

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA EM AMBIENTE EXCEL PARA DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS E PROFUNDAS

Gabriela Maria Silva Maia

gabriela.maia@kroton.com.br

Faculdade Pitágoras Aracati

Rodovia CE-040, km 138, Bloco C, Campus da FVJ, 62800-000, Ceará/Aracati, Brasil

Duílio Assunção Marçal de Araújo

duilio@unifacex.edu.br

Centro Universitário Facex

Avenida Porto das Pedras, 4500, Neópolis, 59086-640, Rio Grande do Norte/Natal, Brasil

Ingrid Lourrany Barreto Freitas

ilourranybf@gmail.com

Universidade Federal Rural do Semi-Árido

Rua José Muniz da Silva, 138, 62900-000, Ceará/Russas. Brasil

Abstract. In the engineering, the realization of various activities count with the support of computational tools due to the demanded time and complexity. Considering the ease of access to Microsoft Excel Software, your disponible resources and simplified interface, it is shown as an efficient alternative for the development of those tools. Given the great alterability of the soil where is situated the foundation, the great challenge in the execution of projects is to ally safety and economy, optimizing costs and procedures. Thus, the present article has as objective the development of a tool in the Excel ambience to size and optimize deep and superficial foundations. The sizing is based on the Terzaghi method (1943) for the superficial foundations and in the Aoki-Velloso method (1975) for the deep foundations. Utilizing the VBA UserForms resource, for development in a practice way the graphic interface. The validation of the tool is verified from the results obtained by this one, for questions presents in base bibliography and in conformity with the vigent standards, showing as a free efficient alternative both professional as well pedagogically.

Keywords: Superficial foundation, Deep foundation. Excel, Optimization.

1 Introdução

Atualmente, para o desenvolvimento de qualquer projeto de engenharia utiliza-se o computador, que facilita o processo de elaboração deste através da utilização de ferramentas computacionais, que reduzem o tempo gasto na execução dessas tarefas e possibilita a resolução de problemas complexos, alguns dos quais tem solução manual inviável, o que permite uma análise mais apurada dos resultados obtidos e contribui para que se busque soluções mais eficientes; além disso, as ferramentas computacionais podem ser utilizadas no ambiente acadêmico para auxiliar no ensino e compreensão dos temas abordados em sala.

O Microsoft Excel é uma ferramenta útil e de fácil manuseio, utilizada para a análise de dados, criação de relatórios, além da execução de cálculos e geração de gráficos. Este possui um ambiente de programação, chamado de Visual Basic Editor, cuja linguagem de programação é VBA (Visual Basic for Applications) que possui recursos que contribuem para um melhor controle e domínio das funcionalidades do software. O VBA, por sua vez, é uma linguagem adaptada do Virtual Basic, que teve como base o antigo BASIC (Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code), uma linguagem criada nos anos 1960 com o objetivo de ensinar programação para estudantes universitários, mas que só se tornou amplamente conhecida quando a Microsoft criou o Virtual Basic para o Windows.

A construção civil é considerada uma atividade de alto risco e em virtude disso têm-se uma elevada exigência na execução de obras de engenharia. Uma edificação sólida depende principalmente de uma infraestrutura bem dimensionada que apresente elevada resistência e atenda aos critérios de qualidade e custo x benefício, e as fundações são parte determinante nisto.

De acordo com Velloso e Lopes [1], fundações são estruturas responsáveis por transmitir as cargas de uma construção ao solo. Assim sendo, tais estruturas devem apresentar resistência apropriada para suportar as tensões causadas pelos esforços solicitantes. As fundações se dividem em superficiais e profundas, onde a escolha do tipo de fundação mais adequado a uma construção é feita em função dos esforços solicitantes e das propriedades do solo.

Hodiernamente, existem ferramentas computacionais que efetuam esses cálculos e determinam a capacidade resistente de uma estaca. No entanto, estas se restringem apenas ao cálculo da capacidade de carga do elemento de fundação, não levando em consideração a otimização de suas dimensões nem as quantidades de materiais necessários à sua execução e seus respectivos custos. Por isso a importância de implementar tais variáveis para o cálculo completo de uma fundação, seja esta profunda ou superficial.

Portanto, a elaboração de ferramentas computacionais que permitam a otimização de fundações superficiais e profundas com garantia de um projeto seguro e economicamente viável, é de extrema importância no âmbito educacional como meio de subsidiar o aprendizado, e é este o objetivo deste trabalho.

2 Fundações

Para Das [2], a engenharia de fundações é a aplicação e a prática dos princípios fundamentais da mecânica dos solos no projeto de fundações. Estas incluem pilares de pontes, pilares e paredes de edifícios, aterros e outros. Abrangem ainda, a análise e o projeto de estruturas de contenção tais como cortina estacada, muros de arrimo, solo grampeado e outros. A engenharia de fundações é uma das áreas da geotecnia mais perceptíveis, uma vez que suas obras ocorrem em maior frequência e em escalas que variam desde obras de pequeno porte a obras de grande porte.

Silva [3] comenta que o projeto e a execução de uma fundação exigem pleno conhecimento do local e do solo onde a edificação será construída. As informações necessárias para identificação e classificação das diversas camadas que compõem o subsolo e proporcionam um bom entendimento do comportamento da fundação são obtidos durante a etapa de investigação geotécnica.

Tais informações são indispensáveis aos projetos de fundações, uma vez que influenciam

significativamente na escolha do tipo de fundação a ser adotada, cálculo das tensões admissíveis dos solos, dimensionamento da fundação por meio da estimativa da capacidade de carga de ruptura e da previsão de recalques, conforme afirma Andrzejewski [4].

No Brasil, os procedimentos de investigação geotécnica de campo mais utilizados são: o ensaio de cone (CPT - Cone Penetration Test) e a sondagem a percussão (SPT - Standard Penetration Test). Há ainda a sondagem mista que é utilizada situações onde exista a presença de obstáculos no subsolo.

Elementos de fundação são estruturas responsáveis por transmitir as cargas de uma construção ao solo. Segundo Beilfuss [5] a classificação de uma fundação está diretamente ligada à profundidade do solo resistente, isto é, onde a base desta se apoiará. Deste modo, entende-se que quanto mais rígido o solo de apoio, melhor será o desempenho da fundação. Uma fundação pode ser classificada em superficial ou profunda tal como representado pela Fig. 1.

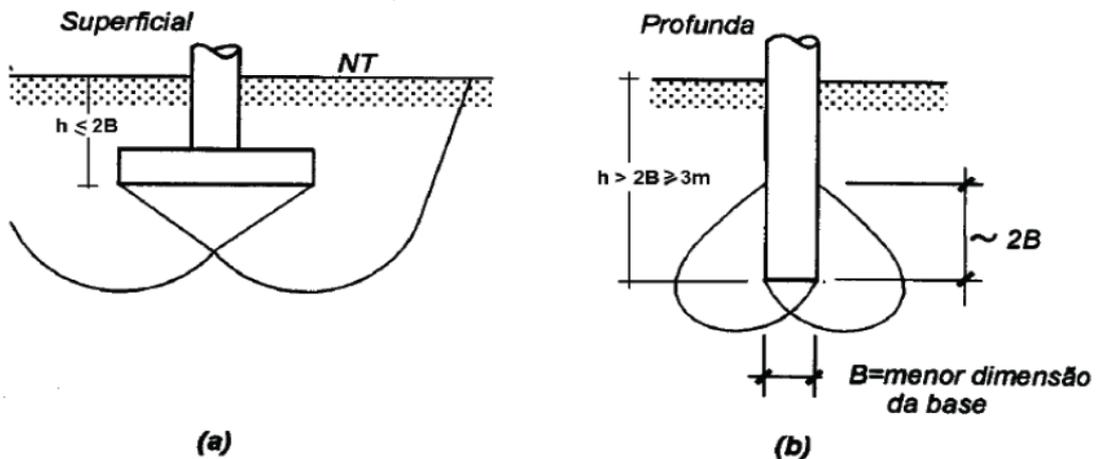


Figura 1. Fundação Superficial (a); Fundação Profunda (b).

2.1 Fundações superficiais

De acordo com a NBR 6122 [6], as fundações superficiais, também chamadas de fundações rasas ou fundações diretas, são elementos de fundação em que as cargas da estrutura são transmitidas para o terreno através das pressões distribuídas sob a base da fundação e que tem a profundidade de assentamento, em relação ao terreno, menor que duas vezes a sua menor dimensão.

Para Carvalho [7], as fundações superficiais dividem-se basicamente em sapatas e radieres, já a ABCP [8] classifica-as em: bloco, sapata, radier, grelha e viga de fundação, como mostra a Fig. 2.

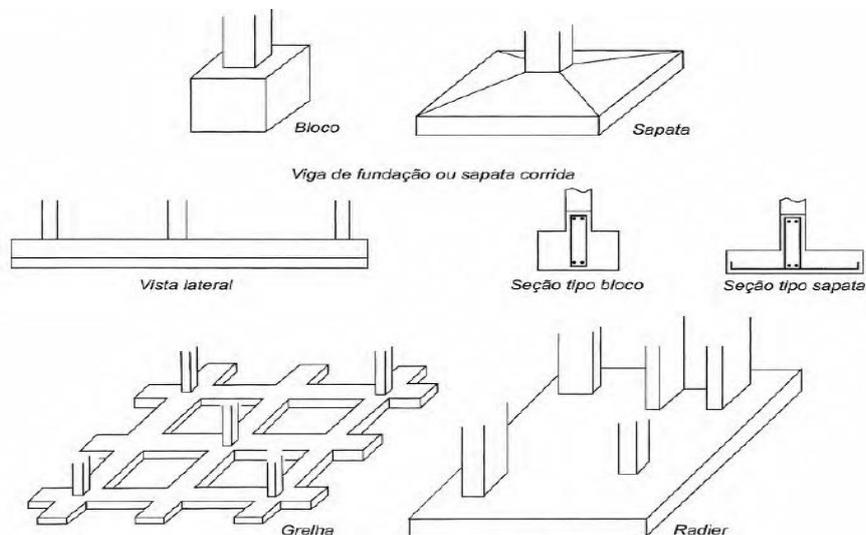


Figura 2. Tipos de fundações superficiais.

Entretanto, para efeito deste trabalho e da ferramenta desenvolvida, serão consideradas apenas as fundações superficiais do tipo sapatas, por serem um dos tipos mais utilizados na construção civil, sendo adequadas para situações em que o solo possui boa capacidade de carga, conforme Carvalho [7]. Para Das [2], as sapatas nada mais são do que uma extensão do pilar ou de paredes estruturais, que permitem que a carga proveniente da estrutura seja distribuída em uma área de solo maior em comparação com a área considerando apenas a estrutura da edificação.

Além disso, pode-se classificar as sapatas quanto à rigidez (sapatas rígidas ou flexíveis) e à posição (sapata isolada, sapata corrida, sapata associada, sapata com viga de equilíbrio).

Capacidade de carga da fundação superficial

Conforme Cintra e Aoki [9], a capacidade de carga de uma fundação superficial pode ser definida como a tensão que leva à ruptura do maciço geotécnico, ou seja, é a tensão máxima suportada pelo sistema sapata-solo e tem valor médio equivalente a:

$$\sigma = \frac{Q}{B * L} \quad (1)$$

O método escolhido para determinar a capacidade de carga de sapatas neste trabalho foi o método de Terzaghi, que foi o primeiro a propor uma equação teórica para isso e considera três hipóteses básicas:

1° - Será considerada uma sapata corrida, visando simplificar a problemática para um caso bidimensional. Para tanto, o comprimento L tem que ser maior ou igual a cinco (5) vezes a sua largura B ($L \geq 5 * B$).

2° - A profundidade de embutimento a qual a sapata se encontra deve ser menor ou igual a sua largura ($H \leq B$), o que permite com que a resistência ao cisalhamento da camada de solo acima da cota de apoio da base da sapata seja desprezada, substituindo por uma camada de peso específico γ e espessura H, resultando em uma sobrecarga:

$$q = \gamma * H \quad (2)$$

3° - O solo que se encontra abaixo da base da sapata é considerado como rígido e, por conseguinte, pouco deformável; o que caracteriza uma ruptura generalizada.

Assim, a equação proposta por Terzaghi para calcular a capacidade de carga, é:

$$q_u = c * N_c + q * N_q + \frac{1}{2} * \gamma * B * N_\gamma \quad (3)$$

Onde:

- q_u = capacidade de carga última do solo;
- N_c, N_q e N_γ = Fatores de capacidade de carga do solo;
- γ = peso específico do solo;
- B = largura da sapata;
- c = coesão do solo;
- q = sobrecarga.

Recalques

Conforme Cintra e Aoki [9], o recalque em uma sapata corresponde ao deslocamento vertical, para baixo, da base da sapata em relação, por exemplo, ao topo do solo, que é fixo e indeslocável, devido a deformações causadas por mudança de volume ou de solo entre a base e o meio fixo.

Considerando que o comportamento da curva que relaciona carga e recalque é linear para as tensões geralmente aplicadas às sapatas, pode-se utilizar a Teoria da Elasticidade Linear para determinar o recalque, como mostra a equação abaixo:

$$\rho_i = q_{méd} * B * \frac{1 - \nu^2}{E} * I_p * I_d \quad (4)$$

Onde:

$q_{méd}$ = Tensão média aplicada;

ν = Coeficiente de Poisson, que varia de acordo com o tipo de solo;

I_p = Fator de influência adimensional;

I_d = Fator de profundidade/embutimento.

2.2 Fundações profundas

Os tipos de fundações profundas mais usuais são as estacas e os tubulões. Conforme a NBR 6122 [6], o tubulão é um elemento de fundação profunda, escavado no terreno onde, pelo menos na sua etapa final, há descida de pessoas, necessária para executar o alargamento da base ou pelo menos a limpeza do fundo da escavação, uma vez que neste tipo de fundação as cargas são transmitidas principalmente pela ponta. A estaca, por sua vez, é um elemento de fundação profunda, executado por inteiro através de ferramentas, sem que haja em momento algum a descida de pessoas e é o modelo de fundação mais utilizado na construção civil brasileira, desde obras pequenas até grandes edifícios. Os principais tipos de estacas são mostrados na Tabela 1:

Tabela 1. Tipos de estacas.

Tipo de execução		Estacas
DESLOCAMENTO	GRANDE	(1) Madeira
		(2) Pré-moldadas de concreto
		(3) Tubos de aço de ponta fechada
		(4) Tipo Franki
		(5) Microestacas injetadas
	PEQUENO	(1) Perfis de aço
		(2) Tubos de aço de ponta aberta (desde que não haja embuchamento na cravação)
		(3) Estacas hélice especiais ("estacas hélice de deslocamento")
	SEM DESLOCAMENTO	(1) Escavadas com revestimento metálico perdido que avança à frente da escavação)
		(2) Estacas raiz
DE SUBSTITUIÇÃO	(1) Escavadas sem revestimento ou com uso de lama	
	(2) Tipo Strauss	
	(3) Estacas hélice contínua em geral	

Capacidade de carga da fundação profunda

De acordo com a NBR 6122 [6], a capacidade de carga de uma fundação profunda, é definida como a força aplicada sobre o elemento de fundação que provoca apenas os recalques que a construção pode suportar sem dificuldades, promovendo segurança satisfatória contra a ruptura do solo ou do elemento de fundação. A determinação da capacidade de carga de uma estaca isolada pode ser obtida por métodos estáticos, prova de carga e métodos dinâmicos.

Velloso e Lopes [1] destacam que os métodos estáticos podem ser classificados em três tipos:

métodos empíricos, semiempíricos e métodos racionais ou teóricos. Os métodos puramente empíricos determinam a capacidade de carga apenas pela classificação das camadas de solos cruzadas pelas fundações. Os métodos semiempíricos por sua vez, baseiam-se em correlações entre a capacidade de carga do elemento com resultados de ensaios “in situ” como o CPT e o SPT. E os métodos racionais ou teóricos utilizam soluções clássicas de capacidade de carga a partir de parâmetros do solo como ângulo de atrito e coesão.

Considerando o fato de que os métodos teóricos não apresentam resultados tão satisfatórios, a presente pesquisa trabalhará com maior enfoque nos métodos semiempíricos, os quais se destacam:

- Método Aoki-Velloso (1975): Velloso e Lopes [1] comentam que o desenvolvimento deste método se deu com base em estudos comparativos entre resultados obtidos de ensaios CPT e de ensaios SPT. Para tal, a estimativa da capacidade de carga de estacas é fundamentada no CPT, mas utiliza um fator K de conversão para estimar a capacidade de carga com os resultados do SPT. Este método pode ser utilizado tanto com dados de SPT como com dados de CPT.
- Método Décourt-Quaresma (1978): segundo Cabette [10], este método apresenta um processo para a estimativa da capacidade de carga com base exclusivamente nos resultados fornecidos por ensaios SPT. Além disso, o método objetiva estimativas bastante aproximadas, seguras e de fácil determinação.
- Método Teixeira (1996): de acordo com Cintra e Aoki [9], baseado na aplicação de vários métodos como Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e outros, Teixeira (1996) propõe uma equação unificada, também com base nos resultados de ensaios SPT, em função dos parâmetros α e β . O parâmetro α é relativo à resistência de ponta e tem seus valores tabelados em função do solo e do tipo de estaca. Já o parâmetro β é relativo à resistência de atrito lateral e tem seus valores tabelados em função do tipo de estaca, independentemente do tipo de solo.

Este trabalho utilizará procedimentos de cálculo baseados no Método Aoki-Velloso (1975), que será explanado a seguir.

Para o método Aoki-Velloso, a capacidade de carga de estacas é dada pela soma de duas parcelas: uma correspondente ao atrito lateral e a outra correspondente à resistência de ponta. Sendo R a capacidade de carga da estaca, RL a resistência de atrito lateral e Rp a resistência de ponta, temos:

$$R = RL + Rp \quad (5)$$

Assim,

$$RL = U \times \sum(rL \times \Delta L) \quad (6)$$

$$Rp = rp \times Ap \quad (7)$$

em que:

U = perímetro da seção transversal do fuste (m);

rL = tensão média de adesão ou de atrito lateral na camada de espessura ΔL (MPa);

rp = capacidade de carga do solo na cota de apoio da estaca (MPa);

Ap = área da seção transversal da ponta (m²).

As incógnitas rL e rp estão relacionadas com os ensaios de penetração estático (CPT) através dos valores da resistência de ponta e do atrito lateral. No entanto, como o CPT não é comumente empregado no Brasil, sendo o SPT mais empregado, foram propostas correlações entre a resistência da estaca e o NSPT:

$$rp = \frac{K \times Np}{F1} \quad (8)$$

$$rL = \frac{a \times K \times Np}{F2} \quad (9)$$

em que:

K = coeficiente de acordo com tipo do solo (Tabela 2);

- α = razão de atrito (Tabela 2);
 NP = índice de resistência à penetração (NSPT) na cota de apoio da ponta da estaca;
 NL = índice de resistência a penetração (NSPT) médio na camada de comprimento ΔL ao longo do fuste;
 F1 e F2 = fatores de correção (Tabela 3).

Tabela 2. Coeficiente K e razão de atrito α .

Solo	K(KN/m ²)	α (%)
Areia	1000	1,4
Areia siltosa	800	2,0
Areia siltoargilosa	700	2,4
Areia argilosa	600	3,0
Areia argilossiltosa	500	2,8
Silte	400	3,0
Silte arenoso	550	2,2
Silte arenoargiloso	450	2,8
Silte argiloso	230	3,4
Silte argiloarenoso	250	3,0
Argila	200	6,0
Argila arenosa	350	2,4
Argila arenossiltosa	300	2,8
Argila siltosa	220	4,0
Argila siltoarenosa	330	3,0

Tabela 3. Fatores de correção F1 e F2.

Tipo de Estaca	F1	F2
Franki	2,50	2F1
Metálica	1,75	2F1
Pré-moldada	$1 + D/0,80$	2F1
Escavada	3,0	2F1
Raiz, Hélice contínua e Ômega	2,0	2F1

Assim, a capacidade de carga de um elemento isolado de fundação por estaca proposta por Aoki-Velloso (1975) pode ser estimada pela fórmula semiempírica:

$$R_t = \left(\frac{K \times Np}{F_1} \right) \times A_p + \left[\left(\frac{U}{F_2} \right) \times \sum (\alpha \times K \times NL \times \Delta L) \right] \quad (10)$$

Para a obtenção da capacidade de carga admissível de uma estaca, R_{adm} , a NBR 6122 [6] estabelece a aplicação de um fator de resistência global ($FS = 2$) sobre a resistência total:

$$R_{adm} = \frac{R_t}{2} \quad (11)$$

Previsão de recalque

De acordo com Andrzejewski [4], o estudo de recalque de fundações, em especial por estacas, envolve premissas complexas, relacionadas ao estudo da interação entre estaca e solo e a necessidade de se verificar seu comportamento durante e após a fase de execução.

Cintra e Aoki [9] comentam que recalque é o deslocamento vertical para baixo da estaca em relação a um ponto fixo, decorrente do encurtamento elástico desta ou em consequência de deformações do maciço de solo compreendido entre a base da estaca e o ponto fixo. Assim, as estacas podem sofrer dois tipos de recalque:

- Recalque total: ocorre uniformemente em todos os pontos da fundação;
- Recalque diferencial: caracterizado pela ocorrência de deformações distintas nos pontos da fundação podendo causar danos à estrutura da edificação.

Nuernberg [11] comenta que, na prática, o valor máximo para recalques admissíveis e inadmissíveis é uma questão subjetiva, ficando a cargo do projetista definir seus valores com base na NBR 6122 [6], a qual estipula que tais valores limites devem considerar o tipo de solo, o tipo de fundação, a finalidade da obra, o tipo de estrutura e material utilizado, a segurança no qual os valores de deslocamentos aceitáveis podem ser estabelecidos, a velocidade dos recalques e movimentação de terra e a influência nas estruturas e edificações vizinhas.

A NBR 6122 [6] sugere ainda que a determinação da carga admissível de uma estaca pode ser feita a partir do estado limite de serviço, por meio de prova de carga e cálculos por métodos semiempíricos ou teóricos. Entre os métodos existentes para a estimativa de recalque em estacas destacam-se: métodos baseados na teoria da elasticidade, tais como Poulos e Davis (1980) e Randolph e Wroth (1978); métodos numéricos, tais como Aoki e Lopes (1985) e método dos elementos finitos; e método de previsão da curva carga-recalque.

Dentre os procedimentos para se estimar os recalques em estacas será utilizado neste trabalho o método Aoki e Lopes (1985), que estima o recalque do solo (ρ_s) através da Teoria da Elasticidade Linear:

$$\rho_s = \sum \frac{\Delta\sigma}{E_s} x H \quad (12)$$

onde E_s é o módulo de deformabilidade da camada de solo, cujo valor pode ser obtido pela expressão a seguir, adaptada de Janbu [12] apud Cintra e Aoki [9]:

$$E_s = E_o \left(\frac{\sigma_o + \Delta\sigma}{\sigma_o} \right)^n \quad (131)$$

onde, E_o é o módulo de deformabilidade do solo antes da execução da estaca, σ_o é a tensão geostática no centro da camada e n é o expoente que depende da natureza do solo.

3 Implementação computacional no Excel

Esta ferramenta desenvolvida neste trabalho tem seu foco no dimensionamento e otimização de fundações superficiais e profundas, cabendo ao usuário escolher o tipo para o seu estudo, e para a sua implementação foi escolhido o método de cálculo de Aoki-Velloso (1975), utilizando-se o ambiente de programação e processamento de cálculos do software Microsoft Excel (Excel), apresentado na Fig. 3.

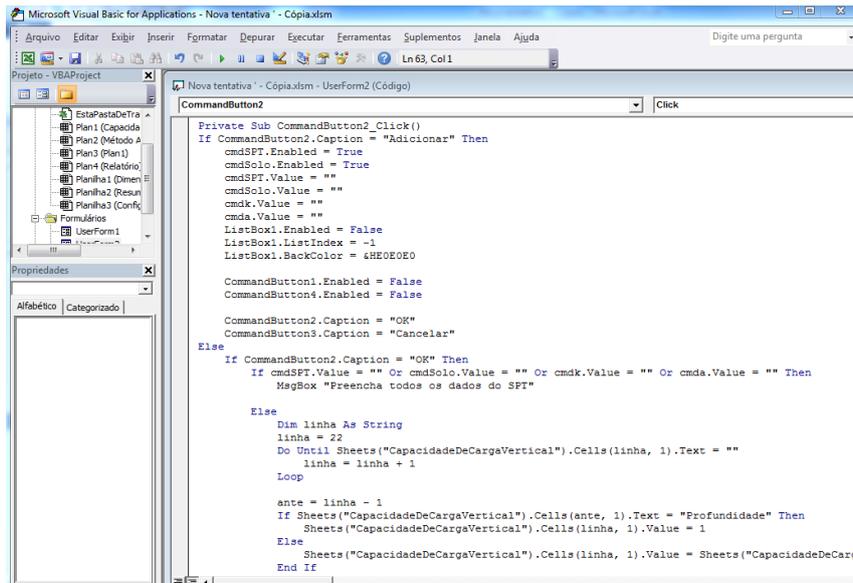


Figura 3. Ambiente de programação do MS Excel 2010.

Para a realização dos cálculos, alguns dados de entrada são essenciais para a previsão da capacidade de carga das estacas e otimização do seu custo final. São os dados de sondagens SPT, que para sua utilização, foram implementadas as características dos solos e seus respectivos NSPTs à biblioteca da ferramenta. Tais dados são automaticamente aplicados ao cálculo da previsão da capacidade de carga de acordo com a escolha do perfil de solo e seu respectivo NSPT, informados pelo usuário.

A definição dos custos de serviços e materiais necessários à execução da fundação é obtida a partir de um levantamento dos seus custos unitários para uma dada região em um certo período, obtidos através de consultas às tabelas de insumos e composições do SINAPI. A ferramenta desenvolvida utiliza-se dos valores unitários com o propósito de mostrar a variação do custo final de uma obra de fundação em relação ao projeto executado sem utilizá-la.

Ao abrir o software desenvolvido é mostrada a tela inicial na qual o usuário se depara com as opções de dados do solo, ilustração, propriedades de cálculo, resultados e orçamento como mostrado na Figura 4, para o caso de fundações profundas – a interface inicial para o dimensionamento e otimização de fundações superficiais segue o mesmo padrão.

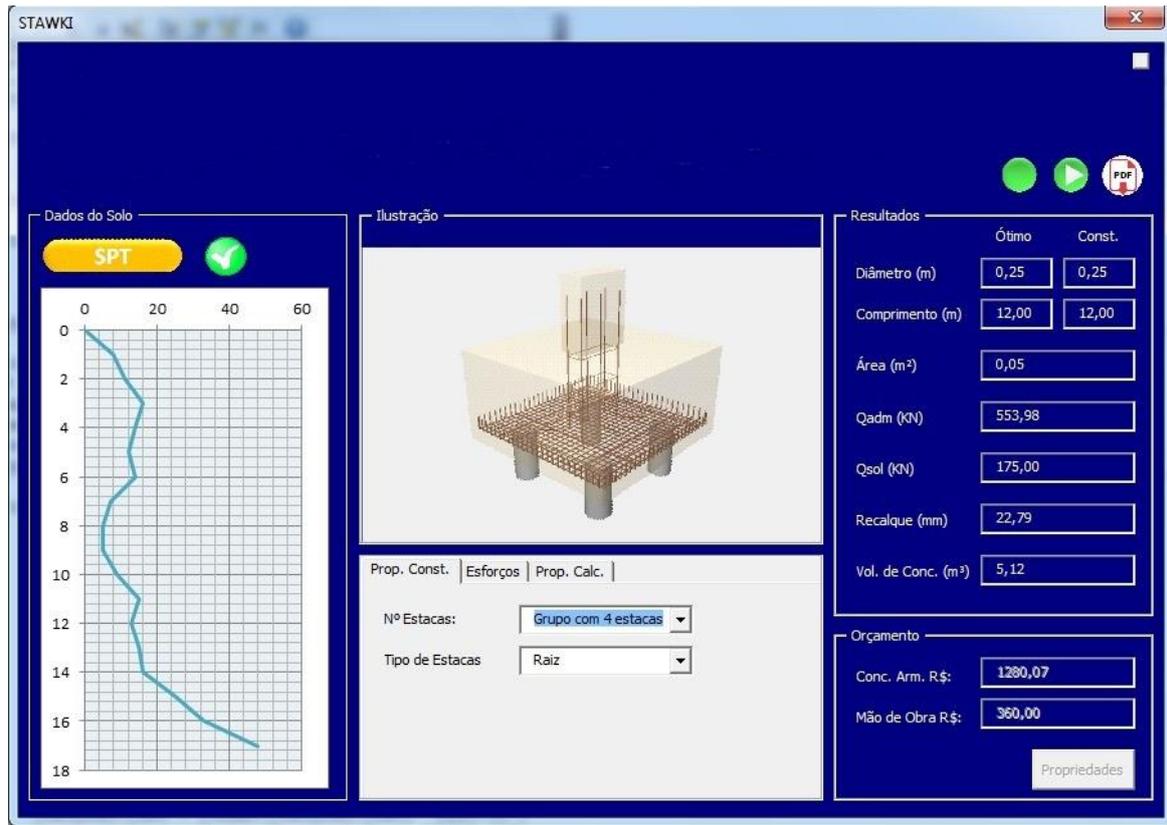


Figura 4. Tela inicial do software.

Na parte superior direita da tela inicial há 4 botões, como mostra a Fig. 5.



Figura 5. Região superior do software.

Sendo 1 o botão responsável pelo controle ao acesso das planilhas com bancos de dados – ao selecionar este botão, serão solicitados login e senha para ter acesso às planilhas para realizar possíveis alterações –; 2 o botão referente ao Status, que estando vermelho indica que o programa ainda não foi executado e quando verde indica que o cálculo já foi realizado; 3 o botão relativo ao Play, o qual executa o dimensionamento e a otimização; e 4 o botão responsável por gerar o relatório dos cálculos em formato PDF.

Além disso, à medida que o usuário seleciona o grupo de estacas, na tela inicial, é gerada a imagem referente ao grupo selecionado, o mesmo acontece na interface de fundações superficiais.

Após determinar as propriedades construtivas e o esforço solicitante, o usuário pode selecionar o botão de Play e assim obter os resultados para o dimensionamento e o orçamento como mostra a Fig. 6:



Figura 6. Abas Resultados e Orçamento.

Ao usuário ficam visíveis os valores ótimos e construtivos do diâmetro e do comprimento, além dos valores da área, do esforço admissível, esforço solicitante, recalque total da estaca e o volume de concreto necessário. Além disso, o usuário também tem acesso aos custos otimizados do concreto e da mão de obra, obtidos, conforme mencionado anteriormente, tendo como base os preços da região obtidos no SINAPI.

Como o funcionamento das interfaces de fundações superficiais e profundas é análogo, abaixo é ilustrado, através da Fig. 7, apenas o fluxograma do passo a passo a ser seguido pelo usuário para o cálculo de fundações profundas.

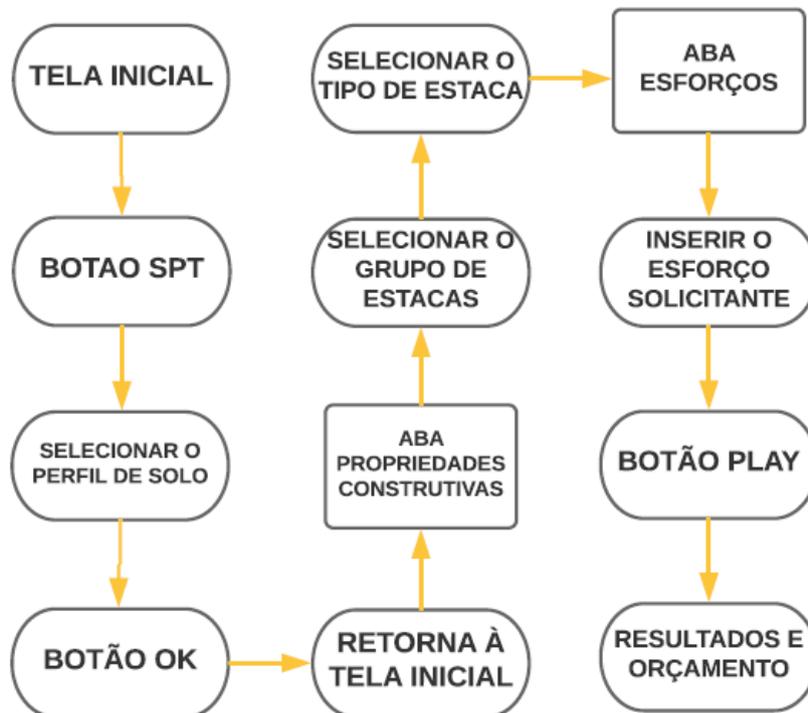


Figura 7. Fluxograma de utilização do software.

4 Aplicação numérica

A seguir é mostrado um exemplo, cuja resolução será feita de forma analítica e pelo programa desenvolvido, de forma a validar os resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida neste trabalho ao comparar os resultados encontrados pela resolução analítica e pelo software.

O problema aqui descrito foi adaptado do problema resolvido fornecido pelo livro Fundações por Estacas: projeto geotécnico / José Carlos A. Cintra, Nelson Aoki – São Paulo: Oficina de textos, 2010.

Descrição do problema

Calcular a capacidade de carga para um grupo de quatro estacas do tipo Strauss com diâmetro de 0,30m, com esforço solicitante de 750KN e comprimento de 13,00m escavadas em solo silte arenoso cuja sondagem NSPT = 15. Considere $M_x = 0$ KNm, $M_y = 0$ KNm e $FS = 2$.

Solução analítica:

De acordo com a Tabela 2 para um solo do tipo silte arenoso obtemos os valores de $K = 0,55$ MPa = 550 KN/m² e $\alpha = 2,2\%$. Pela Tabela 3, obtemos os valores de $F_1 = 4,2$ e $F_2 = 3,9$. De posse desses dados, do comprimento $L = 13,00$ m e do diâmetro $D = 0,30$ m podemos calcular o valor de R como descrito na equação (1).

Pelas equações (2) e (5) temos:

$$RL = \frac{0,022 \times 550 \times 15 \times \pi \times 0,30}{3,9} + RL_{ant} = 398,64$$

A tabela a seguir mostra todos os valores referentes aos RL das camadas anteriores:

Tabela 4. Valores de RL.

Profundidade	NSPT	RL (KN)
1	8	34,80
2	11	82,65
3	16	115,13
4	14	144,90
5	12	170,42
6	14	196,88
7	7	217,35
8	5	231,97
9	5	246,59
10	9	272,90
11	15	316,76
12	13	354,78
13	15	398,64

Logo, $RL = 398,64$ KN.

Para o cálculo de R_p , a partir das equações (3) e (4) temos:

$$R_p = \frac{550 \times 14 \times \pi \times \frac{0,30^2}{4}}{4,2}$$

Onde:

$$NP = \frac{13 + 15}{2} = 14$$

Assim $R_p = 129,59 \text{ KN}$ e seguindo a equação (1):

$$R = 398,64 + 129,59 = 528,23 \text{ KN}$$

Por fim, segundo a equação (7):

$$R_{adm} = \frac{528,23}{2} = 264,12 \text{ KN}$$

Para o cálculo da capacidade de carga do grupo de quatro estacas, utiliza-se a equação proposta Velloso e Lopes (2011), sendo $N=750\text{KN}$, $n=4$ estacas e considerando os valores de M_x e M_y como sendo 0 temos:

$$P_i = \frac{N}{n} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x_i^2} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y_i^2}$$

$$P = \frac{750}{4} \pm \frac{0 x_i}{\sum x_i^2} \pm \frac{0 y_i}{\sum y_i^2} = 187,50 \text{ KN}$$

Como $R_{adm} = 264,12 \text{ KN} > P = 187,50 \text{ KN}$, a fundação atende ao esforço solicitante.

Com isso podemos calcular o volume de concreto necessário para a execução da fundação, considerando-se o esquema mostrado na Fig. 8:

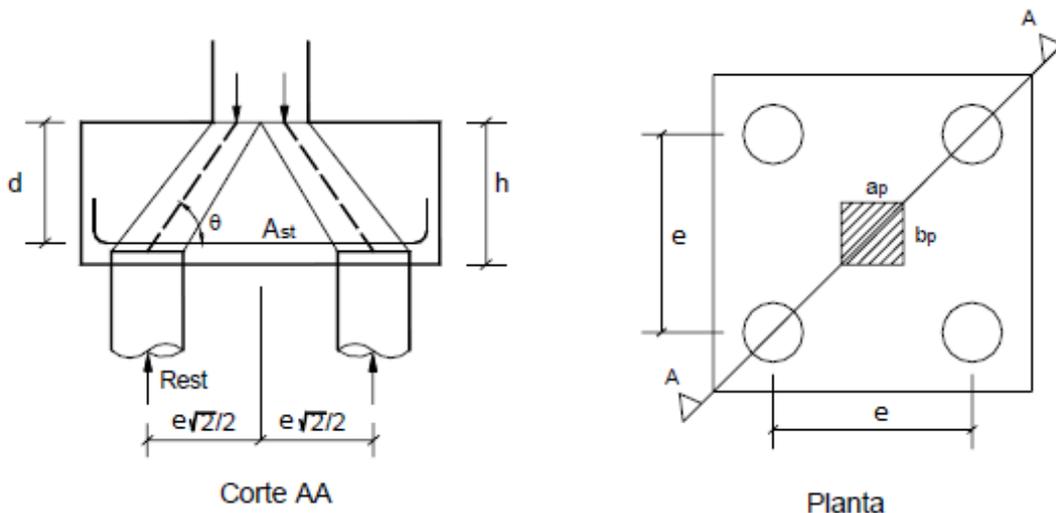


Figura 8. Esquema para o cálculo de boco sobre quatro estacas.

De acordo com Alva [13], para o dimensionamento dos blocos de fundação precisa-se conhecer respectivamente seus lados menor e maior, d e h . Para isso, temos:

$$e = D \times n^{\circ} \text{estacas} = 0,3 \times 4 = 1,2 \quad (20)$$

$$L_{menor} = (2 \times D) + e = (2 \times 0,30) + 1,2 = 1,8 \quad (11)$$

$$L_{maior} = (2 \times D) + e = (2 \times 0,30) + 1,2 = 1,8 \quad (12)$$

$$d \geq e \frac{\sqrt{2}}{2} = 1,2 \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,85 \quad (13)$$

$$h = d + 0,1 = 0,85 + 0,1 = 0,95 \quad (14)$$

E com isso podemos calcular o volume do bloco:

$$Vb = L_{menor} \times L_{maior} \times h \quad (15)$$

$$Vb = 1,8 \times 1,8 \times 0,95 = 3,08 m^3$$

Somado ao volume das estacas, temos:

$$Vt = 4x \left(13,00x\pi x \frac{0,30^2}{4} \right) + 3,08 = 6,76 m^3$$

Pela tabela do SINAPI referente aos insumos e composições do estado do Rio Grande do Norte, para a estaca Strauss, o concreto armado está a um valor de R\$408,31 por metro cúbico e a mão-de-obra está a um valor de R\$121,20 por metro a cada hora. Dessa forma o custo final para a fundação em questão é de R\$2.760,18 de concreto armado e R\$1.575,60 de mão-de-obra por hora, totalizando R\$4.335,78.

Solução pelo software:

Os dados foram inseridos no software e foi feita a execução da otimização, obtendo-se os resultados mostrados na tabela a seguir, na coluna “Software”, que também apresenta um comparativo entre os resultados obtidos pelos dois procedimentos:

	Análítico	Software
Radm (KN)	264,12	235,41
Rsol (KN)	187,50	187,50
Diâmetro (m)	0,30	0,25
Comprimento (m)	13,00	13,82
Área (m ²)	0,07	0,05
V. de concreto (m ³)	6,76	4,54
Concreto Armado (R\$)	2.760,18	1.853,73
Mão-de-obra (R\$)	1.575,60	1.678,62
Custo Total (R\$)	4.335,78	3.532,35

mes New Roman type from left margin, leaving 18 pt line spacing before and after.

5 Conclusões

Nesta pesquisa procurou-se efetuar o dimensionamento de fundações superficiais e profundas e calcular seu respectivo custo final otimizado, a partir do desenvolvimento de uma ferramenta computacional implementada em ambiente Microsoft Excel, o que permite o seu fácil acesso e utilização, já que o software Excel está atualmente presente em grande parte dos computadores e também disponível *online*.

Através de uma análise comparativa, observou-se que os resultados de verificação à segurança obtidos pelo programa são similares aos resultados obtidos analiticamente em exemplos retirados de literatura especializada e que os valores para o volume de concreto e custo final calculados pelo programa são inferiores, atestando assim seu bom desempenho. À vista disso, fica nítida a eficácia do método na otimização de fundações, uma vez que se atingem resultados aproximados para capacidade

de carga, garantindo que esta atenda com segurança aos esforços solicitantes, porém vinculados a custos menores.

Portanto obteve-se êxito nas metas propostas, já que a ferramenta proporcionou a obtenção de resultados coerentes, tornando simples, rápida e segura a otimização destas fundações, apresentando-se como alternativa eficaz e com potencial para auxiliar tanto no meio profissional – no desenvolvimento de projetos –, quanto no meio acadêmico – possibilitando uma melhor compreensão acerca do dimensionamento de fundações superficiais e profundas.

Referências

- [1] VELLOSO, D. A.; LOPES, F.R. *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas* – Volume único. -- São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- [2] DAS, B. M. *Princípios de engenharia de fundações*. São Paulo: Cengage Learning, 2016.
- [3] SILVA, L. M. F. R. *Análise comparativa entre fundação em estaca metálica e estaca raiz para o mesmo perfil geotécnico – Estudo de Caso*. Monografia - Universidade Federal do Piauí. Teresina. 2014.
- [4] ANDRZEJEWSKI, I. A. *Estudo e Dimensionamento de Fundação Profunda por Estacas tipo Raiz*. Monografia - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC. 2015.
- [5] BEILFUSS, T. *Estudo comparativo da fundação de um edifício modelo: Estaca X Tubulão*. Monografia - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí/RS. 2012.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Norma Técnica NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2010.
- [7] CARVALHO, Roberto Chust. *Cálculos e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: volume 2 / Roberto Chust Carvalho, Libânio Miranda Pinheiro*. – São Paulo : Pini, 2009.
- [8] ABCP. *Manual de Estruturas de Concreto*. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2003. 165 p.
- [9] CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- [10] CABETTE, J. F. *Análise dos métodos semi-empíricos utilizados para a estimativa da capacidade de carga de estacas pré-fabricadas com base em resultados de ensaios de carregamento dinâmico*. 2014. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- [11] NUERNBERG, M. F. *Dimensionamento de fundação profunda do tipo hélice contínua através de métodos semiempíricos*. Monografia – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- [12] JANBU, N. *Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests*. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING, 3., 1963, Weisbaden, Germany. Proceedings... Weisbaden, 1963. V. 1. P. 19-25.
- [13] ALVA, G. M. S. *Projeto estrutural de blocos sobre estacas*. 2007. Apostila – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.