

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Rosnei Stefani de Oliveira

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA PROJETO
ESTRUTURAL DE SAPATAS RÍGIDAS ISOLADAS**

Porto Alegre
dezembro 2011

ROSNEI STEFANI DE OLIVEIRA

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA PROJETO
ESTRUTURAL DE SAPATAS RÍGIDAS ISOLADAS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientador: Nilo Cesar Consoli
Coorientador: Américo Campos Filho

Porto Alegre
dezembro 2011

ROSNEI STEFANI DE OLIVEIRA

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA PROJETO
ESTRUTURAL DE SAPATAS RÍGIDAS ISOLADAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 7 de dezembro de 2011

Prof. Nilo Cesar Consoli
PhD. pela Concordia University
Orientador

Prof. Américo Campos Filho
Dr. pela Escola Politécnica da USP
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Lucas Festugato
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Márcio Felipe Floss
Me. pela Universidade de Passo Fundo

Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
PhD. pela Concordia University

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho a minha mãe, Marilurdes, que sempre me apoiou e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação esteve ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Professores Nilo Cesar Consoli e Américo Campos Filho pela valiosa orientação, pelo incentivo e por todo o conhecimento transmitido durante o período de graduação.

À Profa. Carin Maria Schmitt, pelo auxílio e constante acompanhamento nestes dois semestres de elaboração do trabalho.

A minha mãe, Marilurdes, e a minha família pelo apoio, pelo incentivo e por todas as oportunidades que me concederam ao longo de minha vida.

A minha namorada, Gabriela, pelo incentivo e compreensão durante a elaboração do trabalho de diplomação.

Aos professores da Escola de Engenharia, por ter tido a honra de me tornar aluno, e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino de excelência.

Para realizar grandes conquistas, devemos não apenas agir, mas também sonhar; não apenas planejar, mas também acreditar.

Anatole France

RESUMO

Este trabalho teve como finalidade a elaboração de um programa computacional para o projeto estrutural de sapatas rígidas de concreto armado, que abrange o dimensionamento dessas fundações com base quadrada ou retangular submetidas à esforços de compressão ou tração e o posterior detalhamento das armaduras resultantes, tendo como base a NBR 6118:2007 – Projeto de Estruturas de Concreto: procedimento – e a NBR 6122: 2010 – Projeto e Execução de Fundações. O programa foi elaborado utilizando-se a linguagem de programação *Visual Basic*, o que possibilitou a criação de uma interface gráfica detalhada, prática e acessível. O programa determina, a partir dos dados de entrada fornecidos pelo usuário, a capacidade de carga do solo de fundação; a área de aço necessária capaz de resistir, em conjunto com o concreto, aos esforços solicitantes; e o detalhamento da sapata, que abrange o arranjo da armadura longitudinal e dos estribos regulares e suplementares.

Palavras-chave: Sapatas Rígidas de Concreto. NBR 6122:2010. NBR 6118:2007.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do projeto de diplomação	20
Figura 2 – Comportamento de uma sapata sob carga vertical	22
Figura 3 – Tipos de ruptura: (a) generalizada, (b) localizada e (c) por puncionamento ..	24
Figura 4 – Áreas efetivas de fundação, inclusive áreas retangulares equivalentes	26
Figura 5 – Fatores de forma	27
Figura 6 – Regime de ruptura para sapatas em solos fracos	32
Figura 7 – Regime de ruptura para sapatas em solos resistentes	34
Figura 8 – Características geométricas das sapatas.....	36
Figura 9 – Seção de referência I	39
Figura 10 – Distribuição das armaduras	40
Figura 11 – Esforço cortante solicitante na seção de referencia II	42
Figura 12 – Termo de responsabilidade	45
Figura 13 – Janela inicial do programa	46
Figura 14 – Primeira aba do programa	48
Figura 15 – Mensagem de erro: tensão admissível	48
Figura 16 – Mensagem de erro: segurança ao deslizamento	49
Figura 17 – Segunda aba do programa	50
Figura 18 – Resultados dos cálculos da capacidade suporte a tração	51
Figura 19 – Mensagem de erro: ângulo de atrito interno	51
Figura 20 – Entrada de dados para o dimensionamento estrutural	52
Figura 21 – Mensagem de erro: espessura mínima 1.....	53
Figura 22 – Mensagem de erro: espessura mínima 2.....	54
Figura 23 – Mensagem de erro: altura da sapata	54
Figura 24 – Quarta aba do programa	56
Figura 25 – Distribuição das armaduras: compressão	57
Figura 26 – Distribuição das armaduras: tração	57
Figura 27 – Menu de funções auxiliares	58
Figura 28 – Relatório	59
Figura 29 – Informação de autoria	59
Figura 30 – Menu ajuda	60
Figura 31 – Instruções	60
Figura 32 – Cobrimento nominal da armadura	61
Figura 33 – Classe de agressividade ambiental	61

Figura 34 – Janela inicial preenchida	63
Figura 35 – Entrada de dados preenchida	63
Figura 36 – Cálculo do dimensionamento estrutural	64
Figura 37 – Distribuição das armaduras	65
Figura 38 – Relatório do exemplo numérico	65

LISTA DE SÍMBOLOS

q_{ult} – tensão de ruptura (kN)

Q – capacidade de carga da fundação (kN/m²)

c – coesão do solo

N_c – fatores de capacidade suporte

N_q – fatores de capacidade suporte

N_γ – fatores de capacidade suporte

q_0 – sobrecarga uniforme na superfície do terreno (kN)

β' – ângulo formado da sapata com o plano horizontal

ϕ – ângulo de atrito interno do solo

γ – peso específico do solo (kN/cm³)

B' – menor dimensão efetiva da fundação (cm)

L' – maior dimensão efetiva da fundação (cm)

B – menor dimensão em planta (cm)

D – profundidade da fundação (cm)

L – dimensão maior da base da sapata (cm)

s_c – fatores de forma

s_q – fatores de forma

s_γ – fatores de forma

d_c – fatores de profundidade

d_q – fatores de profundidade

d_γ – fatores de profundidade

i_c – fatores de inclinação da carga

i_q – fatores de inclinação da carga

i_γ – fatores de inclinação da carga

b_c – fatores de inclinação da base da fundação

b_q – fatores de inclinação da base da fundação

b_γ – fatores de inclinação da base da fundação

g_c – fatores de inclinação do terreno

g_q – fatores de inclinação do terreno

g_γ – fatores de inclinação do terreno

P_b – perímetro da base (cm)

M_c – fatores de capacidade de carga

M_ϕ – fatores de capacidade de carga

M_γ – fatores de capacidade de carga

M_q – fatores de capacidade de carga

W – peso próprio (kN)

S_b – área da base (cm²)

S_f – área do fuste (cm²)

m – coeficiente de parcela da base

M – coeficiente de parcela da base

q_t – carga de ruptura total (kN)

q_{tb} – carga de ruptura total da base (kN)

D_c – diâmetro crítico (cm)

M_{c1} – fatores de capacidade de carga

$M_{\phi 1}$ – fatores de capacidade de carga

$M_{\gamma 1}$ – fatores de capacidade de carga

M_{q1} – fatores de capacidade de carga

q_{tf} – carga de ruptura da base do fuste (kN)

P_f – perímetro do fuste (cm)

M_{c2} – fatores de capacidade de carga

$M_{\phi 2}$ – fatores de capacidade de carga

$M_{\gamma 2}$ – fatores de capacidade de carga

M_{q2} – fatores de capacidade de carga

A – área da base da sapata (cm²)

a – dimensão maior da base da sapata (cm)

b – dimensão menor da base da sapata (cm)

N – carga de serviço (kN)

P – peso próprio (kg)

σ_{adm} – pressão admissível do terreno (kN/cm²)

σ_t – pressão uniforme do terreno (kN/cm²)

N_d – maior carga transmitida pelo apoio da sapata (kN)

a_{sapata} – dimensão da sapata em uma determinada direção (cm)

a_{pilar} – dimensão do pilar na mesma direção (cm)

l – comprimento formado da sapata com o plano horizontal (cm)

h – altura da sapata (cm)

A_{SX} – seção da armadura paralela ao lado a (cm²)

M_{xd} – momentos fletores de cálculo nas seções I que tracionam as armadura paralelas respectivamente aos lados a e b (kN.m)

f_{yd} – resistência de cálculo de escoamento do aço (kN/cm²)

A_{SY} – seção da armadura paralela ao lado b (cm²)

M_{yd} – momentos fletores de cálculo nas seções I que tracionam as armadura paralelas respectivamente aos lados a e b (kN.m)

τ_{Sd} – tensão cisalhante solicitante de cálculo (kN/cm²)

τ_{Rd1} – tensão de cisalhamento resiste de cálculo limite (kN/cm²)

τ_{Rd2} – tensão de cisalhamento resiste de cálculo limite (kN/cm²)

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto (MPa)

f_{cd} – resistência do concreto a tração direta (kN/m²)

d_2 – altura útil da sapata (cm)

ρ – taxa geométrica de armadura longitudinal de tração

τ_b – tensão de escorregamento da armadura (kN/cm²)

γ_f – coeficiente de majoração das solicitações

F_S – componente normal à superfície de apoio (kN)

μ_s – perímetro total da armadura de flexão normal à seção

d – altura útil da sapata (cm)

R_e – raio equivalente (cm)

α – inclinação da superfície de ruptura

f_{bd} – resistência de aderência de cálculo entre a armadura e o concreto (MN/m²)

f_{ctd} – resistência a tração de cálculo (MN/m²)

η_1 – coeficientes de aderência

η_2 – coeficientes de aderência

η_3 – coeficientes de aderência

θ – diâmetro da barra (mm)

N_b – número de barras

w – recalque

Θ_n – ângulo de inclinação da carga horizontal em relação à reta paralela à L

$l_{b,nec}$ – comprimento de ancoragem necessário

α_1 – coeficiente de ancoragem

$A_{s,calc}$ – área da seção transversal da armadura calculada

$A_{s,ef}$ – área da seção transversal da armadura efetiva

l_b – comprimento de ancoragem básico

h_o – espessura do bordo.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 MÉTODO DE PESQUISA	18
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	18
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	18
2.2.1 Objetivo principal	18
2.2.2 Objetivo secundário	18
2.3 PRESSUPOSTO	19
2.4 DELIMITAÇÃO	19
2.5 LIMITAÇÕES	19
2.6 DELINEAMENTO	19
3 CAPACIDADE DE CARGA NA RUPTURA À COMPRESSÃO	22
3.1 MECANISMOS DE RUPTURA	23
3.2 TEOREMA DE BRINCH HANSEN.....	25
3.2.1 Fatores de forma	27
3.2.2 Fatores de inclinação da base de fundação e do terreno	28
3.2.3 Fatores de profundidade	28
3.2.4 Fatores de inclinação e excentricidade do carregamento	29
4 CAPACIDADE DE CARGA NA RUPTURA À TRAÇÃO	31
4.1 SAPATAS EM SOLOS DE CATEGORIA 1	31
4.1 SAPATAS EM SOLOS DE CATEGORIA 2	34
5 DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS RÍGIDAS	36
5.1 DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES E FORMAS DA SAPATA	36
5.2 ARMADURA DE FLEXÃO	38
5.2.1 Momento fletor	38
5.2.2 Cálculo e distribuição das armaduras	39
5.3 RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CONSTANTE	41
5.4 ESFORÇO CORTANTE RESISTENTE	42
5.5 VERIFICAÇÃO DA ADERÊNCIA DAS ARMADURA DE FLEXÃO	43
6 UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA	45
6.1 CAPACIDADE SUPORTE: COMPRESSÃO.....	47
6.2 CAPACIDADE SUPORTE: TRAÇÃO.....	49
6.3 ENTRADA DE DADOS: DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	52
6.4 CÁLCULO: DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	56

6.5 MENU FUNÇÕES AUXILIARES.....	58
7 EXEMPLO NUMÉRICO.....	62
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
REFERÊNCIAS	68
ANEXO A	69
ANEXO B	71
ANEXO C	73
ANEXO D	75
ANEXO E	77
ANEXO F	79
ANEXO G	81
ANEXO H	83
ANEXO I	85
ANEXO J	87

1 INTRODUÇÃO

Fundações são elementos estruturais que possuem a função de transmitir as cargas da edificação ao solo, sem provocar ruptura do terreno, e apresentando resistência adequada para suportar às tensões geradas pelos esforços solicitantes. Além disso, uma fundação deve apresentar conveniente fator de segurança à ruptura do solo afetado pela transmissão das cargas e distribuir as ações da superestrutura ao solo, de modo que não cause recalques prejudiciais.

As fundações são classificadas em fundações profundas e superficiais. A distinção entre dois tipos é feita segundo critérios da NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010, p. 20, 24) que afirma que na fundação profunda a carga é transmitida ao terreno através de sua base (resistência de ponta) e/ou superfície lateral (resistência de atrito) e sua ponta deve estar na profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta. Por sua vez, na fundação superficial, a transmissão de carga do edifício ao terreno ocorre através das pressões distribuídas sob a base da fundação e a profundidade de assentamento em relação ao terreno é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação.

O projeto estrutural de sapatas representa uma das soluções para fundações superficiais. Sapatas são elementos de concreto armado, dimensionado de tal modo que as tensões de tração sejam resistidas pela armadura e a sua volumetria pode ser projetada em vários formatos geométricos, porém o mais comum é o cônico retangular. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 168) classifica as sapatas quanto à sua rigidez em dois tipos distintos: flexíveis e rígidas. Sapatas flexíveis utilizadas para fundações de pequenas cargas e, em contra partida, as rígidas são adotadas como elementos estruturais de fundação em solos que apresentam boa resistência em camadas próximas à superfície.

Quanto à posição, as sapatas são classificadas em isoladas, associadas, corridas e com viga de equilíbrio. As isoladas transmitem as ações de um único pilar centrado, as associadas transmitem as ações de dois ou mais pilares adjacentes, as corridas recebem as ações verticais de elementos alongados que transmitem o carregamento uniformemente distribuído em uma

direção e as sapatas com viga de equilíbrio transmitem a carga vertical do pilar para o centro de gravidade da sapata de divisa.

A realização deste trabalho se justifica, portanto, pela necessidade de sistematização do processo de dimensionamento de sapatas rígidas isoladas, através de um programa computacional, elaborado na linguagem de programação *Visual Basic*, que determine e forneça todos os parâmetros necessários para se obter o projeto estrutural completo de uma sapata rígida, condizente com a NBR 6122:2010. Procura-se, desta forma, apresentar um programa acadêmico que calcule a capacidade de suporte do solo, detalhamento geométrico da sapata, sugestões de detalhamento das armaduras da sapata, possibilidade de escolha na forma de dimensionamento estrutural da sapata, submetida a cargas de tração ou compressão, e o memorial de cálculo.

O capítulo 2 deste trabalho descreve o método de pesquisa desenvolvido para sua elaboração, indicando o objetivo, as limitações, as delimitações e o delineamento das etapas que compõem o trabalho de diplomação. No capítulo 3 são descritos os mecanismos de ruptura do solo de uma fundação e apresenta o teorema de Brinch Hansen. No capítulo 4, é apresentado o método teórico desenvolvido pela Universidade de Grenoble para sapatas em solo de categoria 1, solos de baixa resistência, e solos de categoria 2, solos de alta resistência. No capítulo 5, é descrita a metodologia para o projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas, o dimensionamento da seção e seu consequente detalhamento, visando conferir segurança ao elemento estrutural. O capítulo 6 apresenta a forma de utilização do programa, bem como, suas telas principais. No capítulo 7 é mostrado um exemplo de cálculo, que foi resolvido com a utilização do programa. Por fim, no capítulo 8, são apresentadas as considerações finais e sugestões para continuidade do trabalho.

2 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo são apresentados a questão de pesquisa, os objetos, o pressuposto, as delimitações, as limitações e o delineamento desta pesquisa.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: como sistematizar o dimensionamento de sapatas rígidas, sujeitas a esforços de tração ou compressão, e o posterior detalhamento das armaduras resultantes, visando a elaboração de um programa computacional?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um programa computacional para o projeto estrutural de sapatas rígidas, utilizando a linguagem de programação *Visual Basic*.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário deste trabalho é a elaboração da rotina de cálculo para posterior implementação no programa computacional de dimensionamento de sapatas rígidas.

2.3 PRESSUPOSTO

Como pressuposto básico da pesquisa, admitem-se válidas as especificações da NBR 6118:2007 – Projeto de Estruturas de Concreto: procedimento.

2.4 DELIMITAÇÃO

A pesquisa ficou delimitada ao estudo e desenvolvimento de uma ferramenta computacional que faça o cálculo da capacidade de carga na ruptura do solo de fundação, o dimensionamento e detalhamento de sapatas rígidas usuais de edifícios de estrutura em concreto armado.

2.5 LIMITAÇÕES

As limitações da pesquisa são:

- a) escolha de uma linguagem de programação para facilitar o desenvolvimento do programa, bem como, a utilização pelo usuário, sendo escolhida a linguagem *Microsoft Visual Basic*;
- b) cálculo de sapatas rígidas isoladas;
- c) sapatas com base quadrada ou retangular;
- d) no carregamento da estrutura, o trabalho ficou delimitado, a consideração de força concentrada ou uniformemente distribuída no sentido vertical;
- e) para o cálculo da capacidade de carga do solo de fundação à compressão foi considerada a ruptura generalizada, base da sapata e do terreno sem inclinação;
- f) para o cálculo da capacidade de carga do solo de fundação à tração foi limitado o programa a ângulos de atrito interno menor que 40° .

2.6 DELINEAMENTO

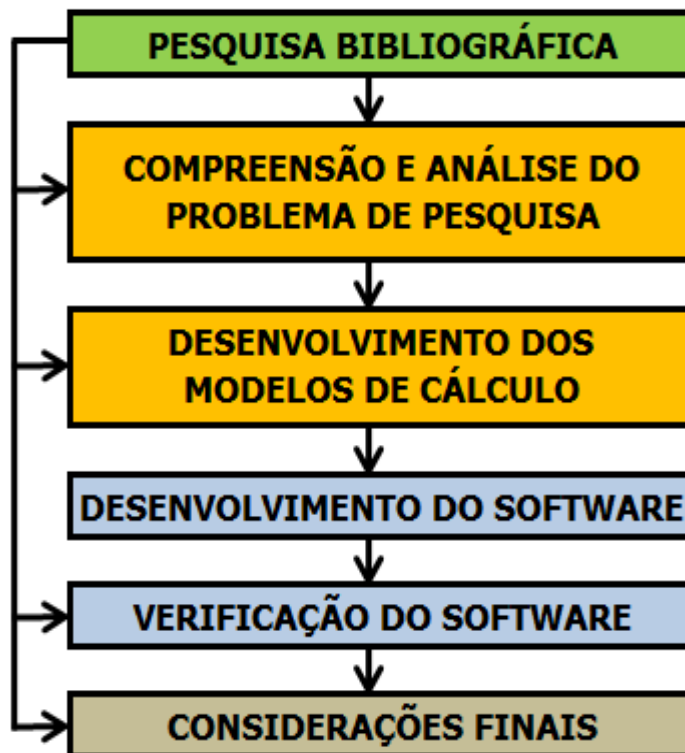
O trabalho foi desenvolvido conforme as seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;

- b) compreensão e análise do problema de pesquisa;
- c) desenvolvimento dos modelos de cálculo;
- d) desenvolvimento do software;
- e) verificação do software;
- f) considerações finais.

A pesquisa foi realizada segundo a sequência de etapas apresentadas na figura 1. Cada etapa é detalhada a seguir.

Figura 1 – etapas do projeto de diplomação



(fonte: elaborado pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica** teve como objetivo o aprofundamento na questão da pesquisa, visando desenvolver uma base teórica sólida para as demais etapas do trabalho de diplomação. Nesta etapa, buscou-se métodos desenvolvidos nas normas técnicas e na bibliografia técnica.

A fase seguinte foi denominada **compreensão e análise do problema de pesquisa**. Essa fase consistiu na pré-identificação e compreensão do problema e dos fatores envolvidos para a sua resolução.

O **desenvolvimento dos modelos de cálculo**, terceira etapa no delineamento da pesquisa, teve por finalidade descrever os métodos para a resolução do problema. Nesta etapa foram fixados os parâmetros e as faixas de variação das variáveis do problema, tais como, tipos de aço, de concreto, etc.

Na etapa de **desenvolvimento do software** foi feita a tradução do algoritmo que descreve, de forma sistemática e programável, o dimensionamento e o detalhamento da sapata para a linguagem de programação *Visual Basic*. Nesse momento, foram criadas as interfaces gráficas, rotinas e sub-rotinas, que abrangem os cálculos e ações a serem realizados. O produto final desta etapa é o programa computacional para projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas, completo no sentido de calcular e apresentar todos os dados necessários ao usuário.

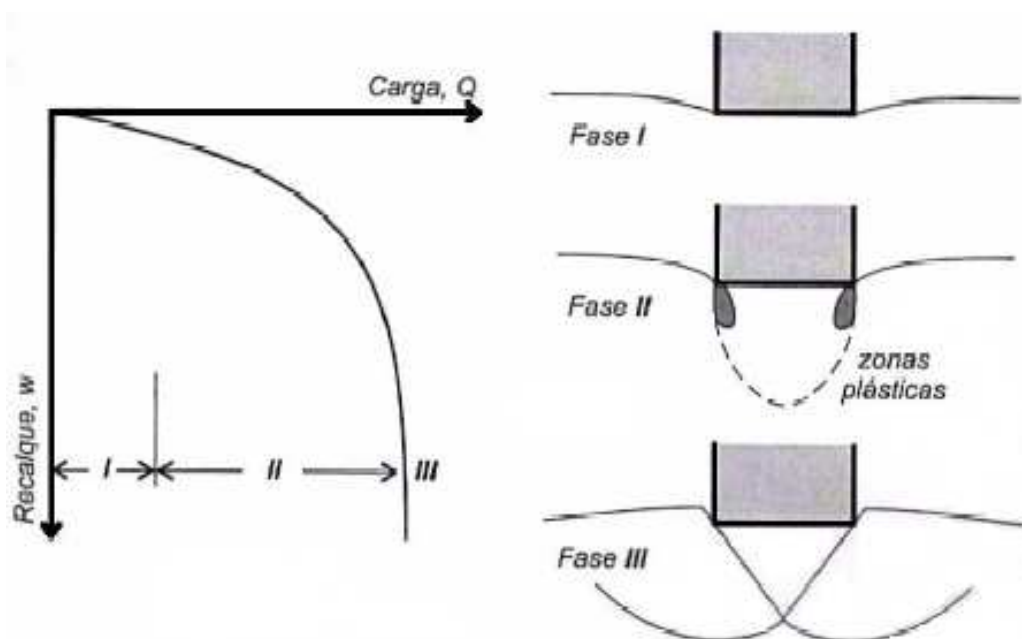
Na etapa de **verificação do software**, teve como objetivo a verificação da validade do *software*. A fase de **considerações finais** consistiu na avaliação final do *software*.

3 CAPACIDADE DE CARGA NA RUPTURA À COMPRESSÃO

Para uma sapata assente sobre um terreno, submetida a uma carga Q crescente a partir de zero, medi-se os valores dos deslocamentos verticais (ou recalques) correspondentes. Para pequenos recalques é chamada fase **elástica**. Os recalques se estabilizam com o tempo, ou seja, a velocidade de deformação diminui e tende a zero. Nessa primeira fase os recalques são reversíveis. Em uma segunda fase, surgem os deslocamentos **plásticos**. O estado plástico aparece junto às bordas da fundação e é caracterizada por recalques irreversíveis. Crescendo o carregamento cresce a zona plástica.

Quando a carga é superior ao valor crítico, ocorre o processo de recalque contínuo, sua velocidade não diminui mesmo quando a carga é constante e a resistência ao cisalhamento do solo é, em certas regiões, totalmente mobilizada. Numa terceira fase, a velocidade de deslocamento cresce continuamente até ocasionar a **ruptura do solo**. Atingiu-se o limite de resistência da fundação, ou seja, sua capacidade de carga na ruptura conforme mostra na figura 2.

Figura 2 – comportamento de uma sapata sob carga vertical



(fonte: VELLOSO; LOPES, 2004, p. 53)

A seguir, são descritas as formas de ruptura do solo submetido à compressão: generalizada, localizada e por puncionamento. Posteriormente, é descrito o teorema de Brinch Hansen que é aplicado no cálculo da capacidade suporte em solos que apresentam sua forma de ruptura generalizada.

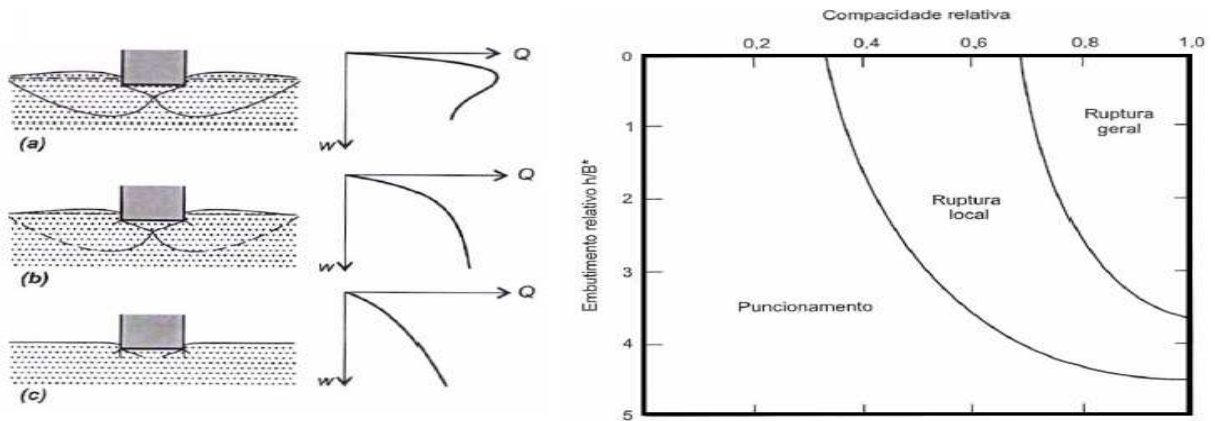
3.1 MECANISMOS DE RUPTURA

A interação solo estrutura, ou no caso solo-sapata, é modelada pelas possíveis formas de ruptura que o solo sob a sapata pode ser submetido, quando do carregamento vertical na direção axial. As curvas carga-recalque possuem diferentes formas, porém são considerados dois tipos característicos. No primeiro, a ruptura ocorre bruscamente após uma curta transição, a curva apresenta-se como uma tangente vertical e a ruptura é dita **generalizada**. No segundo, a curva se apresenta mais abatida, com uma tangente inclinada no ponto extremo, a ruptura é dita **localizada**. O primeiro caso é característico de solos mais rígidos, como areias compactas e muito compactas e argila rijas e duras. O segundo é mais encontrado em solos deformáveis, como areias fofas e argilas médias e moles.

Terzaghi (1943, p. 130) distinguiu os dois tipos de rupturas descritos acima e para o segundo caso, propôs considerar fatores de capacidade de carga reduzidos com a redução no valor da coesão a ser utilizada na fórmula de capacidade de carga. Vesic¹ (1963 apud VELLOSO; LOPES, 2004) distinguiu os dois tipos de rupturas descritos acima e ainda apresentou um terceiro tipo de ruptura do solo, apresentados na figura 3, a ruptura por **puncionamento**, porém associada às areias.

¹ VESIC, A. S. Bearing capacity of deep foundations in sand. **Highway Research Record**, n. 39, p. 112-153, 1963.

Figura 3 – tipos de ruptura: (a) generalizada, (b) localizada e (c) por punção



(fonte: VELLOSO; LOPES, 2004, p. 54)

A ruptura generalizada ou geral é característica de solos arenosos compactos, a muito compactos e argilas rijas a duras, como já foi citado, quando carregadas até a ruptura. Apresentam forma de ruptura contínua que vai da borda da fundação até o nível do terreno. Há uma formação clara de uma superfície de ruptura de deslizamento e levantamento do solo lateral à fundação.

Em contra partida, a ruptura localizada é típica de argilas mediamente rijas e areias mediamente compactas que, quando carregadas, não apresentam forma de ruptura contínua, mas apenas superfície de deslizamento formada sob a base de fundação e leve movimento do solo lateral à fundação.

O terceiro tipo de ruptura, a ruptura por punção é característica de argilas moles e areias fofas que, quando carregadas, não apresentam superfície de deslizamento definida, mas apenas o deslocamento vertical do solo abaixo da fundação, não afetando o solo ao redor. Esta forma de ruptura ocorre devido ao alto índice de vazios comprimir-se durante a aplicação do carregamento, confinando os deslocamentos a uma região imediatamente abaixo da fundação.

Lopes² (1979 apud VELLOSO; LOPES, 2004) propôs a análise de campo de deslocamentos para distinguir o modo de ruptura, aplicável tanto a areias quanto às argilas, na qual caracterizou a ruptura generalizada como aquela cujo deslocamento apresenta:

- a) descontinuidade no campo de deslocamentos;

² LOPES, F. R. **The undrained bearing capacity of piles and plates studied by the Finite Element Method.** 1979. Thesis (Ph.D. in Civil Engineering) – Postgraduate in Civil Engineering, University of London, London.

- b) levantamento acentuado da superfície do terreno próximo à carga;
- c) deslocamentos acentuados fora da região comprimida pela sapata.

Caracterizou também a ruptura por punção como aquela que apresenta pequeno ou nenhum levantamento da superfície do terreno, caso de areias fofas, ou levantamento discreto e alçando maior distância, no caso de argilas moles, e não formação de superfícies de ruptura, tanto areias fofas como argilas moles.

3.2 TEOREMA DE BRINCH HANSEN

Hansen³ (1961 apud VELLOSO; LOPES, 2004) fez importantes contribuições ao cálculo da capacidade de carga das fundações submetidas a um carregamento qualquer. Desenvolveram fatores específicos, para a forma da fundação, sua profundidade e a inclinação da carga. Posteriormente, Hansen⁴ (1970 apud VELLOSO; LOPES, 2004) elaborou os fatores de inclinação do terreno e de inclinação da base de fundação. A inclusão desses fatores, que influem no valor da capacidade de carga limite dos solos sob a ação de fundação direta, na formulação básica, leva à fórmula 1 (VELLOSO; LOPES, 2004, p. 71):

$$q_{ult} = s_c i_c d_c b_c g_c \cdot c \cdot N_c + s_q i_q d_q b_q g_q \cdot \gamma \cdot D \cdot N_q + s_\gamma i_\gamma d_\gamma b_\gamma g_\gamma \cdot \frac{B'}{2} \cdot \gamma \cdot N_\gamma \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

s_c, s_q, s_γ = fatores de forma;

d_c, d_q, d_γ = fatores de profundidade;

i_c, i_q, i_γ = fatores de inclinação de carga;

b_c, b_q, b_γ = fatores de inclinação da base da fundação;

³ HANSEN, J. B. **A general formula for bearing capacity**. Copenhagen: Geoteknisk Institut (Danish), 1961. Bulletin n. 11.

⁴ HANSEN, J. B. **A revised and extended formula for bearing capacity**. Copenhagen: Geoteknisk Institut (Danish), 1970. Bulletin n. 28.

g_c, g_q, g_γ = fatores de inclinação do terreno;

c = coesão do solo;

N_c, N_q, N_γ = fatores de capacidade suporte;

γ = peso específico do solo;

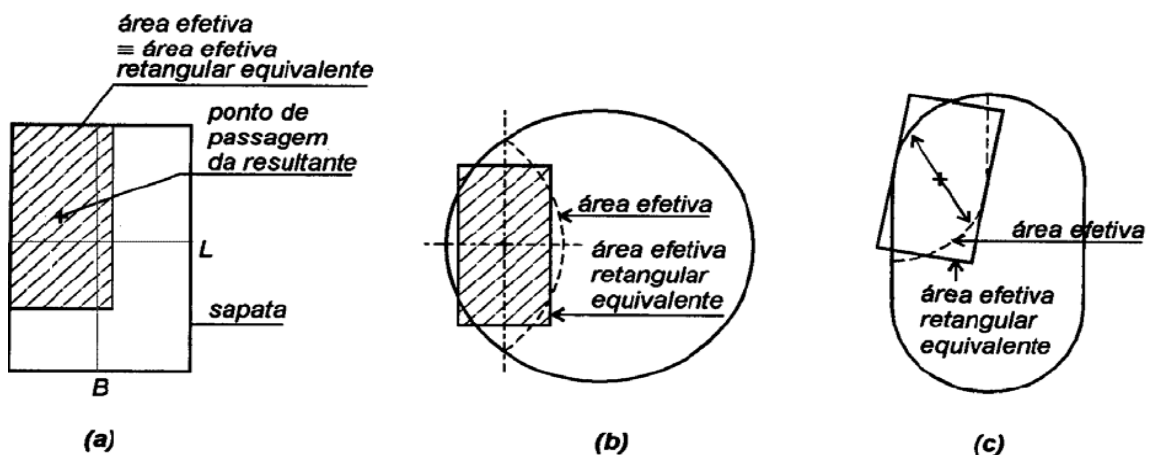
B' = menor dimensão efetiva da fundação;

D = profundidade da fundação;

q_{ult} = tensão de ruptura.

Na fórmula 1 os símbolos com subscrito c , q e γ , são respectivamente, as parcelas de coesão, sobrecarga e peso específico. Ainda, a fórmula 1 fornece a tensão de ruptura q_{ult} que atua na área mais fortemente carregada da fundação. A área efetiva é determinada de maneira que a resultante das cargas atuantes passe pelo centro de gravidade. Na fundação retangular (figura 4a), a área efetiva é um retângulo, da qual se tira a dimensão menor para uso na fórmula 1. Nos outros dois casos mostrados na figura 4, a área efetiva é determinada por simetria em relação ao ponto de passagem da resultante e precisa ser transformada em um retângulo equivalente. A figura 4 mostra as áreas efetivas de fundação, inclusive áreas retangulares equivalentes.

Figura 4 – áreas efetivas de fundação, inclusive áreas retangulares equivalentes



(fonte: adaptada de VELLOSO; LOPES, 2004, p. 72)

Para os cálculos dos fatores de capacidade de carga, são fornecidas as fórmulas 2, 3 e 4 (VELLOSO; LOPES, 2004, p. 72), nas quais os símbolos com subscrito c, q e γ , são respectivamente, as parcelas de coesão, sobrecarga e peso específico:

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot(\phi) \quad (\text{fórmula 2})$$

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan \phi} \cdot \text{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{fórmula 3})$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \text{tg} \phi \quad (\text{fórmula 4})$$

A seguir são apresentados os fatores de forma, inclinação da base de fundação e do terreno, profundidade, inclinação e excentricidade do carregamento.

3.2.1 Fatores de forma

Os fatores de forma são apresentados na figura 5.

Figura 5 – fatores de forma

FORMA DA BASE	s_c	s_q	s_γ
CONTÍNUA	1,00	1,00	1,00
RETANGULAR	$1 + \frac{B'}{L'} \cdot \frac{N_q}{N_c}$	$1 + \frac{B'}{L'} \cdot \text{tg} \phi$	$1 - 0,4 \cdot \frac{B'}{L'}$
CIRCULAR E QUADRADA	$1 + \frac{N_q}{N_c}$	$1 + \text{tg} \phi$	0,60

(fonte: adaptada de VELLOSO; LOPES, 2004, p. 73)

Onde:

s_c, s_q, s_γ = fatores de forma;

N_c, N_q, N_γ = fatores de capacidade suporte;

B' = menor dimensão efetiva da fundação;

L' = maior dimensão efetiva da fundação.

3.2.2 Fatores de inclinação da base da fundação e do terreno

Considera-se a base da fundação plana na elaboração do software computacional, resultando nos fatores de inclinação da base em $b_c = b_q = b_\gamma = 1$. Também se considera a superfície do terreno da fundação estar plana, resultando nos fatores de inclinação do terreno em $g_c = g_q = g_\gamma = 1$.

3.2.3 Fatores de profundidade

Para os fatores de profundidade considerando $(D/B) \leq 1$, sendo D e B , respectivamente, profundidade de fundação e menor dimensão em planta da sapata, são fornecidas as fórmulas 5 a 7 (VELLOSO; LOPES, 2004, p. 74):

$$d_c = d_q - \frac{(1 - d_q)}{(N_c \cdot \text{tg} \phi)} \quad (\text{fórmula 5})$$

$$d_q = 1 + 2 \text{tg} \phi (1 - \text{sen} \phi)^2 \frac{D}{B} \quad (\text{fórmula 6})$$

$$d_\gamma = 1 \quad (\text{f\u00f3rmula 7})$$

Para os fatores de profundidade considerando $(D/B) > 1$, sendo D e B , respectivamente, profundidade de fundação e menor dimens\u00e3o em planta da sapata, s\u00e3o fornecidas as f\u00f3rmulas 8 a 10 (VELLOSO; LOPES, 2004, p. 74):

$$d_c = d_q - \frac{(1 - d_q)}{(N_c \cdot \text{tg}\phi)} \quad (\text{f\u00f3rmula 8})$$

$$d_q = 1 + 2\text{tg}\phi(1 - \text{sen}\phi)^2 \text{arctg}\left(\frac{D}{B}\right) \quad (\text{f\u00f3rmula 9})$$

$$d_\gamma = 1 \quad (\text{f\u00f3rmula 10})$$

3.2.4 Fatores de inclina\u00e7\u00e3o e excentricidade do carregamento

Para os fatores de inclina\u00e7\u00e3o e excentricidade da carga considera-se H e V , sendo respectivamente, componente horizontal e vertical do carregamento, resultando nas f\u00f3rmulas 11 a 14 (VELLOSO; LOPES, 2004, p. 73, 74):

$$i_q = \left[1 - \frac{H}{V + A \cdot c \cdot \frac{1}{\text{tg}\phi}} \right]^m \quad (\text{f\u00f3rmula 11})$$

$$i_c = i_q - \frac{(1 - i_q)}{(N_c \cdot \text{tg}\phi)} \quad (\text{fórmula 12})$$

$$i_q = \left[1 - \frac{H}{V + A \cdot c \cdot \frac{1}{\text{tg}\phi}} \right]^{m+1} \quad (\text{fórmula 13})$$

$$m = \frac{2 + \frac{L}{B}}{1 + \frac{L}{B}} \cdot \cos^2 \theta_n + \frac{2 + \frac{B}{L}}{1 + \frac{B}{L}} \cdot \text{sen}^2 \theta_n \quad (\text{fórmula 14})$$

Onde:

i_c, i_q, i_γ = fatores de inclinação excentricidade;

A = área da base da sapata;

N_c = fator de capacidade suporte;

c = coesão do solo;

ϕ = ângulo de atrito interno;

L = dimensão maior da base da sapata;

B = menor dimensão em planta;

$\Theta_n = 90^\circ$, ângulo de inclinação da carga horizontal em relação à reta paralela à L.

4 CAPACIDADE DE CARGA NA RUPTURA À TRAÇÃO

Para o cálculo da capacidade de carga do solo de fundação a esforços de tração utiliza-se o método teórico desenvolvido pela Universidade de Grenoble (França), que foi elaborado pelos pesquisadores Bierrez e Barraud (1968) e Martin (1966).

O método de Grenoble é aplicado a todos os tipos de fundações. Tem por base uma formação de superfície de ruptura, em função do tipo do elemento de fundação, da profundidade desse elemento e do tipo de solo. Para o efeito de sobrecarga na superfície do terreno, considera o peso específico (γ), ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) de todo tipo de solo.

Neste método, a ruptura de uma fundação tracionada pode ocorrer por cisalhamento generalizado, quando a superfície é composta de retas inclinadas com a vertical atingindo a superfície do terreno, ou por cisalhamento localizado, quando a superfície de ruptura localiza-se ao redor da base da fundação. Ainda, o método pode ser aplicado em estacas cilíndricas e sapatas.

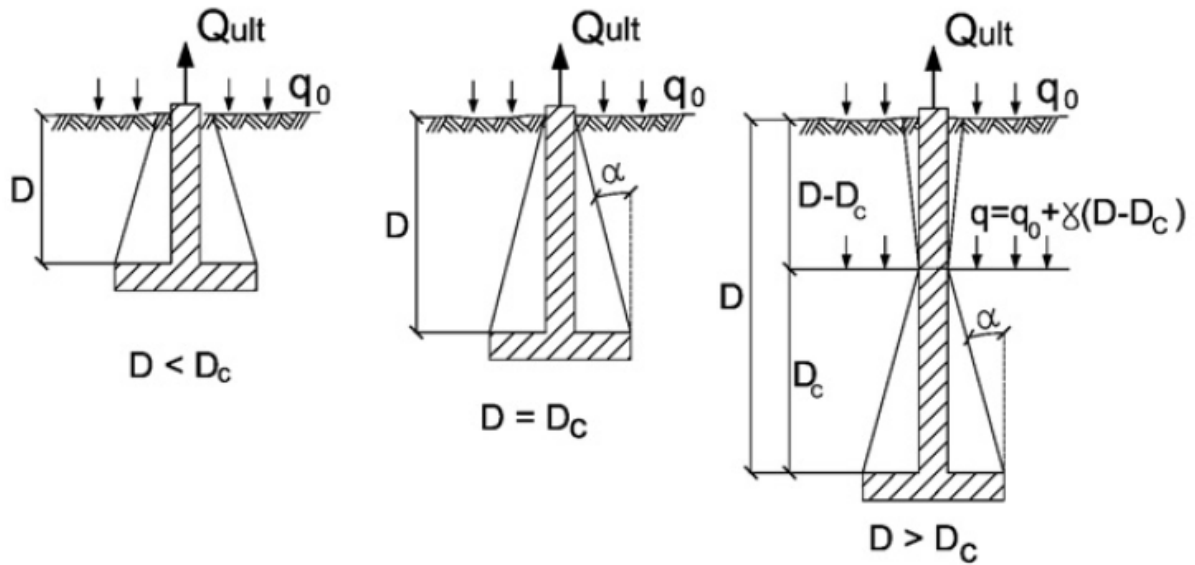
A capacidade de carga de sapatas é gerada por diferentes processos de ruptura, corresponde aos tipos de solos de categoria 1 e 2, sendo solos fracos e resistentes, respectivamente. Considera-se no cálculo as parcelas de influência do fuste e a espessura embutida.

A seguir é descrita a formulação utilizada para obter a capacidade de carga à tração em solos de categoria 1, solos fracos, e em solos de categoria 2, solos resistentes.

4.1 SAPATAS EM SOLOS DE CATEGORIA 1

Solos de categoria 1 são solos de baixa resistência, argilosos, com elevado grau de saturação e ângulo de atrito interno $\phi < 15^\circ$. A superfície de ruptura desenvolve-se a partir da aresta superior da base e tem a forma ilustrada na figura 6. Nota-se que, para $D > D_c$ o fuste atua como uma estaca, ao longo da profundidade $(D - D_c)$.

Figura 6 – regime de ruptura para sapatas em solos fracos



(fonte: adaptada de PACHECO et al., 2008, p. 229)

Quando a capacidade de carga for $D \leq D_c$, pode ser obtida através da fórmula 15 (CONSOLI, 2008b, p. 9), a carga de ruptura total:

$$q_t = P_b D (c M_c + \gamma D (M_\phi + M_\gamma) + q_o M_q) + W + (S_b - S_f) D \gamma \quad (\text{fórmula 15})$$

Onde:

q_t = carga de ruptura total;

P_b = perímetro da base;

$M_c, M_\phi, M_\gamma, M_q$ = fatores de capacidade de carga;

W = peso próprio;

S_b = área da base;

S_f = área do fuste;

D = profundidade da fundação;

c = coesão;

γ = peso específico do solo.

Para sapatas retangulares ou quadradas, os valores de M_c , $M_\phi + M_\gamma$ e M_q devem ser obtidos considerando $R_e = P_b/8$ nos quadros dos anexos A, B e C calculadas para $\lambda = \text{tg}^{-1} 0,2$.

A capacidade de carga, quando $D > D_c$, pode ser obtida através da fórmula 16 (CONSOLI, 2008b, p. 10):

$$q_t = q_t(\text{base}) + q_t(\text{fuste}) + W \quad (\text{fórmula 16})$$

A parcela da base pode ser obtida através da fórmula 17 (CONSOLI, 2008b, p. 10):

$$q_{ib} = P_b D_c \left[(c M_{c1} + \gamma D_c (M_\phi + M_\gamma)_1 + (q_o + \gamma(D - D_c)) M_{q1} \right] + (S_b - S_f) D_c \gamma \quad (\text{fórmula 17})$$

Para sapatas retangulares ou quadradas, os valores de M_c , $(M_\phi + M_\gamma)_1$ e M_q devem ser obtidos considerando $R_e = P_b/8$ nos quadros dos anexos A, B e C. A parcela do fuste pode ser obtida através da fórmula 18 (CONSOLI, 2008b, p. 10):

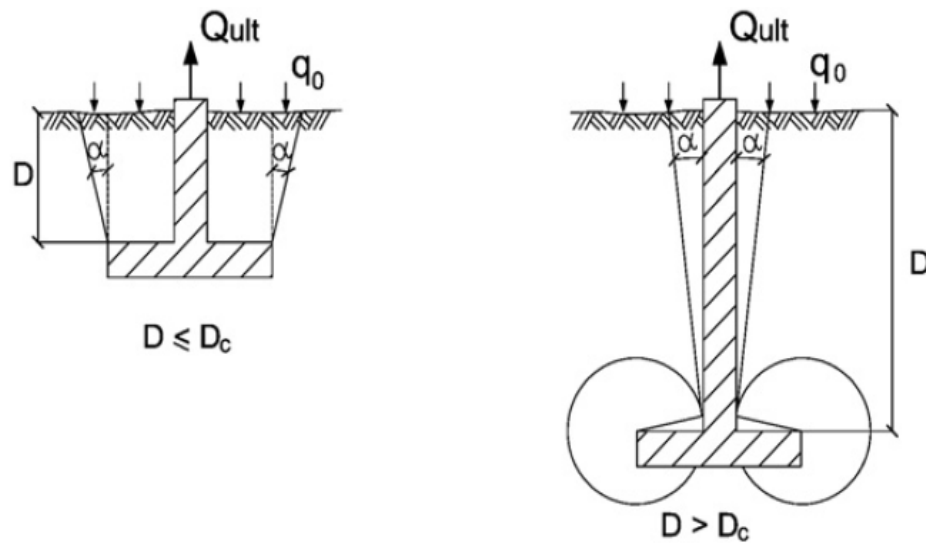
$$q_{if} = P_f (D - D_c) (c M_{c2} + \gamma (D - D_c) (M_\phi + M_\gamma)_2 + q_o M_{q2}) \quad (\text{fórmula 18})$$

Para sapatas retangulares ou quadradas, os valores de M_{c2} , $(M_\phi + M_\gamma)_2$ e M_{q2} devem ser obtidos nos quadros dos anexos A, B e C calculados para $\lambda = -\phi/8$. Deve-se entrar nos quadros com o valor $R_e = P_f/2\pi$.

4.2 SAPATAS EM SOLOS DE CATEGORIA 2

Solos de categoria 2 são solos resistentes, arenosos (saturados ou não) e argiloso com baixo grau de saturação e ângulo de atrito interno $\phi > 15^\circ$. A figura 7 mostra as formas consideradas para as superfícies de ruptura do solo, quando se tem valores de D maiores ou menores que a profundidade crítica.

Figura 7 – regimes de ruptura para sapatas em solos resistentes



(fonte: adaptada de PACHECO et al., 2008, p. 229)

A capacidade de carga, quando $D \leq D_c$, pode ser obtida através da fórmula 19 (CONSOLI, 2008b, p. 11):

$$q_t = P_b D (c M_c + \gamma D (M_\phi + M_\gamma) + q_o M_q) + W + (S_b - S_f) D \gamma \quad (\text{fórmula 19})$$

Para sapatas retangulares e quadradas, os valores de M_c , $(M_\phi + M_\gamma)$ e M_q devem ser obtidos considerando $R_c = P_b/8$ nos quadros dos anexos D, E e F calculados para $\lambda = -\phi/4$.

A capacidade de carga, quando $D > D_c$, pode ser obtida através da fórmula 20 (CONSOLI, 2008b, p. 12):

$$q_t = q_t(\text{base}) + q_t(\text{fuste}) + W \quad (\text{fórmula 20})$$

A parcela da base pode ser obtida através da fórmula 21 (CONSOLI, 2008b, p. 12):

$$q_t = (S_b - S_f) \cdot m M \cdot (\gamma D \tan \phi + c) \quad (\text{fórmula 21})$$

Para sapatas retangulares ou quadradas, os valores do coeficiente M são obtidos no quadro do anexo G. A parcela do fuste pode ser obtida através da fórmula 22 (CONSOLI, 2008b, p. 13):

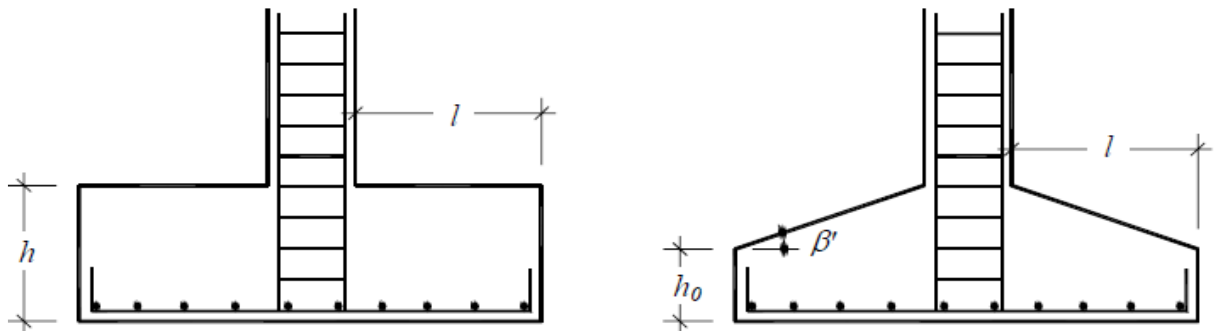
$$q_{tf} = P_b D (c M_c + \gamma D (M_\phi + M_\gamma) + q_o M_q) \quad (\text{fórmula 22})$$

Para sapatas retangular ou quadradas, os valores de M_c , $(M_\phi + M_\gamma)$ e M_q devem ser obtidos nos quadros dos anexos H, I e J calculados para $\lambda = -\phi/8$. Deve-se entrar nos quadros com o valor $R_e = P_f/2\pi$.

5 DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS RÍGIDAS

O procedimento de cálculo e detalhamento estrutural de sapatas rígidas isoladas, baseia-se em princípios contidos nas Recomendações do Comitê Europeu de Concreto CEB – 70 e na NBR 6118:2007. O método de cálculo e de dimensionamento são aplicáveis às sapatas que apresentam as características geométricas mostradas na figura 8.

Figura 8 – características geométricas das sapatas



(fonte: CONSOLI, 2008a, p. 2)

Na figura 8, h e h_0 são, respectivamente, altura e espessura da sapata. Também, l e β' são, respectivamente, o comprimento e o ângulo formado da face superior da sapata com o plano horizontal. Os itens a seguir descrevem cada uma das etapas de projeto estrutural de uma sapata em concreto armado.

5.1 DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES E FORMA DA SAPATA

A CEB 70 (FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINE, 1970, p. 57) afirma que o valor da altura da sapata h , conforme visto na figura 8, é fixado de maneira a atender simultaneamente a duas exigências, assim, a altura da sapata deve:

- possuir condições de rigidez própria e $0,5 \leq h \leq 2l$;
- conduzir a uma perfeita ancoragem das armaduras do pilar que nela se apoia.

As dimensões em planta da sapata são obtidas com a verificação das pressões no solo (cálculo geotécnico). A área necessária em planta para a sapata, sendo função da pressão admissível para o terreno, é calculada pela fórmula 23 (MONTTOYA et al., 2007, p. 507):

$$A = a \cdot b = \frac{N + P}{\sigma_{adm}} \quad (\text{fórmula 23})$$

Onde:

A = área da sapata;

a = dimensão maior da base da sapata;

b = dimensão menor da base da sapata;

N = carga de serviço;

P = peso próprio;

σ_{adm} = pressão admissível do terreno.

Qualquer que seja o tipo de sapata, para o cálculo estrutural pode-se supor, a favor da segurança, uma pressão uniforme do terreno, independente do peso próprio da sapata. Portanto, como ação do terreno sobre a sapata, considera-se a pressão uniforme, como visto na fórmula 24 (MONTTOYA et al., 2007, p. 507):

$$\sigma_t = \frac{N_d}{(a \cdot b)} \quad (\text{fórmula 24})$$

Onde:

a = dimensão maior da base da sapata;

b = dimensão menor da base da sapata;

σ_t = pressão uniforme do terreno;

N_d = maior carga transmitida pelo apoio da sapata.

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 168), a altura da sapata rígida deve atender a condição:

$$h > \frac{a_{sapata} - a_{pilar}}{3}$$

Onde:

a_{sapata} = dimensão da sapata em uma determinada direção;

a_{pilar} = dimensão do pilar na mesma direção;

h = altura da sapata.

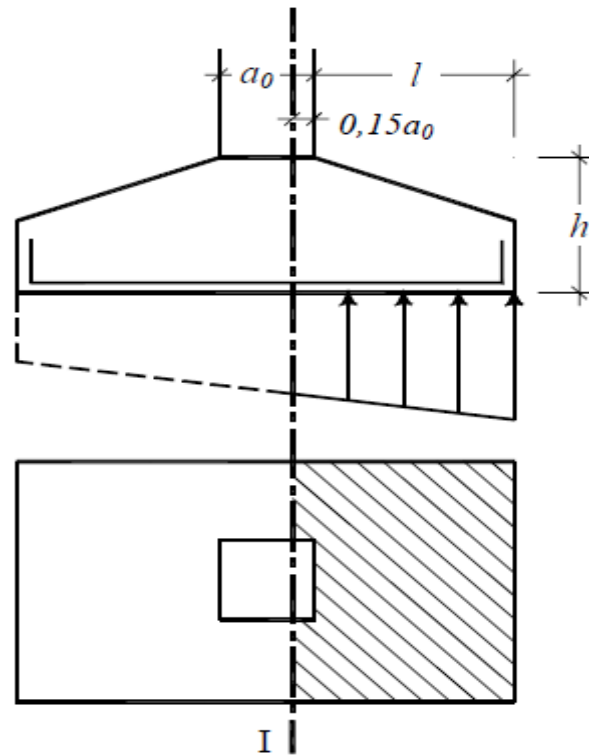
5.2 ARMADURA DE FLEXÃO

A armadura de flexão deve ser uniformemente distribuída ao longo da largura da sapata, estendendo-se integralmente de face a face da mesma e terminando em gancho nas duas extremidades. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 169) indica que para barras com $\phi \geq 20$ mm devem ser usados ganchos de 135° ou 180°. Para barras com $\phi \geq 25$ mm deve ser verificado o fendilhamento em plano horizontal, uma vez que pode ocorrer o destacamento de toda a malha da armadura. A seguir é descrito o momento fletor e o cálculo e distribuição das armaduras.

5.2.1 Momento fletor

O momento fletor para o cálculo da armadura inferior das sapatas é determinado pela seção I, sendo esta plana, normal à superfície de apoio e a abrange a totalidade da sapata. Está situada entre as faces do pilar, a uma distância exatamente dessas faces igual a $0,15a_0$, sendo a_0 a dimensão do pilar no sentido perpendicular da seção, conforme mostra na figura 9.

Figura 9 – seção de referência I



(fonte: CONSOLI, 2008a, p. 3)

5.2.2 Cálculo e distribuição das armaduras

A armadura principal é constituída por uma malha ortogonal. A área da seção da armadura que atravessa uma seção de referência deve ser determinada pelas características geométricas da seção e do momento fletor que a solicita.

Para o cálculo das armaduras das sapatas, utilizam-se as fórmulas 25 e 26 (CONSOLI, 2008a, p. 4), as quais são semelhantes à de flexão simples em viga retangular simplificada e considera a distância entre forças como fixa em $0,85d$:

$$A_{sx} = \frac{M_{xd}}{0,85 \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (\text{fórmula 25})$$

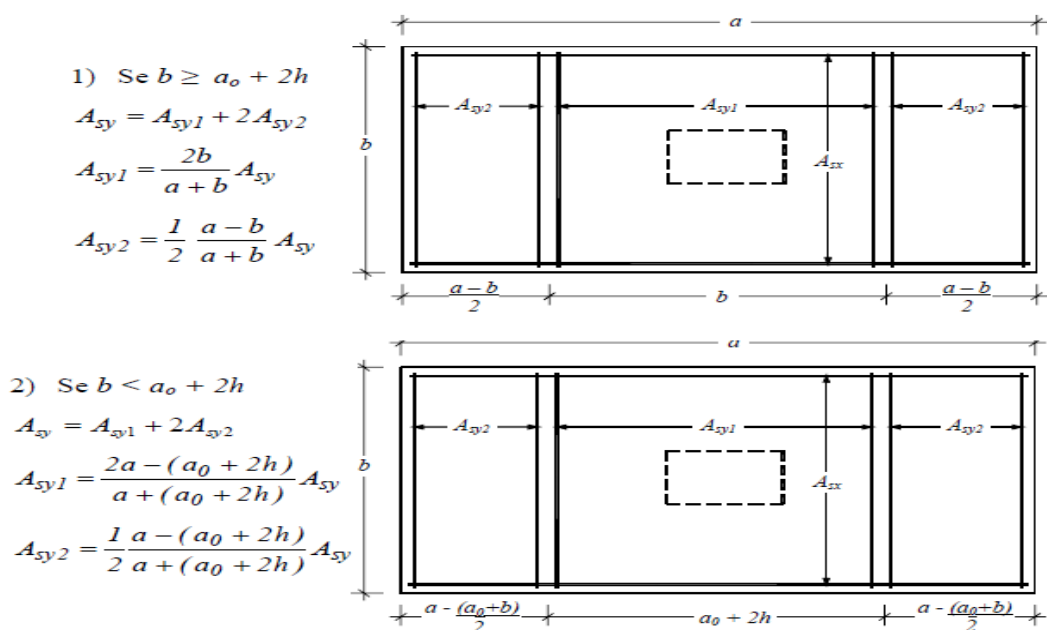
$$A_{SY} = \frac{M_{yd}}{0,85 \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (\text{fórmula 26})$$

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 117), a taxa mínima de armadura, em cada direção, referida à área de seção I, não deve ser inferior a 0,15% para f_{ck} entre 15 e 25 MPa, tendo percentuais maiores para valores maiores de f_{ck} .

O CEB 70 (FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINE, 1970, p. 64) indica que a distância mínima das barras da armadura à superfície do concreto para elementos exteriores de obras expostos à influências atmosféricas (tais como precipitações e alternância de umidade) deve ser 3 cm.

Quanto à distribuição das armaduras, se a sapata é quadrada, as armaduras se distribuem uniformemente em ambas as direções. Em contrapartida, se a sapata é retangular, as armaduras paralelas ao lado maior a e A_{SX} , são distribuídas uniformemente, porém as paralelas ao lado menos b e A_{SY} , devem ser mais concentradas na parte central, como mostra a figura 10.

Figura 10 – distribuição das armaduras



(fonte: adaptada de CONSOLI, 2008a, p. 5)

Somando-se a isso, a distância mínima entre as armaduras são justificadas pela necessidade de execução irrepreensível da concretagem e da proteção suficiente das armaduras contra os agentes exteriores.

O CEB 70 (FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINE, 1970, p. 63) indica que o espaçamento das barras de uma mesma camada horizontal deve atender as seguintes exigências:

- a) 1cm;
- b) 1 vez o diâmetro do contorno aparente da barra de maior diâmetro das duas;
- c) 1,5 vez o calibre máximo do agregado;
- d) 1,2 vez o calibre máximo do agregado para situações de segregação do concreto durante sua colocação em obra.

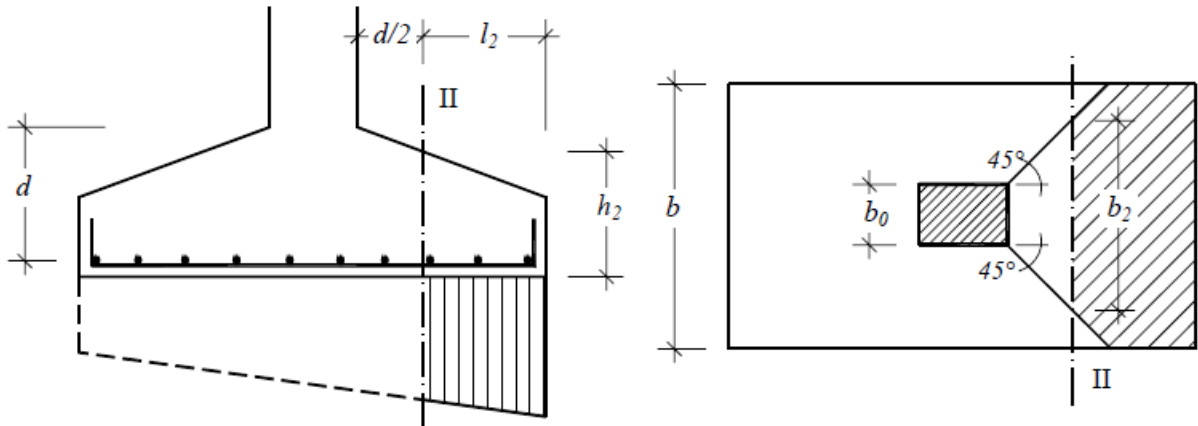
O CEB 70 (FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINE, 1970, p. 63) afirma que o espaçamento das barras de uma mesma camada vertical deve atender as seguintes exigências:

- a) 1cm;
- b) 1 vez o diâmetro do contorno aparente da barra de maior diâmetro das duas;
- c) 0,5 vez o calibre máximo do agregado.

5.3 RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CORTANTE

A verificação do cortante é feita em duas seções distintas, na face do pilar e a uma distância $d/2$ para fora do pilar (seção II). O esforço cortante solicitante F_S é igual à componente normal à superfície de apoio da resultante das forças aplicadas na sapata, sobre a área hachurada na figura 11, limitada pela seção de referência.

Figura 11 – esforço cortante solicitante na seção de referencia II



(fonte: adaptada de CONSOLI, 2008a, p. 5)

A seção de referencia II é perpendicular à superfície de apoio da sapata sobre o solo e sua largura b_2 é dada pela soma das parcelas de $b_0 + d$, sendo b_0 e d , respectivamente, a dimensão do pilar medida segundo a horizontal paralela a seção e a altura útil da sapata medida na face do pilar.

Na superfície de apoio da sapata e a seção do pilar retangulares, concêntricas e uniformemente carregadas, as características da seção de referência I conduzem às mesmas disposições de punção de lajes.

5.4 ESFORÇO CORTANTE RESISTENTE

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 149 - 150), a tensão de cisalhamento solicitante de cálculo atuante na face do pilar e na seção de referencia II, não deve ultrapassar os valores descritos nas condições:

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd}$$

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1} = 0,13 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d_2}} \right) \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho \cdot f_{ck}}$$

Onde:

τ_{sd} = tensão de cisalhamento solicitante de cálculo;

τ_{Rd1} , τ_{Rd2} = tensão de cisalhamento resistente de cálculo limite;

f_{ck} = resistência característica à compressão do concreto;

f_{cd} = resistência do concreto a tração direta;

d_2 = altura útil da sapata;

ρ = taxa geométrica de armadura longitudinal de tração.

5.5 VERIFICAÇÃO DA ADERÊNCIA DAS ARMADURAS DE FLEXÃO

Na verificação da aderência das armaduras de flexão deve-se cumprir a seguinte condição (CONSOLI, 2008a, p. 7):

$$\tau_b = \frac{\gamma_f F_s}{\mu_s \cdot 0,87d} \leq f_{bd}$$

Onde:

τ_b = tensão de escorregamento da armadura;

γ_f = coeficiente de majoração das solicitações;

F_s = componente normal à superfície de apoio;

$\mu_s = N_b \pi \theta$ = perímetro total da armadura de flexão normal à seção d: altura útil da sapata;

f_{bd} = resistência de aderência de cálculo entre a armadura e o concreto.

Para o cálculo da resistência de aderência de cálculo entre a armadura e o concreto, f_{bd} , a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 32) utiliza a fórmula 27:

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (\text{fórmula 27})$$

Onde:

$\eta_1 = 1,0$ para barras lisas;

$\eta_1 = 1,4$ para barras entalhadas;

$\eta_1 = 2,25$ para barras nervuradas;

$\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência;

$\eta_2 = 0,7$ para situações de má aderência;

$\eta_3 = 1,0$ para $\theta < 32$ mm;

$\eta_3 = (132 - \theta)/100$, para $\theta > 32$ mm;

θ = diâmetro da barra;

f_{ctd} = resistência a tração de cálculo.

6 UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA

O programa foi elaborado a partir das recomendações da NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento –, publicada em 2003 e atualizada em 2007, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. A tela inicial do programa apresenta o termo de responsabilidade, informando ao usuário que o criador do programa não possui nenhum dever legal ou responsabilidade para qualquer pessoa ou companhia pelos danos causados resultantes do uso de alguma informação disponibilizada. Nesta tela, o usuário terá duas opções, mostrada na figura 12, a opção de aceitar o termo de responsabilidade selecionando a opção <ACEITO> e <APLICAR>, bem como, a opção de não aceitar, clicando em <NÃO ACEITO> e <SAIR>. O usuário ao aceitar o termo de responsabilidade, automaticamente será carregado à interface geral do programa.

Figura 12 – termo de responsabilidade



(fonte: elaborada pelo autor)

A interface geral do programa foi dividida em quatro janelas, abrangendo nas duas primeiras abas o dimensionamento da Capacidade Suporte à compressão e à tração do solo da fundação,

na terceira aba a Entrada de Dados para o dimensionamento estrutural e na quarta, os Resultados dos Cálculos do dimensionamento estrutural. A figura 13 apresenta a janela inicial do programa.

Figura 13 – janela inicial do programa

The screenshot shows the initial window of a software program for the structural design of isolated rigid foundations. The window title is "Programa computacional para projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas". It features a menu bar with "Arquivo", "Sobre", and "Ajuda". Below the menu bar are four tabs: "Capacidade Suporte: Compressão", "Capacidade Suporte: Tração", "Entrada de Dados - Dimensionamento Estrutural", and "Cálculo - Dimensionamento Estrutural". The "Entrada de Dados" tab is currently selected. The main interface is organized into several panels:

- Cargas aplicadas a fundação:**
 - Cargas na Vertical:** Permanent load (kN) and Accidental load (kN) input fields.
 - Cargas na Horizontal:** Permanent load (kN) and Accidental load (kN) input fields, and an angle θ_n (degrees) input field.
- Geometria:** Two diagrams showing the foundation geometry. The first is a trapezoidal plan view with width a and height b . The second is a cross-section view with width a and depth D . Below the diagrams are input fields for a (cm), b (cm), and D (cm).
- Fatores de capacidade de carga:** Three yellow output fields for N_q , N_c , and N_γ .
- Cálculo da tensão admissível:** Three yellow output fields for q_{ult} (kN/m²), q_{adm} (kN/m²), and q_{solo} (kN/m²).
- Segurança ao deslizamento:** Two yellow output fields for $H_{máx}$ (kN) and H (kN).
- Fatores que influem na capacidade suporte:**
 - Fatores de Forma:** Three yellow output fields for s_c , s_q , and s_γ .
 - Fatores de inclinação da base:** Three yellow output fields for b_c , b_q , and b_γ .
 - Fatores de profundidade:** Three yellow output fields for d_c , d_q , and d_γ .
 - Fatores de inclinação do terreno:** Three yellow output fields for g_c , g_q , and g_γ .
 - Fatores de inclinação e excentricidade do carregamento:** Three yellow output fields for i_c , i_q , and i_γ .
- Parametros do solo:** Input fields for ϕ (degrees), c (kN/m²), and γ (kN/m³).
- Parametros interface solo fundação:** Input fields for ϕ_b (degrees) and c_a (kN/m²).
- Fatores de Segurança:** Input fields for "Deslizamento" (value 2) and "Global" (value 3).

A large "Calcular" button is positioned at the bottom right of the interface.

(fonte: elaborada pelo autor)

O programa disponibiliza nas abas Capacidade Suporte: compressão e tração o cálculo da capacidade suporte do solo de fundação. Caso o usuário já disponibilize desta informação, passará diretamente para a aba de Entrada de Dados: dimensionamento.

Buscou-se facilitar a compreensão do usuário na entrada de dados nas abas do programa, destinaram-se os campos na cor branca para inserção de dados e os campos na cor amarela para os resultados dos dados calculados. A seguir são descritas as etapas do programa.

6.1 CAPACIDADE SUPORTE: COMPRESSÃO

Nesta primeira aba do programa, como mostra na figura 14, são calculados a capacidade de carga limite do solo à compressão sob ação de uma fundação direta, os parâmetros que influenciam no cálculo da capacidade suporte e ainda a verificação da segurança ao deslizamento do solo da fundação.

Uma primeira categoria de dados a serem fornecidos pelo usuário engloba as cargas verticais e horizontais atuantes na estrutura com o seu respectivo percentual de permanência e variabilidade. Na inserção das cargas horizontais o usuário deve informar a inclinação da carga aplicada na estrutura, levando em conta o plano horizontal.

Numa segunda etapa, o usuário fornecerá os parâmetros do solo da fundação, os quais englobam o ângulo de atrito interno, a coesão e o peso específico da camada de solo analisada. Posteriormente, devem-se fornecer os parâmetros de interface solo com a fundação, que serão a adesão e o ângulo de atrito do solo com o concreto.

Foi dada ao usuário a liberdade de escolher os coeficientes de segurança global e ao deslizamento. Porém, ao ser inicializado, o programa já considera os valores padrões de 2 e 3, respectivamente. Assim, diminui-se um pouco o tempo que é dispensado para a entrada de dados.

A última categoria de dados de entrada refere-se às propriedades geométricas da base, abrangendo as dimensões a e b da base da sapata e a distância vertical do nível do terreno até a base do elemento estrutural.

A entrada de dados nos campos de fatores que influem na capacidade suporte, fatores de capacidade de carga, cálculo da tensão admissível e segurança ao deslizamento estão bloqueados para a inserção de unidades, pois esses resultados serão fornecidos ao usuário quando ele clicar em <CALCULAR>. Após todos os campos terem sido preenchidos, ao se clicar em <CALCULAR>, o programa irá fornecer os resultados, conforme visto na figura 14.

Figura 14 – primeira aba do programa

Programa computacional para projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas

Arquivo Sobre Ajuda

Capacidade Suporte: Compressão | Capacidade Suporte: Tração | Entrada de Dados - Dimensionamento Estrutural | Cálculo - Dimensionamento Estrutural

Cargas aplicadas a fundação

Cargas na Vertical

Permanente = 100 kN

Acidental = 100 kN

Cargas na Horizontal

Permanente = 0 kN

Acidental = 10 kN

$\theta_n = 90^\circ$

Parâmetros do solo

$\phi = 30^\circ$

$c = 15 \text{ kN/m}^2$

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

Parâmetros interface solo fundação

$\phi_b = 21^\circ$

$c_a = 11 \text{ kN/m}^2$

Fatores de Segurança

Deslizamento = 2

Global = 3

Geometria

$a = 70 \text{ cm}$ $b = 70 \text{ cm}$ $D = 100 \text{ cm}$

Fatores que influem na capacidade suporte

Fatores de Forma

$s_c = 1,611$ $s_q = 1,577$ $s_\gamma = 0,600$

Fatores de inclinação da base

$b_c = 1,000$ $b_q = 1,000$ $b_\gamma = 1,000$

Fatores de profundidade

$d_c = 1,293$ $d_q = 1,277$ $d_\gamma = 1,000$

Fatores de inclinação do terreno

$g_c = 1,000$ $g_q = 1,000$ $g_\gamma = 1,000$

Fatores de inclinação e excentricidade do carregamento

$i_c = 0,926$ $i_q = 0,930$ $i_\gamma = 0,887$

Fatores de capacidade de carga

$N_q = 18,401$

$N_c = 30,140$

$N_\gamma = 22,402$

Cálculo da tensão admissível

$q_{ult} = 1606,108 \text{ kN/m}^2$

$q_{adm} = 535,333 \text{ kN/m}^2$

$q_{solo} = 408,163 \text{ kN/m}^2$

Segurança ao deslizamento

$H_{m\acute{a}x} = 21,888 \text{ kN}$

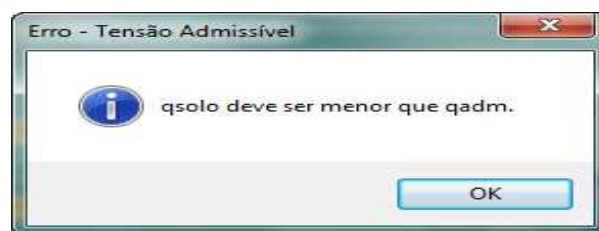
$H = 10,000 \text{ kN}$

Calcular

(fonte: elaborada pelo autor)

Ao se clicar em <CALCULAR> pode ser acionada uma mensagem de erro, dependendo do resultado do cálculo da tensão admissível e da tensão do solo. Por exemplo, para uma tensão admissível menor que a tensão do solo, é imediatamente acionada a figura 15, sendo necessário o usuário redimensionar alguns dados de entrada digitados.

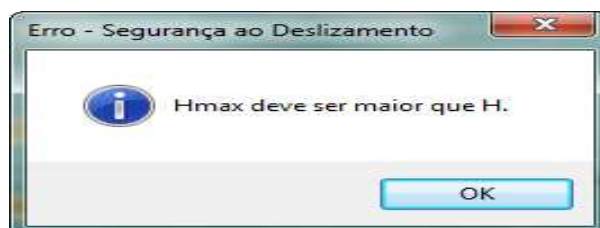
Figura 15 – mensagem de erro: tensão admissível



(fonte: elaborada pelo autor)

Também quando o usuário clicar em <CALCULAR> pode ser acionada outra mensagem de erro, dependendo do resultado da carga horizontal e carga horizontal máxima. Por exemplo, para uma carga horizontal maior que a carga horizontal máxima, é imediatamente acionada a figura 16, sendo necessário o usuário redimensionar alguns dados de entrada digitados.

Figura 16 – mensagem de erro: segurança ao deslizamento



(fonte: elaborada pelo autor)

6.2 CAPACIDADE SUPORTE: TRAÇÃO

Nesta segunda aba do programa, como mostra na figura 17, são calculados a capacidade de carga limite do solo à tração sob ação de uma fundação direta e os parâmetros da base e fuste que influenciam no cálculo da capacidade suporte.

Uma primeira categoria de dados a serem fornecidos pelo usuário engloba o ângulo de atrito interno, o peso específico do solo de fundação e o ângulo de inclinação do terreno. Posteriormente, o usuário colocará os dados referente à geometria da sapata, que são as dimensões a e b da base da sapata, a distância vertical do nível do terreno até a base do elemento estrutural, as dimensões a_0 e b_0 do pilar e a altura da sapata.

Na última categoria de dados de entrada, o usuário fornecerá o valor da sobrecarga uniforme na superfície do terreno, a coesão do solo de fundação, o peso específico do elemento constituinte da sapata (concreto) e o fator de segurança global.

Foi dada ao usuário a liberdade de escolher o fator de segurança global. Porém, ao ser inicializado, o programa já considera o valor padrão de 3. Assim, se diminui um pouco o tempo que é dispensado para a entrada de dados.

Figura 17 – segunda aba do programa

Programa computacional para projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas

Arquivo Sobre Ajuda

Capacidade Suporte: Compressão Capacidade Suporte: Tração Entrada de Dados - Dimensionamento Estrutural Cálculo - Dimensionamento Estrutural

Layout

Dados de entrada

$\phi =$ °
 $\gamma =$ kN/m³
 $\beta =$ °
A = m
h = m
D = m
B = m
 $a_o =$ m
 $b_o =$ m
 $q_o =$ kN/m²
 $\gamma_c =$ kN/m³
C = kN/m²
FS Global =

Fatores de capacidade: Base

m = °
n = °
f/H =
 $M_{co} =$
 $M_c =$
 $M_{qo} =$
 $M_q =$
 $M_{\phi o} + M_{\gamma o} =$
 $M_{\phi} + M_{\gamma} =$
 $\lambda_{base} =$ °
Re = m
D/R =
 $m' =$
M =

Fatores de capacidade: Fuste

m = °
n = °
f/H =
 $M_{co} =$
 $M_c =$
 $M_{qo} =$
 $M_q =$
 $M_{\phi o} + M_{\gamma o} =$
 $M_{\phi} + M_{\gamma} =$
 $\lambda_{fuste} =$ °
Re = m
D/R =

Resultados

W = kN
 $q_{ult} =$ kN/m²
Dc = m
 $q_{adm} =$ kN/m²
 $q_t =$ kN
 $q_{solo} =$ kN/m²

Sapata em solo de:

CALCULAR

(fonte: elaborada pelo autor)

A entrada de dados nos campos de resultados, fatores de capacidade da base e fuste estão bloqueados para a inserção de unidades, pois esses resultados serão fornecidos ao usuário quando ele clicar em <CALCULAR>.

Após todos os campos terem sido preenchidos, ao se clicar em <CALCULAR>, o programa irá fornecer todos os resultados, bem como detalhar esquematicamente a superfície de ruptura da sapata no campo *layout* e informar ao usuário em que categoria de solo, 1 ou 2, a fundação está situada, conforme visto na figura 18.

Quando o usuário clicar em <CALCULAR> pode ser acionada uma mensagem de erro, dependendo da informação do ângulo de atrito interno inserida pelo usuário. Por exemplo, para um ângulo de atrito ϕ maior que 40°, é imediatamente acionada a figura 19, sendo necessário o usuário inserir um valor menor a 40°.

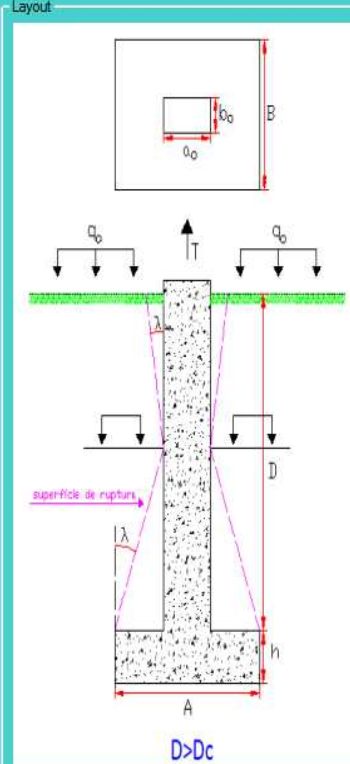
Figura 18 – resultados dos cálculos da capacidade suporte a tração

Programa computacional para projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas

Arquivo Sobre Ajuda

Capacidade Suporte: Compressão Capacidade Suporte: Tração Entrada de Dados - Dimensionamento Estrutural Cálculo - Dimensionamento Estrutural

Layout



Dados de entrada

$\phi = 10^\circ$
 $\gamma = 6 \text{ kN/m}^3$
 $\beta = 0^\circ$
 $A = 3 \text{ m}$
 $h = 0.5 \text{ m}$
 $D = 8 \text{ m}$
 $B = 3 \text{ m}$
 $a_o = 0.5 \text{ m}$
 $b_o = 0.5 \text{ m}$
 $q_o = 20 \text{ kN/m}^2$
 $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$
 $c = 10 \text{ kN/m}^2$
 FS Global = 3

Fatores de capacidade: Base

$m = -28.691^\circ$
 $n = -4.782^\circ$
 $f/H = 0.876$
 $M_{co} = 0.707$
 $M_c = 0.330$
 $M_{qo} = 0.325$
 $M_q = 0.152$
 $M_{\phi o} + M_{\gamma o} = 0.076$
 $M_{\phi} + M_{\gamma} = 0.049$
 $\lambda_{base} = 11.309^\circ$
 $Re = 1.500 \text{ m}$
 $D/R = 5.333$
 $m' = -$
 $M = -$

Fatores de capacidade: Fuste

$m = -41.250^\circ$
 $n = -6.574^\circ$
 $f/H = 0.915$
 $M_{co} = 0.913$
 $M_c = 0.968$
 $M_{qo} = 0.139$
 $M_q = 0.147$
 $M_{\phi o} + M_{\gamma o} = 0.086$
 $M_{\phi} + M_{\gamma} = 0.089$
 $\lambda_{fuste} = -1.25^\circ$
 $Re = 0.318 \text{ m}$
 $D/R = 5.503$

Resultados

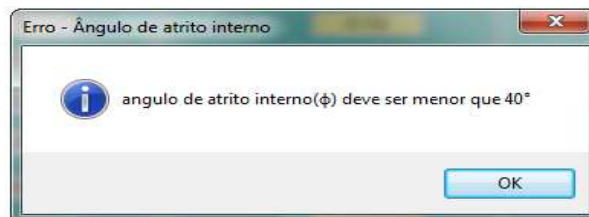
$W = 162.500 \text{ kN}$
 $D_c = 6.250 \text{ m}$
 $q_t = 1271.078 \text{ kN}$
 $q_{ult} = 141.231 \text{ kN/m}^2$
 $q_{adm} = 47.077 \text{ kN/m}^2$
 $q_{solo} = 20.000 \text{ kN/m}^2$

Sapata em solo de: **CATEGORIA 1**

CALCULAR

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 19 – mensagem de erro: ângulo de atrito interno



(fonte: elaborada pelo autor)

6.3 ENTRADA DE DADOS: DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Nesta terceira aba do programa, como mostra na figura 20, são declarados os dados necessários para o cálculo dos momentos fletores, para a distribuição das armaduras na sapata, esforço cortante resistente e para a verificação das armaduras de flexão.

Figura 20 – entrada de dados para o dimensionamento estrutural

(fonte: elaborada pelo autor)

Uma primeira categoria de dados a serem fornecidos pelo usuário engloba as características dos materiais, sendo o cobrimento da armadura, a classe de resistência do concreto e a categoria do aço da fundação superficial.

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 19), o cobrimento nominal mínimo para um elemento estrutural situado num ambiente de

classe de agressividade 2 é de 3 cm, assim, foi limitado ao usuário este valor mínimo no campo de cobrimento ambiental.

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 18), a classe de resistência do concreto se limita a 20 MPa, sendo limitado ao usuário este valor mínimo no campo da classe de resistência do concreto.

Numa segunda etapa, o usuário selecionará, no campo de esforços aplicados à sapata, o esforço aplicado à sapata, compressão ou compressão + tração, bem como selecionará se a geometria da sapata será de espessura constante ou piramidal. Caso seja escolhido a forma da sapata de espessura constante, o campo h_o estará bloqueado e quando o usuário escolher a forma piramidal, o campo h_o estará liberado para a inserção de dados.

Foi dada ao usuário a liberdade de escolher a espessura h_o , bem como, utilizar a espessura mínima calculada, conforme a condição (CONSOLI, 2008a, p. 2), porém a espessura informada pelo usuário deverá ser maior que a espessura mínima do bordo, bem como maior a 20 cm, caso isso não ocorra, as mensagens de erros são mostradas, conforme mostra as figuras 21 e 22:

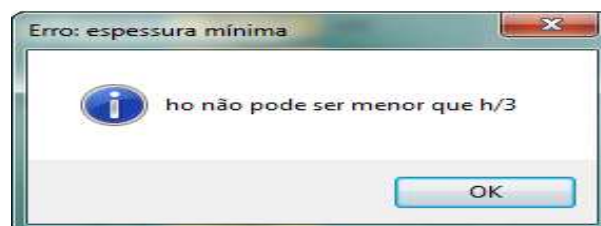
$$h_o \geq \frac{h}{3} \quad e \quad h_o \geq 20cm$$

Onde:

h = altura da sapata;

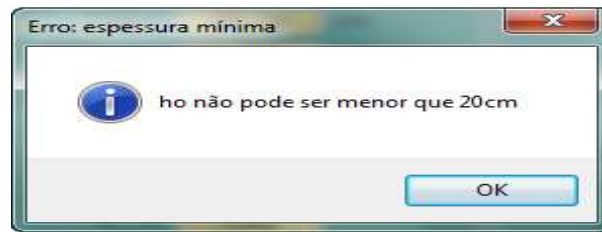
h_o = espessura do bordo;

Figura 21 – mensagem de erro : espessura mínima 1



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 22 – mensagem de erro : espessura mínima 2

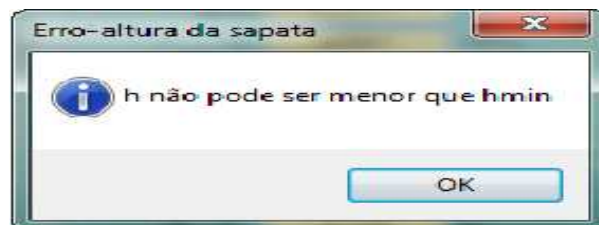


(fonte: elaborada pelo autor)

Quando o usuário selecionar o tipo de esforço aplicado e a forma da sapata, o programa automaticamente mostrará um desenho esquemático da sapata com a sua respectiva armadura, visando mostrar um detalhamento primário ao usuário.

Foi dada ao usuário a liberdade de escolher a altura da sapata, contudo, a altura fornecida deve ser maior que a altura mínima calculada, caso contrário, a mensagem de erro é mostrada, conforme mostra a figura 23. Porém, ao ser inicializado, o programa já considera a altura mínima. Assim, se diminui um pouco o tempo que é dispensado para a entrada de dados.

Figura 23 – mensagem de erro: altura da sapata



(fonte: elaborada pelo autor)

Posteriormente, o usuário fornecerá as dimensões do pilar que está apoiado na sapata, bem como os coeficientes γ_c e γ_s . Foi dada ao usuário a liberdade de escolher os coeficientes γ_c e γ_s . Porém, ao ser inicializado, o programa já considera os valores padrões de 1,4 e 1,15, respectivamente.

No campo dados do pilar, deve-se fornecer a bitola da armadura do pilar para o cálculo da altura mínima da sapata, conforme as fórmulas 28 e 29 da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 35):

$$h = \alpha_1 \cdot l_b \cdot \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \quad (\text{fórmula 28})$$

$$l_b = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \quad (\text{fórmula 29})$$

Onde:

h = altura da sapata;

α_1 = coeficiente de ancoragem;

$A_{s,calc}$ = área da seção transversal da armadura calculada;

$A_{s,ef}$ = área da seção transversal da armadura efetiva

l_b = comprimento de ancoragem básico;

ϕ = bitola da armadura do pilar;

f_{bd} – resistência de aderência de cálculo entre a armadura e o concreto;

f_{yd} – resistência de cálculo de escoamento do aço.

Neste mesmo campo, foi dado ao usuário a liberdade de escolher os coeficientes para o cálculo da tensão de aderência da armadura passiva η_1 , η_2 e η_3 . Porém, ao ser inicializado, o programa já considera os valores padrões de 2,25 (barras nervuradas), 1 (situações de boa aderência) e 1 (bitola do pilar menor que 32 mm), respectivamente.

Numa terceira etapa, devem-se fornecer as bitolas das armaduras de compressão e tração, sendo que ao selecionar apenas o item compressão, apenas as bitolas de compressão estarão liberadas para a inserção de dados. Porém, quando o usuário selecionar o item compressão + tração, as bitolas de compressão e tração estarão liberadas para a inserção de dados.

No campo de dados da base da sapata, o usuário poderá escolher as dimensões da base ou considerar as dimensões mínimas da base, apenas informando a relação a/b. O programa

limita-se ao valor de a/b a 2.5, devido a necessidade de relações superiores a esta, a necessidade de projetar sapatas com nervura. Após todos os campos terem sido preenchidos, o usuário deve acessar a quarta aba do programa e clicar em <CALCULAR>.

6.4 CÁLCULO: DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Nesta quarta aba, o usuário deve clicar em <CALCULAR> para obter os valores calculados dos momentos fletores, para a distribuição das armaduras na sapata, esforço cortante resistente e para a verificação das armaduras de flexão, conforme visto na figura 24.

Figura 24 – quarta aba do programa

The screenshot displays the 'Cálculo - Dimensionamento Estrutural' tab of a software application. The interface is organized into several functional areas:

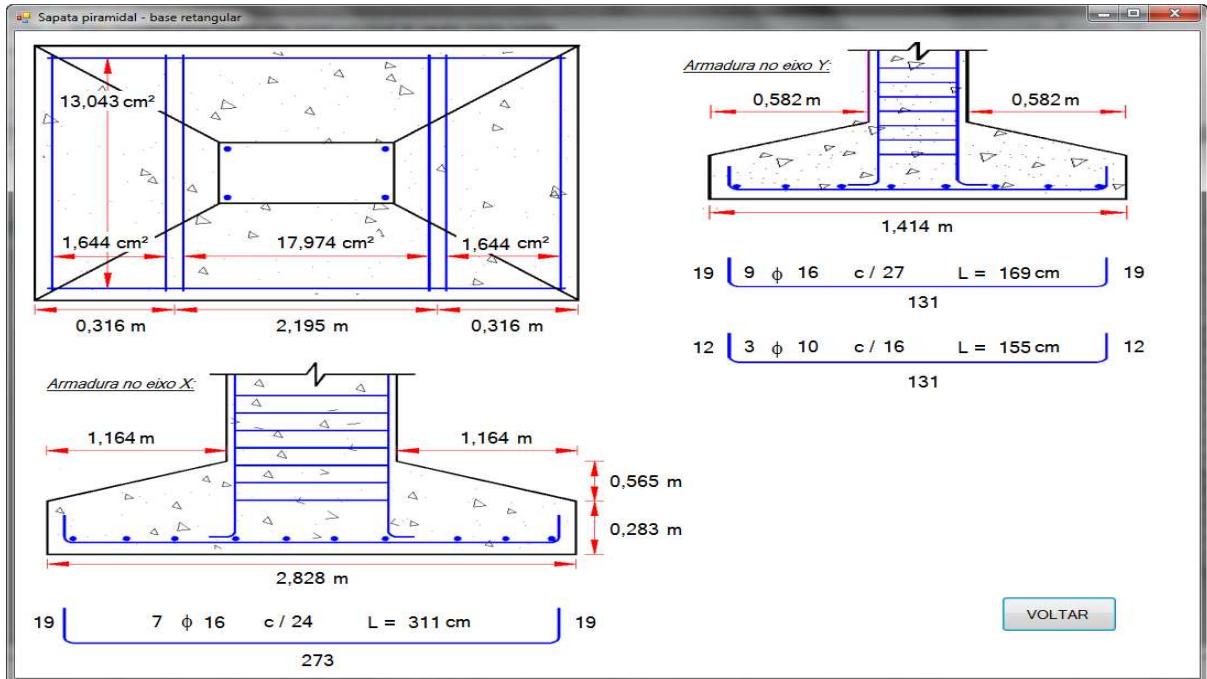
- Tensões:** Shows material strength values: $f_{yd} = 434,783$ MN/m², $f_{ctd} = 0,912$ MN/m², $f_{bd} = 2,052$ MN/m², and $f_{ck} = 15,000$ MN/m².
- Informações:** Lists geometric parameters: $a = 2,828$ m, $b = 1,414$ m, $d = 79,753$ cm, $h = 84,753$ cm, $h_o = -$ cm, and $bitola = 16$ mm.
- Dimensionamento à Flexão:**
 - Na direção X - COMPRESSÃO:** $I_x = 1,239$ m, $M_x = 271,415$ kN.m, $A'_{sx} = 13,038$ cm², $A_{cl} = 11984,074$ cm², $A_{sx} = 17,976$ cm², $A_{sx}/b = 12,713$ cm²/m.
 - Na direção X - TRACÇÃO:** $I_x = -$ m, $M_x = -$ kN.m, $A'_{sx} = -$ cm², $A_{cl} = -$ cm², $A_{sx} = -$ cm², $A_{sx}/b = -$ cm²/m.
 - Na direção Y - COMPRESSÃO:** $I_y = 0,6195$ m, $M_y = 135,707$ kN.m, $A'_{sy} = 6,519$ cm², $A_{cl} = 23968,148$ cm², $A_{sy} = 35,952$ cm², $A_{sy}/a = 12,713$ cm²/m.
 - Na direção Y - TRACÇÃO:** $I_y = -$ m, $M_y = -$ kN.m, $A'_{sy} = -$ cm², $A_{cl} = -$ cm², $A_{sy} = -$ cm², $A_{sy}/a = -$ cm²/m.
- Verificação do Corte:**
 - Seção de Referência II - COMPRESSÃO:** $A_{sx} = 17,976$ cm², $A_{cl} = 11984,074$ cm², $\rho = 0,0015$, $\tau_{rd1} = 1,023$ MPa, $F_{Sd} = 366,973$ kN, $\tau_{sd} = 0,439$ MPa.
 - Seção de Referência II - TRACÇÃO:** $A_{sx} = -$ cm², $A_{cl} = -$ cm², $\rho = -$, $\tau_{rd1} = -$ MPa, $F_{Sd} = -$ kN, $\tau_{sd} = -$ MPa.
 - Face do Pilar - COMPRESSÃO:** $I_2 = 0,765$ m, $d_2 = 0,79753$ m, $b_2 = 1,048$ m, $\alpha_v = 0,940$, $\tau_{rd2} = 2,719$ MPa, $F_{Sd} = 457,648$ kN, $\tau_{sd} = 2,295$ MPa.
 - Face do Pilar - TRACÇÃO:** $I_2 = -$ m, $d_2 = -$ m, $b_2 = -$ m, $\alpha_v = -$, $\tau_{rd2} = -$ MPa, $F_{Sd} = -$ kN, $\tau_{sd} = -$ MPa.
- Verificação da Adesão:**
 - A COMPRESSÃO:** $F_s = 438,119$ kN, $u_{smin} = 43,080$ cm, $u_{smin}/b = 30,467$ cm/m.
 - A TRACÇÃO:** $F_s = -$ kN, $u_{smin} = -$ cm, $u_{smin}/b = -$ cm/m.

At the bottom right, there are two buttons: 'Calcular' and 'Distribuição das Armaduras'.

(fonte: elaborada pelo autor)

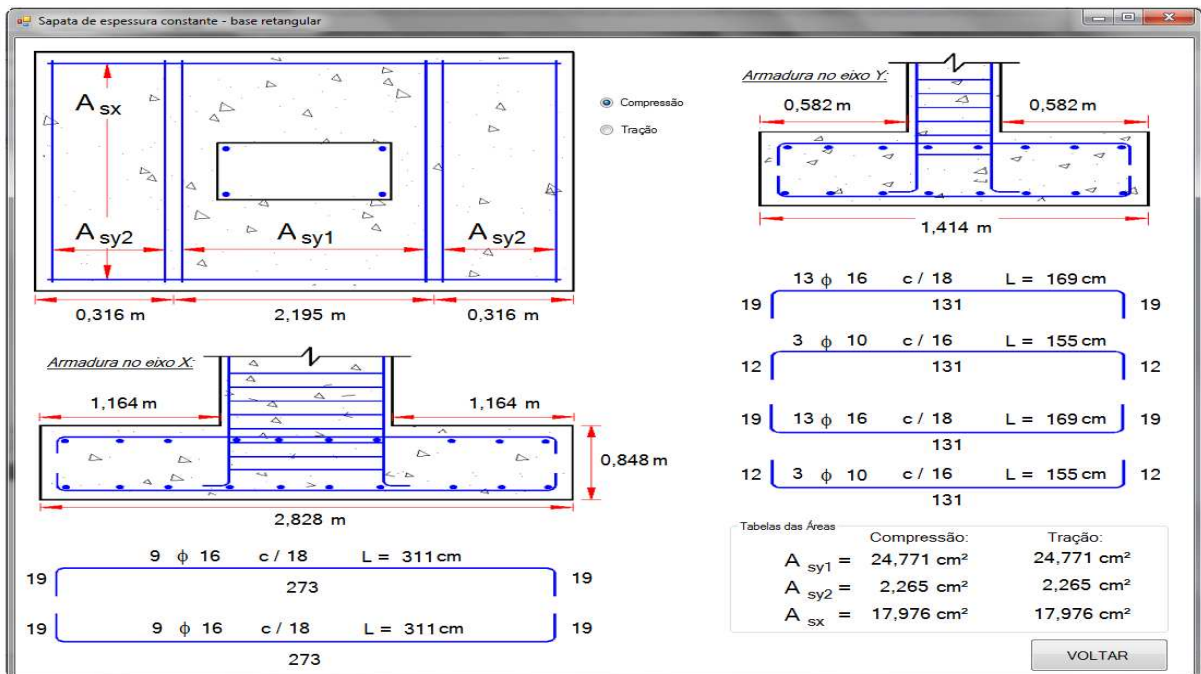
Posteriormente, o usuário deve clicar em <DISTRIBUIÇÃO DAS ARMADURAS> para obter o detalhamento estrutural da sapata, conforme visto nos exemplos das figuras 25 e 26.

Figura 25 – distribuição das armaduras: compressão



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 26 – distribuição das armaduras: tração

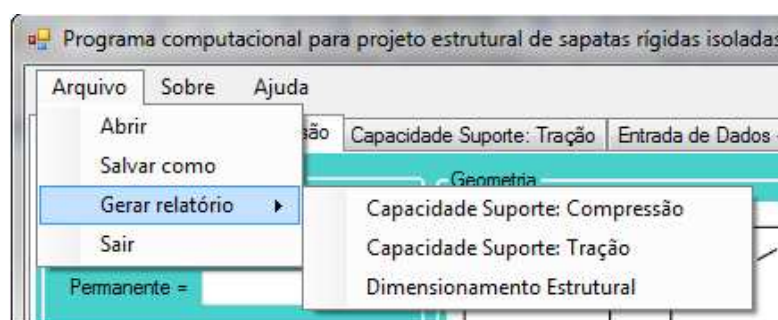


(fonte: elaborada pelo autor)

6.5 MENU DE FUNÇÕES AUXILIARES

O programa possui, ainda, algumas funções auxiliares destinadas a facilitar a manipulação de dados pelo usuário. Essas funções estão contidas na barra de ferramentas localizada na parte superior da janela inicial. Esse menu é apresentado na figura 27.

Figura 27 – menu de funções auxiliares

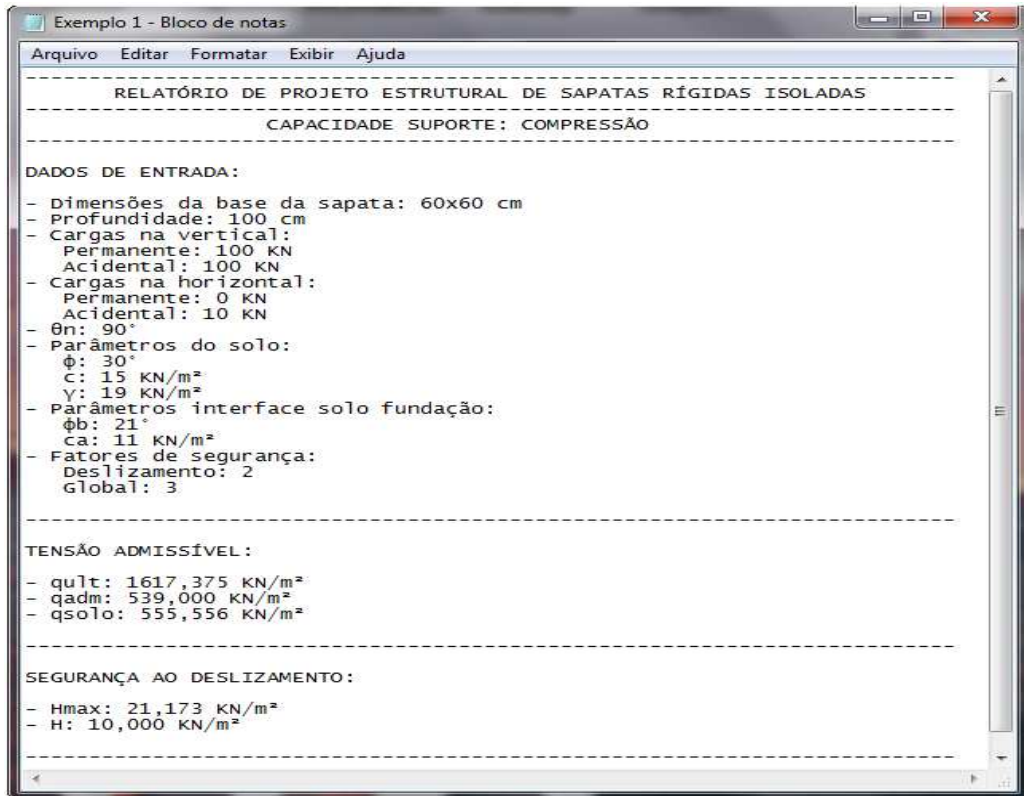


(fonte: elaborada pelo autor)

Ao se clicar em <SALVAR COMO>, todos os dados preenchidos pelo usuário serão armazenados em um arquivo de texto, no diretório especificado pelo mesmo. No futuro, caso seja de seu interesse, o usuário poderá acessar novamente esses dados, clicando em <ABRIR> e selecionando o arquivo correspondente. Essas funções também possibilitam o fornecimento de dados de uma maneira diferente, informando-os e/ou modificando-os diretamente no arquivo de texto. De uma maneira geral, se destinam a facilitar o procedimento de entrada de dados, diminuindo o tempo requerido para tal.

Por outro lado, o comando <GERAR RELATÓRIO> cria, em um arquivo de texto no diretório especificado pelo usuário, um registro do processo do cálculo da capacidade suporte do solo de fundação à compressão e à tração, bem como, o dimensionamento estrutural da sapata. A figura 28 apresenta um exemplo de relatório gerado pelo programa.

Figura 28 – relatório



(fonte: elaborada pelo autor)

No menu de funções ao se clicar em <SOBRE> apresenta sobre a autoria do programa, conforme mostra na figura 29, bem como o ano do desenvolvimento do *software*, o email para em caso de dúvidas, a informação do professor orientador e coorientador.

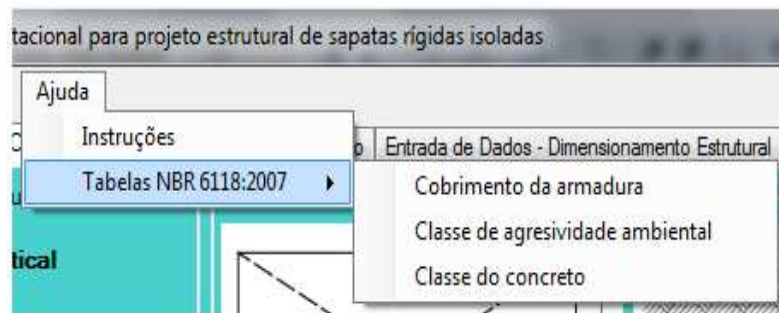
Figura 29 – informação de autoria



(fonte: elaborada pelo autor)

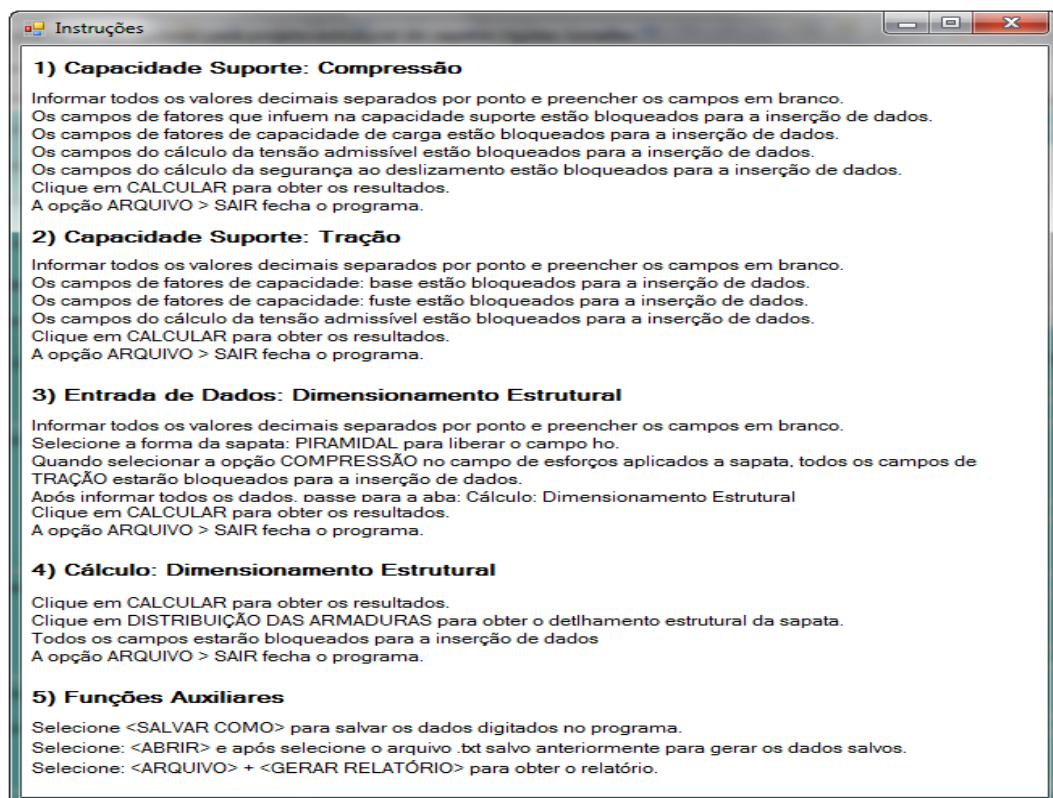
Ainda o usuário dispõe ao clicar em <AJUDA> e após em <INSTRUÇÕES> as instruções detalhadas do funcionamento do programa, visando elucidar quaisquer dúvidas que surjam, como visto nas figuras 30 e 31. Neste mesmo menu <AJUDA>, o usuário ao clicar em <TABELAS NBR 6118:2007> dispõe-se de tabelas que auxiliarão e elucidarão na inserção de dados no programa, conforme visto nas figuras 32 e 33.

Figura 30 – menu ajuda



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 31 – instruções



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 32 – cobertura nominal da armadura

COBRIMENTO NOMINAL DA ARMADURA					
Tabela 7.2 da NBR 6118:2007					
Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ³⁾
Cobrimento nominal mm					
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 33 – classe de agressividade ambiental

CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL			
Tabela 6.1 da NBR 6118:2007			
Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fracá	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

(fonte: elaborada pelo autor)

7 EXEMPLO NUMÉRICO

No presente capítulo, apresenta-se uma aplicação do programa computacional para projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas, visando o desenvolvimento do cálculo da capacidade suporte do solo de fundação à compressão e o posterior dimensionamento estrutural da sapata rígida isolada.

Neste exemplo considera-se uma sapata de concreto armado com dimensões 200 x 200 cm, numa profundidade em relação ao terreno de 100 cm, submetida a uma carga de compressão vertical permanente de 1000 kN e acidental de 1000 kN, bem como, uma carga horizontal nula. O pilar possui a seção quadrada 100 x 100 cm, está centrado no centro geométrico do elemento estrutural e sua armadura longitudinal possui o diâmetro de 20 mm. O solo da fundação apresenta os parâmetros de ângulo de atrito interno de 30°, coesão de 15 kN/m², peso específico de 19 kN/m³, ângulo de atrito solo x concreto de 21° e adesão solo x concreto de 11 kN/m². Com relação a segurança, considera-se o fator de segurança ao deslizamento de 2 e o global de 3, bem como, o coeficiente de ponderação da resistência do concreto de 1,4 e o coeficiente de ponderação da resistência do aço de 1,15. A classe de resistência do concreto é C40, as barras de aço são nervuradas, de boa aderência e de categoria CA-50. A situação de exposição da sapata corresponde à classe de agressividade ambiental IV e possui cobrimento da armadura de 50 mm.

A figura 34 apresenta a tela inicial com os valores das cargas verticais, os parâmetros do solo, parâmetros interface solos x fundação, fatores de segurança e a geometria da sapata, bem como, o resultado da capacidade suporte do solo da fundação submetida a esforços de compressão. Na figura 35, apresenta-se a entrada de dados para o dimensionamento estrutural da sapata. Nessa aba estão os dados das características dos materiais, concreto e aço, as dimensões escolhidas do pilar e da sapata, bem como, a capacidade suporte do solo de fundação obtida na primeira aba, como mostra na figura 34, e o diâmetro escolhido para as barras de aço da armadura da sapata.

Figura 34 – janela inicial preenchida

Programa computacional para projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas

Arquivo Sobre Ajuda

Capacidade Suporte: Compressão | Capacidade Suporte: Tração | Entrada de Dados - Dimensionamento Estrutural | Cálculo - Dimensionamento Estrutural

Cargas aplicadas a fundação

Cargas na Vertical

Permanente = 1000 kN
Acidental = 1000 kN

Cargas na Horizontal

Permanente = 0 kN
Acidental = 0 kN
 $\theta_n = 0^\circ$

Parâmetros do solo

$\phi = 30^\circ$
 $c = 15$ kN/m²
 $\gamma = 19$ kN/m³

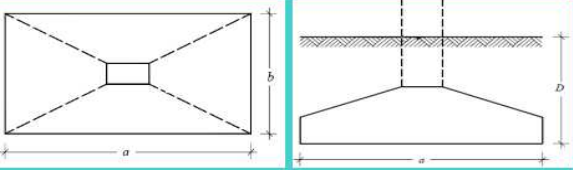
Parâmetros interface solo fundação

$\phi_b = 21^\circ$
 $c_a = 11$ kN/m²

Fatores de Segurança

Deslizamento = 2
Global = 3

Geometria



a = 200 cm b = 200 cm D = 100 cm

Fatores que influem na capacidade suporte

Fatores de Forma

$s_c = 1,611$ $s_q = 1,577$ $s_y = 0,600$

Fatores de inclinação da base

$b_c = 1,000$ $b_q = 1,000$ $b_y = 1,000$

Fatores de profundidade

$d_c = 1,152$ $d_q = 1,144$ $d_y = 1,000$

Fatores de inclinação do terreno

$g_c = 1,000$ $g_q = 1,000$ $g_y = 1,000$

Fatores de inclinação e excentricidade do carregamento

$i_c = 1,000$ $i_q = 1,000$ $i_y = 1,000$

Fatores de capacidade de carga

$N_q = 18,401$
 $N_c = 30,140$
 $N_\gamma = 22,402$

Cálculo da tensão admissível

$q_{ult} = 1725,160$ kN/m²
 $q_{adm} = 575,000$ kN/m²
 $q_{solo} = 500,000$ kN/m²

Segurança ao deslizamento

$H_{m\acute{a}x} = -$ kN
 $H = -$ kN

Calcular

(fonte: elaborada pelo autor)

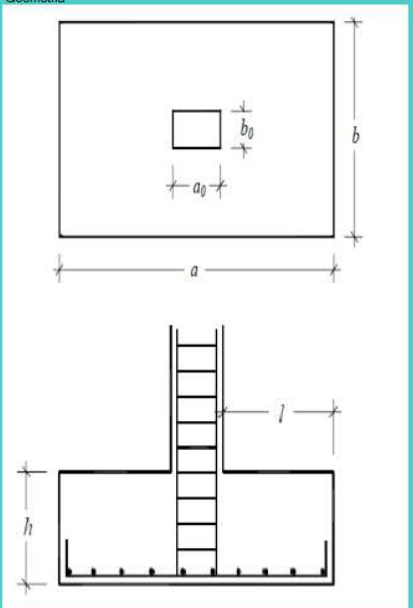
Figura 35 – entrada de dados preenchida

Programa computacional para projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas

Arquivo Sobre Ajuda

Capacidade Suporte: Compressão | Capacidade Suporte: Tração | Entrada de Dados - Dimensionamento Estrutural | Cálculo - Dimensionamento Estrutural

Geometria



Características dos Materiais

Cobrimento da armadura (cm): 5.0
Classe de resistência do concreto: C40
Categoria do aço: CA-50

Esforços Aplicados a Sapata

Compressão
 Compressão + Tração

Forma da Sapata

Sapata de Espessura Constante
 Sapata Piramidal

Altura "h₀"

altura mínima
 digitar altura
h₀ = _____ m

Altura "h"

altura mínima
 digitar altura
h = _____ m

Dados

a₀ = 1.00 m $\gamma_s = 1.15$
b₀ = 1.00 m $\gamma_c = 1.40$

Compressão: q_{adm} = 0.57 MN/m² Tração: q_{adm} = _____ MN/m²
p = 2000 kN p = _____ kN

Dado do Pilar

Bitola do aço do Pilar = 20 mm
 $\eta_1 = 2.25$ $\eta_2 = 1.00$
 $\eta_3 = 1.00$

Bitola da Armadura no Eixo X e Y

Compressão: Bitola no Eixo X = 16 mm Tração: _____ mm
Bitola no Eixo Y = 16 mm _____ mm
_____ mm _____ mm

Dados da base inferior

Utilizar dimensões mínimas de "a" e "b"
a/b _____
 Digitar as Dimensões de "a" e "b"
a = 2.00 m b = 2.00 m

(fonte: elaborada pelo autor)

A figura 36 apresenta o resultado dos cálculos do dimensionamento estrutural. Nessa quarta aba são apresentados ao usuário os resultados das tensões, do dimensionamento a flexão, a verificação do corte e a aderência.

Figura 36 – cálculo do dimensionamento estrutural

Programa computacional para projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas

Arquivo Sobre Ajuda

Capacidade Suporte: Compressão | Capacidade Suporte: Tração | Entrada de Dados - Dimensionamento Estrutural | Cálculo - Dimensionamento Estrutural

Tensões

$f_{yd} = 434,783$ MN/m² $f_{bd} = 3,947$ MN/m²

$f_{ctd} = 1,754$ MN/m² $f_{ck} = 40,000$ MN/m²

Informações

$a = 2$ m bitola = 20 mm $h = 55,078$ cm

$b = 2$ m $d = 50,078$ cm $h_o = -$ cm

Dimensionamento à Flexão

Na direção X - COMPRESSÃO

$I_x = 0,65$ m

$M_x = 211,250$ kN.m

$A'_{sx} = 16,034$ cm²

$A_{cl} = 11015,600$ cm²

$A_{sx} = 25,336$ cm²

$Asx / b = 12,668$ cm²/m

Na direção X - TRAÇÃO

$I_x = -$ m

$M_x = -$ kN.m

$A'_{sx} = -$ cm²

$A_{cl} = -$ cm²

$A_{sx} = -$ cm²

$Asx / b = -$ cm²/m

Verificação do Corte

Seção de Referência II - COMPRESSÃO

$A_{sx} = 25,336$ cm²

$A_{cl} = 11015,600$ cm²

$\rho = 0,0023$

$\tau_{rd1} = 1,994$ MPa

$FSd = 306,318$ kN

$\tau_{sd} = 0,408$ MPa

Seção de Referência II - TRAÇÃO

$A_{sx} = -$ cm²

$A_{cl} = -$ cm²

$\rho = -$

$\tau_{rd1} = -$ MPa

$FSd = -$ kN

$\tau_{sd} = -$ MPa

Na direção Y - COMPRESSÃO

$I_y = 0,65$ m

$M_y = 211,250$ kN.m

$A'_{sy} = 16,034$ cm²

$A_{cl} = 11015,600$ cm²

$A_{sy} = 25,336$ cm²

$Asy / a = 12,668$ cm²/m

Na direção Y - TRAÇÃO

$I_y = -$ m

$M_y = -$ kN.m

$A'_{sy} = -$ cm²

$A_{cl} = -$ cm²

$A_{sy} = -$ cm²

$Asy / a = -$ cm²/m

Face do Pilar - COMPRESSÃO

$l_2 = 0,250$ m

$d_2 = 0,50078$ m

$b_2 = 1,501$ m

$\alpha_v = 0,840$

$\tau_{rd2} = 6,480$ MPa

$FSd = 525,000$ kN

$\tau_{sd} = 1,048$ MPa

Face do Pilar - TRAÇÃO

$l_2 = -$ m

$d_2 = -$ m

$b_2 = -$ m

$\alpha_v = -$

$\tau_{rd2} = -$ MPa

$FSd = -$ kN

$\tau_{sd} = -$ MPa

Verificação da Aderência

A COMPRESSÃO

$FS = 650,000$ kN

$u_{smin} = 52,919$ cm

$u_{smin} / b = 26,460$ cm/m

A TRAÇÃO

$FS = -$ kN

$u_{smin} = -$ cm

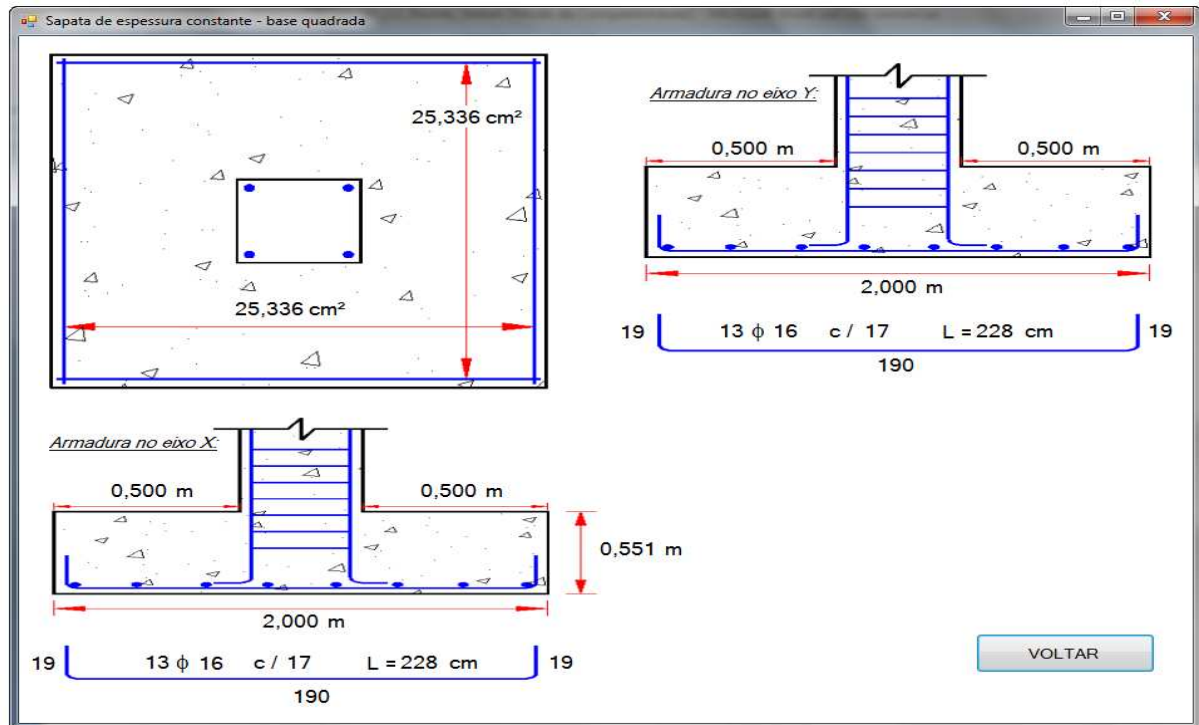
$u_{smin} / b = -$ cm/m

Calcular Distribuição das Armaduras

(fonte: elaborada pelo autor)

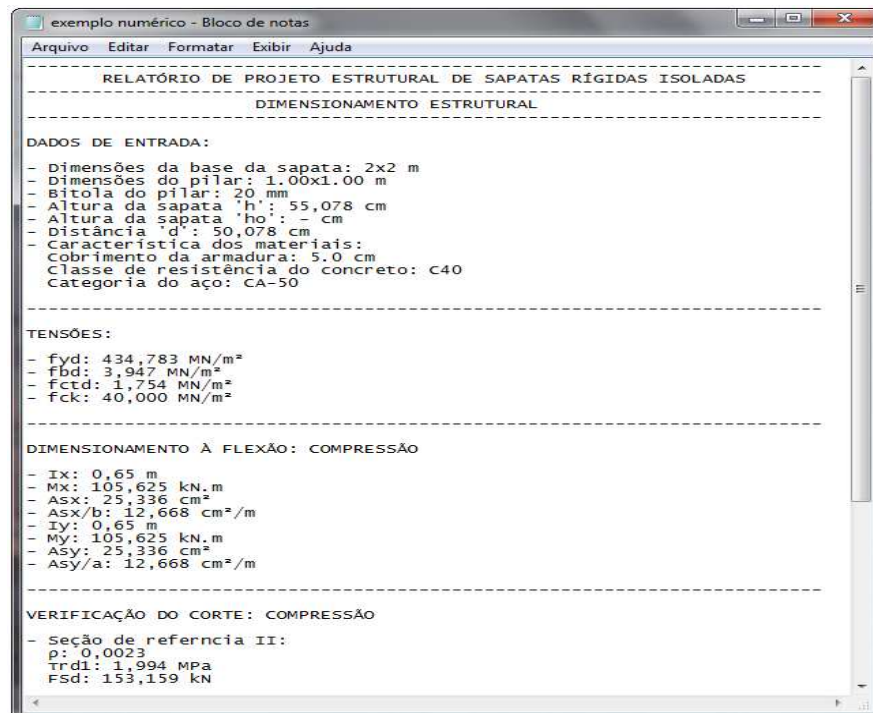
Na figura 37 é apresentado o projeto estrutural da sapata rígida isolada, bem como, o detalhamento das armaduras, o comprimento da barra de aço, a quantidade de barras necessárias na direção x e y, o corte esquemático da sapata e suas geometrias. Na figura 38 é mostrado o relatório do exemplo numérico, contendo as informações técnicas do projeto.

Figura 37 – distribuição da armadura



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 38 – relatório do exemplo numérico



(fonte: elaborada pelo autor)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste capítulo é proceder a uma análise final do programa para projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas, e do trabalho de diplomação como um todo, tecendo as considerações finais quanto à finalidade desses. Objetivo do trabalho, que é o desenvolvimento de um programa computacional para projeto estrutural de sapatas rígidas isoladas que respeite as recomendações da NBR 6118:2007 em todas as suas etapas e o CEB 70, foi alcançado.

Foi desenvolvido um mecanismo de análise de erros de entrada de dados tendo como objetivo informar ao usuário que os dados que ele inseriu como, por exemplo, letras ou outros caracteres que não sejam números, foram inseridos incorretamente. Como essa entrada de dados indevida ocasionará um erro no programa, o mesmo informa ao usuário que os campos devem estar preenchidos somente com números, para a realização do cálculo e ao mesmo tempo não permite a continuidade do cálculo antes da devida correção. O programa emite uma mensagem bem detalhada do problema, bem como sua descrição, possibilitando ao usuário a correção dos erros de forma fácil e rápida.

De uma forma geral, a partir dos resultados obtidos pelo programa, pode-se concluir que sua utilização para fins acadêmicos e profissionais é válida, pois apresenta didaticamente a solução encontrada. O programa pode ser utilizado para o cálculo a esforços aplicados a fundação de compressão e à tração, como também para apenas calcular a capacidade suporte do solo da fundação. Considera-se que o programa atende à sua proposta e é eficaz na resolução dos problemas propostos. Nos exemplos testados e não foram detectados problemas. Como sugestão para a continuidade deste trabalho, cita-se:

- a) extensão do programa para pilares com excentricidade;
- b) extensão do programa para fundações contínuas, associadas e com viga de equilíbrio;
- c) terrenos que apresentem inclinação;
- d) cargas aplicadas a sapata com inclinação.

Para alunos e o público em geral que tiverem interesse de ter acesso ao programa, basta enviar um email de solicitação para nei_stefani@hotmail.com e o mesmo lhe será enviado.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6122**: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

BIERREZ, J.; BARRAUD, Y. **Adaption des foundations de pilones au terrain par les méthodes de La mécanique des sols**. Paris: CIGRE, 1968. Report 22-06.

CONSOLI, N. C. **Fundações**: projeto estrutural de sapatas (flexão): método do CEB. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2008a. Caderno de Engenharia.

_____. **Fundações**: fundações submetidas a esforços de tração: grenoble. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2008b. Caderno de Engenharia.

FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINE. **CEB 70**: recommandations du comite europeen du beton. Sarthe, 1970.

MARTIN, D. **Étude a la rupture de different ancrages sollicitées vericalement**. 1966. These (Docteur-Ingénieur) – Après Diplôme en Ingénieur, Faculté des Sciences de Grenoble, Grenoble.

MONTOYA, P. J.; MESEGUER, A. G.; CABRÉ, F. M. **Hormigon Armado**. 14 ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2007.

PACHECO, M. P.; DANZIER, F. A. B.; PINTO, C. P. **Design of shallow foundations under tensile loading for transmission line towers: an overview**. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2008.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1943.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2004. v. 1.

**ANEXO A – Coeficientes M_c para $\lambda = -\phi/8$
(CONSOLI, 2008b, p. 21)**

<i>D/R</i>	VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ϕ)							
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
0,0	1,00	0,96	0,91	0,85	0,79	0,72	0,64	0,56
0,5	1,00	0,96	0,92	0,86	0,80	0,73	0,65	0,57
1,0	1,00	0,97	0,92	0,87	0,81	0,74	0,66	0,58
1,5	1,00	0,97	0,93	0,88	0,81	0,75	0,67	0,60
2,0	1,00	0,97	0,93	0,88	0,82	0,75	0,68	0,61
2,5	1,00	0,98	0,94	0,89	0,83	0,76	0,69	0,62
3,0	1,00	0,98	0,94	0,90	0,84	0,77	0,70	0,63
3,5	1,00	0,98	0,95	0,90	0,85	0,78	0,71	0,64
4,0	1,00	0,98	0,95	0,91	0,86	0,79	0,72	0,65
4,5	1,00	0,99	0,96	0,92	0,87	0,80	0,73	0,66
5,0	1,00	0,99	0,96	0,92	0,87	0,81	0,74	0,67
5,5	1,00	0,99	0,97	0,93	0,88	0,82	0,76	0,68
6,0	1,00	0,99	0,97	0,94	0,89	0,83	0,77	0,69
6,5	1,00	1,00	0,98	0,94	0,90	0,84	0,78	0,70
7,0	1,00	1,00	0,98	0,95	0,91	0,85	0,79	0,71
7,5	1,00	1,00	0,99	0,96	0,92	0,86	0,80	0,72
8,0	1,00	1,00	0,99	0,97	0,93	0,87	0,81	0,74
8,5	1,00	1,01	1,00	0,97	0,93	0,88	0,82	0,75
9,0	1,00	1,01	1,00	0,98	0,94	0,89	0,83	0,76
9,5	1,00	1,01	1,01	0,99	0,95	0,90	0,84	0,77
10,0	1,00	1,01	1,01	0,99	0,96	0,91	0,85	0,78
10,5	1,00	1,02	1,02	1,00	0,97	0,92	0,86	0,79
11,0	1,00	1,02	1,02	1,01	0,98	0,93	0,87	0,80
11,5	1,00	1,02	1,03	1,02	0,99	0,94	0,88	0,81
12,0	1,00	1,03	1,03	1,02	0,99	0,95	0,89	0,82
12,5	1,00	1,03	1,04	1,03	1,00	0,96	0,90	0,83
13,0	1,00	1,03	1,04	1,04	1,01	0,97	0,91	0,84
13,5	1,00	1,03	1,05	1,04	1,02	0,98	0,92	0,85
14,0	1,00	1,04	1,05	1,05	1,03	0,99	0,93	0,86
14,5	1,00	1,04	1,06	1,06	1,04	1,00	0,94	0,87
15,0	1,00	1,04	1,06	1,06	1,05	1,01	0,95	0,89

Coeficiente M_c para $\lambda = -\phi / 8$

**ANEXO B – Coeficientes ($M_\phi+M_\gamma$) para $\lambda = -\phi/8$
(CONSOLI, 2008b, p. 21)**

<i>D/R</i>	VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ϕ)							
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
0,0	0,00	0,04	0,09	0,13	0,17	0,20	0,23	0,26
0,5	0,00	0,04	0,09	0,13	0,17	0,20	0,23	0,26
1,0	0,00	0,04	0,09	0,13	0,17	0,20	0,24	0,27
1,5	0,00	0,04	0,09	0,13	0,17	0,21	0,24	0,27
2,0	0,00	0,04	0,09	0,13	0,17	0,21	0,24	0,27
2,5	0,00	0,04	0,09	0,13	0,17	0,21	0,24	0,28
3,0	0,00	0,04	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25	0,28
3,5	0,00	0,04	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25	0,28
4,0	0,00	0,04	0,09	0,13	0,18	0,22	0,25	0,29
4,5	0,00	0,04	0,09	0,13	0,18	0,22	0,25	0,29
5,0	0,00	0,04	0,09	0,13	0,18	0,22	0,26	0,29
5,5	0,00	0,04	0,09	0,13	0,18	0,22	0,26	0,30
6,0	0,00	0,04	0,09	0,14	0,18	0,22	0,26	0,30
6,5	0,00	0,04	0,09	0,14	0,18	0,22	0,26	0,30
7,0	0,00	0,04	0,09	0,14	0,18	0,23	0,27	0,30
7,5	0,00	0,04	0,09	0,14	0,18	0,23	0,27	0,31
8,0	0,00	0,04	0,09	0,14	0,18	0,23	0,27	0,31
8,5	0,00	0,04	0,09	0,14	0,19	0,23	0,28	0,31
9,0	0,00	0,04	0,09	0,14	0,19	0,23	0,28	0,32
9,5	0,00	0,05	0,09	0,14	0,19	0,24	0,28	0,32
10,0	0,00	0,05	0,09	0,14	0,19	0,24	0,28	0,32
10,5	0,00	0,05	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,33
11,0	0,00	0,05	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,33
11,5	0,00	0,05	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,33
12,0	0,00	0,05	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,34
12,5	0,00	0,05	0,09	0,14	0,20	0,25	0,30	0,34
13,0	0,00	0,05	0,09	0,15	0,20	0,25	0,30	0,34
13,5	0,00	0,05	0,09	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
14,0	0,00	0,05	0,09	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
14,5	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,31	0,35
15,0	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,31	0,35
Coeficiente ($M_x + M_y$) para $\lambda = -\phi / 8$								

**ANEXO C – Coeficientes M_q para $\lambda = -\phi/8$
(CONSOLI, 2008b, p. 25)**

D/R	VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ϕ)							
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
0,0	0,00	0,07	0,14	0,20	0,24	0,28	0,30	0,32
0,5	0,00	0,07	0,14	0,20	0,25	0,28	0,31	0,32
1,0	0,00	0,07	0,14	0,20	0,25	0,29	0,31	0,33
1,5	0,00	0,07	0,14	0,20	0,25	0,29	0,32	0,34
2,0	0,00	0,07	0,14	0,20	0,25	0,29	0,32	0,34
2,5	0,00	0,07	0,14	0,20	0,26	0,30	0,33	0,35
3,0	0,00	0,07	0,14	0,21	0,26	0,30	0,33	0,35
3,5	0,00	0,07	0,14	0,21	0,26	0,31	0,34	0,36
4,0	0,00	0,07	0,15	0,21	0,27	0,31	0,34	0,37
4,5	0,00	0,08	0,15	0,21	0,27	0,31	0,35	0,37
5,0	0,00	0,08	0,15	0,21	0,27	0,32	0,35	0,38
5,5	0,00	0,08	0,15	0,21	0,27	0,32	0,36	0,38
6,0	0,00	0,08	0,15	0,22	0,28	0,32	0,36	0,39
6,5	0,00	0,08	0,15	0,22	0,28	0,33	0,37	0,40
7,0	0,00	0,08	0,15	0,22	0,28	0,33	0,37	0,40
7,5	0,00	0,08	0,15	0,22	0,28	0,34	0,38	0,41
8,0	0,00	0,08	0,15	0,22	0,29	0,34	0,38	0,41
8,5	0,00	0,08	0,15	0,22	0,29	0,34	0,39	0,42
9,0	0,00	0,08	0,15	0,23	0,29	0,35	0,39	0,43
9,5	0,00	0,08	0,15	0,23	0,29	0,35	0,40	0,43
10,0	0,00	0,08	0,15	0,23	0,30	0,36	0,40	0,44
10,5	0,00	0,08	0,15	0,23	0,30	0,36	0,41	0,44
11,0	0,00	0,08	0,16	0,23	0,30	0,36	0,41	0,45
11,5	0,00	0,08	0,16	0,23	0,30	0,37	0,42	0,46
12,0	0,00	0,08	0,16	0,23	0,31	0,37	0,42	0,46
12,5	0,00	0,08	0,16	0,24	0,31	0,37	0,43	0,47
13,0	0,00	0,08	0,16	0,24	0,31	0,38	0,43	0,48
13,5	0,00	0,08	0,16	0,24	0,31	0,38	0,44	0,48
14,0	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,39	0,44	0,49
14,5	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,39	0,45	0,49
15,0	0,00	0,08	0,16	0,24	0,32	0,39	0,45	0,50
Coeficiente M_q para $\lambda = -\phi/8$								

**ANEXO D – Coeficientes M_c para $\lambda = -\phi/4$
(CONSOLI, 2008b, p. 30)**

D/R	VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ϕ)					
	10 ϕ	15 ϕ	20 ϕ	25 ϕ	30 ϕ	35 ϕ
0,0	0,93	0,88	0,83	0,77	0,71	0,64
0,2	0,93	0,89	0,84	0,78	0,71	0,65
0,4	0,94	0,89	0,84	0,79	0,72	0,66
0,6	0,94	0,90	0,85	0,79	0,73	0,67
0,8	0,95	0,90	0,86	0,80	0,74	0,68
1,0	0,95	0,91	0,86	0,81	0,75	0,69
1,2	0,95	0,91	0,87	0,82	0,76	0,70
1,4	0,96	0,92	0,88	0,83	0,77	0,71
1,6	0,96	0,93	0,89	0,84	0,78	0,72
1,8	0,97	0,93	0,89	0,84	0,79	0,73
2,0	0,97	0,94	0,90	0,85	0,80	0,74
2,2	0,97	0,95	0,91	0,86	0,81	0,75
2,4	0,98	0,95	0,92	0,87	0,82	0,76
2,6	0,98	0,96	0,92	0,88	0,83	0,77
2,8	0,99	0,96	0,93	0,89	0,84	0,78
3,0	0,99	0,97	0,94	0,90	0,84	0,79
3,2	0,99	0,97	0,94	0,90	0,85	0,80
3,4	1,00	0,98	0,95	0,91	0,86	0,81
3,6	1,00	0,99	0,96	0,92	0,87	0,81
3,8	1,01	0,99	0,97	0,93	0,88	0,82
4,0	1,01	1,00	0,97	0,94	0,89	0,83
4,2	1,01	1,00	0,98	0,95	0,90	0,84
4,4	1,02	1,01	0,99	0,95	0,91	0,85
4,6	1,02	1,01	0,99	0,96	0,92	0,86

Coeficiente M_c para $\lambda = -\phi/4$

**ANEXO E – Coeficientes ($M_\phi+M_\gamma$) para $\lambda = -\phi/4$
(CONSOLI, 2008b, p. 32)**

D/R	VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (θ)					
	10°	15°	20°	25°	30°	35°
0,0	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25	0,28
0,2	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25	0,28
0,4	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25	0,29
0,6	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25	0,29
0,8	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25	0,29
1,0	0,09	0,13	0,17	0,22	0,26	0,29
1,2	0,09	0,13	0,18	0,22	0,26	0,30
1,4	0,09	0,13	0,18	0,22	0,26	0,30
1,6	0,09	0,13	0,18	0,22	0,26	0,30
1,8	0,09	0,13	0,18	0,22	0,27	0,31
2,0	0,09	0,13	0,18	0,22	0,27	0,31
2,2	0,09	0,14	0,18	0,23	0,27	0,31
2,4	0,09	0,14	0,18	0,23	0,27	0,31
2,6	0,09	0,14	0,18	0,23	0,27	0,32
2,8	0,09	0,14	0,18	0,23	0,28	0,32
3,0	0,09	0,14	0,18	0,23	0,28	0,32
3,2	0,09	0,14	0,19	0,23	0,28	0,33
3,4	0,09	0,14	0,19	0,23	0,28	0,33
3,6	0,09	0,14	0,19	0,24	0,28	0,33
3,8	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,33
4,0	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,34
4,2	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,34
4,4	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,34
4,6	0,09	0,14	0,19	0,24	0,30	0,35

Coefficiente ($M_\phi + M_r$) para $\lambda = -\phi/4$

**ANEXO F – Coeficientes M_q para $\lambda = -\phi/4$
(CONSOLI, 2008b, p. 34)**

D/R	VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (°)					
	10°	15°	20°	25°	30°	35°
0,0	0,12	0,17	0,21	0,25	0,28	0,29
0,2	0,12	0,17	0,22	0,25	0,28	0,30
0,4	0,12	0,17	0,22	0,25	0,28	0,30
0,6	0,12	0,17	0,22	0,26	0,29	0,31
0,8	0,12	0,18	0,22	0,26	0,29	0,31
1,0	0,12	0,18	0,22	0,26	0,29	0,32
1,2	0,12	0,18	0,23	0,27	0,30	0,32
1,4	0,12	0,18	0,23	0,27	0,30	0,32
1,6	0,12	0,18	0,23	0,27	0,30	0,33
1,8	0,12	0,18	0,23	0,27	0,31	0,33
2,0	0,13	0,18	0,23	0,28	0,31	0,34
2,2	0,13	0,18	0,23	0,28	0,32	0,34
2,4	0,13	0,18	0,24	0,28	0,32	0,35
2,6	0,13	0,19	0,24	0,28	0,32	0,35
2,8	0,13	0,19	0,24	0,29	0,33	0,36
3,0	0,13	0,19	0,24	0,29	0,33	0,36
3,2	0,13	0,19	0,24	0,29	0,33	0,37
3,4	0,13	0,19	0,25	0,30	0,34	0,37
3,6	0,13	0,19	0,25	0,30	0,34	0,37
3,8	0,13	0,19	0,25	0,30	0,34	0,38
4,0	0,13	0,19	0,25	0,30	0,35	0,38
4,2	0,13	0,19	0,25	0,31	0,35	0,39
4,4	0,13	0,20	0,26	0,31	0,36	0,39
4,6	0,13	0,20	0,26	0,31	0,36	0,40

Coefficiente M_q para $\lambda = -\phi/4$

**ANEXO G – Coeficientes M para placas e sapatas não circulares
(CONSOLI, 2008b, p. 40)**

ϕ	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
M	12,6	11,0	9,8	8,8	8,0	7,3	6,6	6,0	5,4

Coeficiente M para placas e sapatas não circulares

**ANEXO H – Coeficientes M_c para $\lambda = -\phi/8$
(CONSOLI, 2008b, p. 21)**

<i>D/R</i>	VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ϕ)							
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
0.0	1.00	0.96	0.91	0.85	0.79	0.72	0.64	0.56
0.5	1.00	0.96	0.92	0.86	0.80	0.73	0.65	0.57
1.0	1.00	0.97	0.92	0.87	0.81	0.74	0.66	0.58
1.5	1.00	0.97	0.93	0.88	0.81	0.75	0.67	0.60
2.0	1.00	0.97	0.93	0.88	0.82	0.75	0.68	0.61
2.5	1.00	0.98	0.94	0.89	0.83	0.76	0.69	0.62
3.0	1.00	0.98	0.94	0.90	0.84	0.77	0.70	0.63
3.5	1.00	0.98	0.95	0.90	0.85	0.78	0.71	0.64
4.0	1.00	0.98	0.95	0.91	0.86	0.79	0.72	0.65
4.5	1.00	0.99	0.96	0.92	0.87	0.80	0.73	0.66
5.0	1.00	0.99	0.96	0.92	0.87	0.81	0.74	0.67
5.5	1.00	0.99	0.97	0.93	0.88	0.82	0.76	0.68
6.0	1.00	0.99	0.97	0.94	0.89	0.83	0.77	0.69
6.5	1.00	1.00	0.98	0.94	0.90	0.84	0.78	0.70
7.0	1.00	1.00	0.98	0.95	0.91	0.85	0.79	0.71
7.5	1.00	1.00	0.99	0.96	0.92	0.86	0.80	0.72
8.0	1.00	1.00	0.99	0.97	0.93	0.87	0.81	0.74
8.5	1.00	1.01	1.00	0.97	0.93	0.88	0.82	0.75
9.0	1.00	1.01	1.00	0.98	0.94	0.89	0.83	0.76
9.5	1.00	1.01	1.01	0.99	0.95	0.90	0.84	0.77
10.0	1.00	1.01	1.01	0.99	0.96	0.91	0.85	0.78
10.5	1.00	1.02	1.02	1.00	0.97	0.92	0.86	0.79
11.0	1.00	1.02	1.02	1.01	0.98	0.93	0.87	0.80
11.5	1.00	1.02	1.03	1.02	0.99	0.94	0.88	0.81
12.0	1.00	1.03	1.03	1.02	0.99	0.95	0.89	0.82
12.5	1.00	1.03	1.04	1.03	1.00	0.96	0.90	0.83
13.0	1.00	1.03	1.04	1.04	1.01	0.97	0.91	0.84
13.5	1.00	1.03	1.05	1.04	1.02	0.98	0.92	0.85
14.0	1.00	1.04	1.05	1.05	1.03	0.99	0.93	0.86
14.5	1.00	1.04	1.06	1.06	1.04	1.00	0.94	0.87
15.0	1.00	1.04	1.06	1.06	1.05	1.01	0.95	0.89
Coeficiente M_c para $\lambda = -\phi / 8$								

**ANEXO I – Coeficientes ($M_\phi + M_\gamma$) para $\lambda = \text{tg}^{-1} 0,2$
(CONSOLI, 2008b, p. 28)**

D/R	VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (θ)			
	0°	5°	10°	15°
0,0	0,00	0,04	0,08	0,11
0,2	0,00	0,04	0,08	0,11
0,4	0,00	0,04	0,07	0,10
0,6	0,00	0,04	0,07	0,10
0,8	0,00	0,04	0,07	0,10
1,0	0,00	0,04	0,07	0,10
1,2	0,00	0,04	0,07	0,10
1,4	0,00	0,04	0,07	0,10
1,6	0,00	0,04	0,07	0,10
1,8	0,00	0,04	0,07	0,09
2,0	0,00	0,03	0,07	0,09
2,2	0,00	0,03	0,07	0,09
2,4	0,00	0,03	0,06	0,09
2,6	0,00	0,03	0,06	0,09
2,8	0,00	0,03	0,06	0,09
3,0	0,00	0,03	0,06	0,09
3,2	0,00	0,03	0,06	0,08
3,4	0,00	0,03	0,06	0,08
3,6	0,00	0,03	0,06	0,08
3,8	0,00	0,03	0,06	0,08
4,0	0,00	0,03	0,06	0,08
4,2	0,00	0,03	0,05	0,08
4,4	0,00	0,03	0,05	0,08
4,6	0,00	0,03	0,05	0,07
4,8	0,00	0,03	0,05	0,07
5,0	0,00	0,03	0,05	0,07

Coeficiente ($M_\phi + M_\gamma$) para $\lambda = \pi/16 = \text{tg}^{-1}0,2$

**ANEXO J – Coeficientes M_q para $\lambda = \text{tg}^{-1} 0,2$
(CONSOLI, 2008b, p. 29)**

D/f	VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (θ)			
	0°	5°	10°	15°
0,0	0,20	0,27	0,32	0,37
0,2	0,19	0,26	0,31	0,36
0,4	0,19	0,26	0,31	0,35
0,6	0,19	0,25	0,30	0,34
0,8	0,18	0,25	0,30	0,34
1,0	0,18	0,24	0,29	0,33
1,2	0,18	0,24	0,29	0,32
1,4	0,17	0,23	0,28	0,31
1,6	0,17	0,23	0,27	0,31
1,8	0,16	0,22	0,27	0,30
2,0	0,16	0,21	0,26	0,29
2,2	0,16	0,21	0,25	0,29
2,4	0,15	0,20	0,25	0,28
2,6	0,15	0,20	0,24	0,27
2,8	0,14	0,19	0,23	0,26
3,0	0,14	0,19	0,23	0,26
3,2	0,14	0,18	0,22	0,25
3,4	0,13	0,18	0,21	0,24
3,6	0,13	0,17	0,21	0,23
3,8	0,12	0,17	0,20	0,23
4,0	0,12	0,16	0,20	0,22
4,2	0,12	0,16	0,19	0,21
4,4	0,11	0,15	0,18	0,21
4,6	0,11	0,15	0,18	0,20
4,8	0,10	0,14	0,17	0,19
5,0	0,10	0,13	0,16	0,18

Coefficiente M_g para $\lambda = \pi/16 = \text{tg}^{-1}0,2$