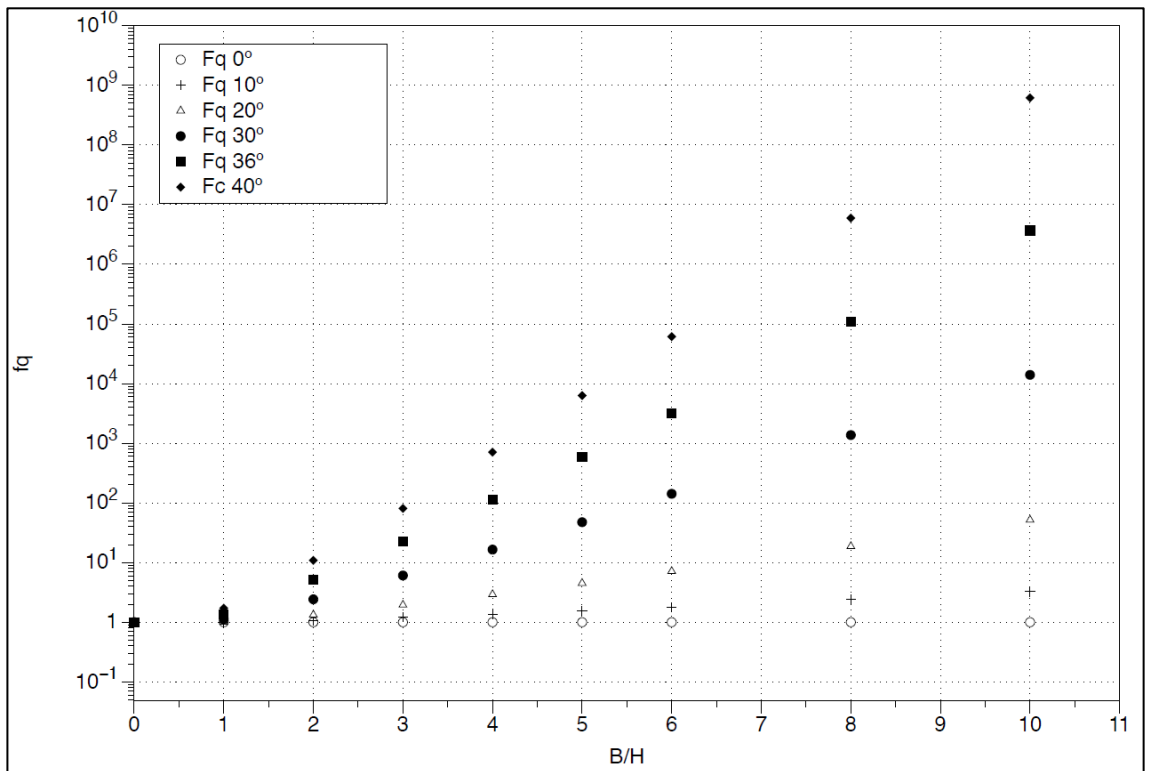


Gráfico 36 - Fator corretivo fq (ângulo de atrito 0°, 10°, 20°, 30°, 36° e 40°)



# 8 ANEXO B – MODELO DE RELATÓRIO GERADO PELO PROGRAMA SAPATAS

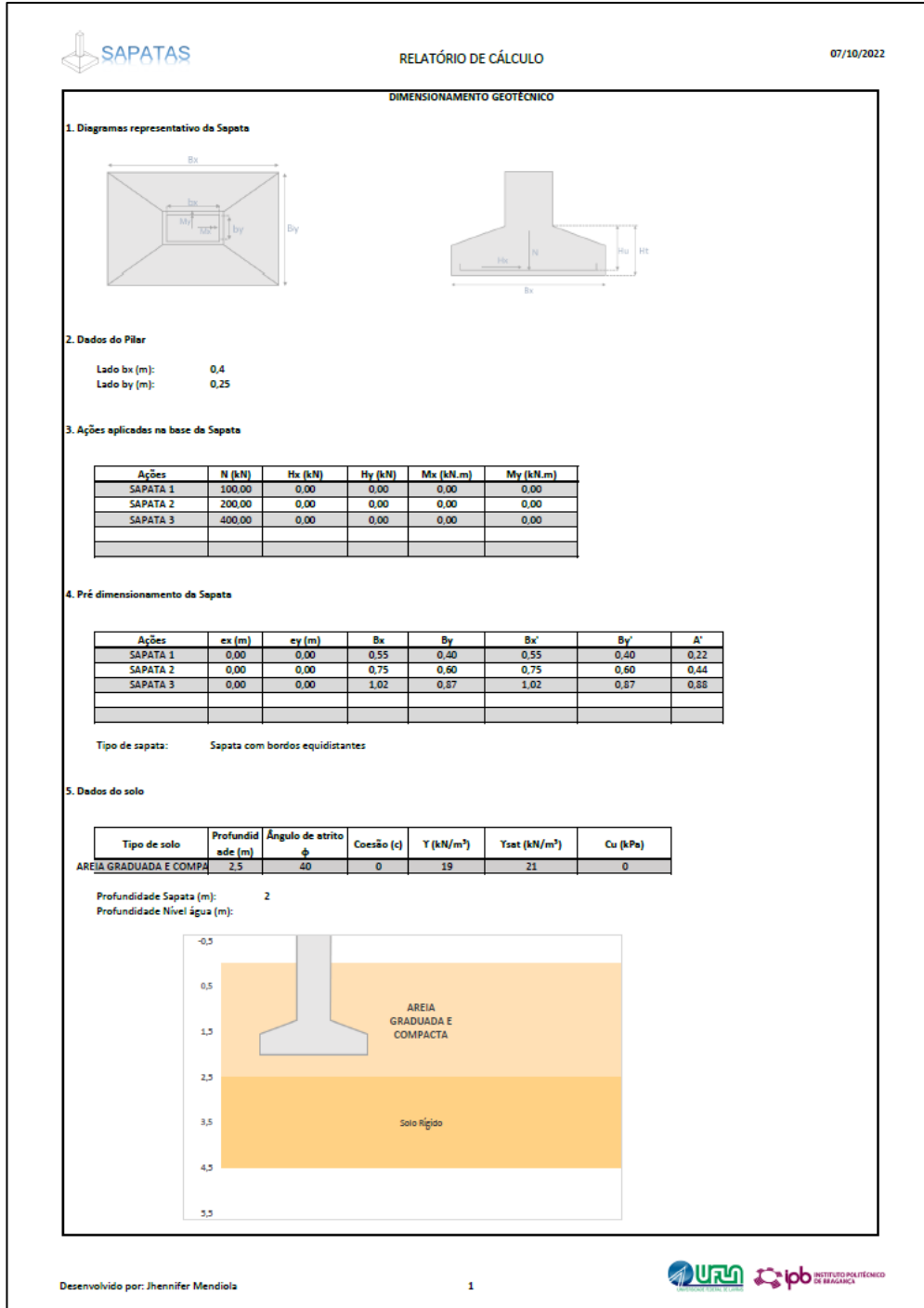
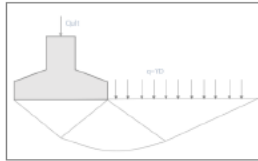


Figura 44 - Modelo de Relatório (pág. 1)

6. CAPACIDADE DE CARGA



Tensões Efetivas

$$q_{ult} = cN_c \times (S_c \times f_c) + qN_q \times (S_q \times f_q) + \frac{1}{2}B\gamma N_\gamma \times (S_\gamma \times f_\gamma)$$

Tensões Totais

$$q_{ult} = (2 + \pi) \times C_u \times (S_c \times f_c)q$$

Estado de tensões da sapata analisada:

Tensões Efetivas

Fatores corretivos

Ações	Nc	NY	Nq	Sc	SY	Sq	fc	fY	fq
SAPATA 1	75.32	106.06	64.2	2.18	0.45	2.16	1.42	1	1.29
SAPATA 2	75.32	106.06	64.2	2.07	0.5	2.05	2.34	1	2.41
SAPATA 3	75.32	106.06	64.2	2	0.54	1.99	6.07	1	6.54

Sobrecarga (q): 38

Capacidade de Carga (kN/m²):

Ações	qult
SAPATA 1	6909.58
SAPATA 2	12330.54
SAPATA 3	32109.39

7. VERIFICAÇÕES

7.1. Verificação da Capacidade de Carga do solo:

$$Nsd \leq Q_{ult} \quad Q_{ult} = q_{ult} \times \text{Área}$$

Ações	qult	Qult=A x qult	Vsd ≤ Qult
SAPATA 1	6909.58	1520.11	OK
SAPATA 2	12330.54	5425.44	OK
SAPATA 3	32109.39	28256.26	OK

7.2. Verificação de deslizamento pela base da Sapata:

Tensões Efetivas

$$F_{resist} = c_u A' + N \times tg \theta'_b$$

Tensões Totais

$$F_{resist} = c_u A'$$

$$\theta'_b = \frac{2}{3} \theta' \rightarrow \text{fundações pré fabricadas}$$

$$\theta'_b = \theta' \rightarrow \text{fundações betonadas contra o terreno}$$

Ações	Hsd	Fresist	Hsd ≤ Fresist
SAPATA 1	0.00	83.91	OK
SAPATA 2	0.00	167.82	OK
SAPATA 3	0.00	335.64	OK

Figura 45 - Modelo de Relatório (pág. 2)

DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

1. Dimensões adotada para a sapata:

Bx (m): 1,05  
By (m): 0,9

2. Verificação de rigidez de sapata

$$\frac{Bx - bx}{4} \leq H \quad 0,17$$

Ht (m): 0,3

$$\frac{By - by}{4} \leq H \quad 0,17$$

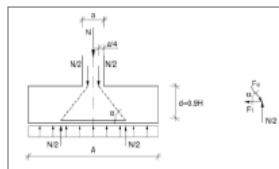
3. Cálculo da armadura

Concreto: C25/30

Aço: A400

3.1. Sapatas com carga centrada (e=0)

Caso 1



Igualando as duas equações é possível determinar a Força de Tração:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{N}{F_t} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{\frac{Bx - bx}{4}}$$

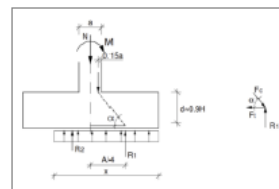
$$F_t = \frac{N(Bx - bx)}{8d}$$

A área de armadura será:

$$\left(\frac{A_s}{s}\right) = \frac{F_t}{f_{tyd}} \times \frac{1}{x}$$

3.2. Sapata com excentricidade (e ≠ 0)

Caso 2  $e \leq \frac{a}{6}$



Igualando as duas equações é possível determinar a Força de Tração:

$$e = \frac{M}{N} \quad x = A - 2e \quad R_1 = \frac{A}{2} \times \frac{N}{A - 2e}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_1}{F_t} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{A/4 - 0,35a}$$

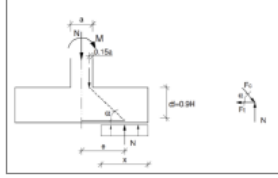
$$F_t = \frac{R_1(A/4 - 0,35a)}{d}$$

A área de armadura será:

$$\left(\frac{A_s}{s}\right) = \frac{F_t}{f_{tyd}} \times \frac{1}{x}$$

Figura 46 - Modelo de Relatório (pág. 3)

Caso 3  $e > \frac{\alpha}{4}$



Igualando as duas equações é possível determinar a Força de Tração:

$$e = \frac{M}{N} \quad x = A - 2e$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{N}{F_t} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{e - 0,35\alpha}$$

$$F_t = \frac{N(e - 0,35\alpha)}{d}$$

A área de armadura será:

$$\left(\frac{A_s}{s}\right) = \frac{F_t}{f_{ytd}} \times \frac{1}{x}$$

Ações	F <sub>t,x</sub>	(A <sub>s</sub> /s) <sub>x</sub>	F <sub>t,y</sub>	(A <sub>s</sub> /s) <sub>y</sub>	Caso (direção x)	Caso (direção y)
SAPATA 1	30,09	0,96	30,09	0,82	Caso 1	Caso 1
SAPATA 2	60,19	1,92	60,19	1,65	Caso 1	Caso 1
SAPATA 3	120,37	3,85	120,37	3,30	Caso 1	Caso 1

Valores adotados

Direção x		Direção y	
F <sub>t</sub>	120,38	F <sub>t</sub>	120,38
$\left(\frac{A_s}{s}\right)$	3,9	$\left(\frac{A_s}{s}\right)$	3,3

Figura 47 - Modelo de Relatório (pág. 4)