

Software para pré-dimensionamento de sapatas isoladas

Diego Silva Gomes ^[1], Raphael Borges da Nobrega ^[2]

^[1] diegomes42@gmail.com ^[2] raphael.nobrega@ee.ufcg.edu.br. Universidade Federal de Campina Grande – Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental.

Resumo

A fundação é a parte da estrutura de uma edificação responsável por transferir as cargas para o solo. Dentre os elementos de fundação, as sapatas consistem em um tipo de fundação superficial, construída em concreto armado e que podem ser produzidas para apoiar somente um pilar (sapatas isoladas) ou mais de um pilar simultaneamente (sapatas corridas ou combinadas). O dimensionamento de uma sapata deve ser realizado de modo que a armadura possa combater as tensões de tração as quais a sapata será submetida. Para tanto, diversos métodos de dimensionamento podem ser utilizados e que devem atender às recomendações das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6118 e NBR 6122. Neste trabalho foi realizado o desenvolvimento de um *software* para pré-dimensionamento de sapatas isoladas empregando a linguagem de programação VBA. O *software* foi organizado em uma sequência de telas (janelas) que permitem ao usuário inserir informações necessárias para a realização dos cálculos, verificar o atendimento de critérios e obter os resultados do dimensionamento da sapata. No *software* foram implementados três métodos para a realização do dimensionamento de sapatas isoladas: método das bielas e tirantes e outros dois métodos baseados em critérios do CEB-70 e da ACI-318. Além disso, o *software* desenvolvido foi aplicado em um estudo de caso com o objetivo de evidenciar a aplicabilidade do programa e comparar os resultados entre os métodos de dimensionamento apresentados. O resultado do estudo de caso evidencia a aplicabilidade e eficiência do *software* empregando os três métodos. Ainda foi possível verificar que o método da ACI-318 resultou em uma menor quantidade de aço para o caso estudado, enquanto que o método da CEB-70 resultou em uma maior quantidade de aço.

Palavras-chave: Dimensionamento, Fundações, Sapatas isoladas, *Software*, VBA.

Abstract

Foundation is the part of the structure of a building that has the function to transfer the loads to the soil. Between the elements of foundation, footings are a type of shallow foundations constructed with reinforced concrete that can be produced to support one (isolated footings) or more than one pilar (combined footings). The design of a footing should be executed in a way that the reinforcement can resist of forces of traction. For this, a lot of designing methods can be used since then respect the recommendations of the Brazilian normative of the Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6118 e NBR 6122. In this work was executed the development of a software for predesigning isolated footings in foundations using the VBA programming language. The software was organized with a sequence of interfaces (windows) that permit to the user insert the necessary information to execute the calculations and verify the concordance with conditions and obtain the results of the footing designing. In the software was implemented three methods for designing of isolated footings, the strut and tie method and other two methods based on conditions of the CEB-70 and the ACI-318. Thus, the developed software was applied on a study case with the objective of evidence the correct performance of the program applying the three methods. So, with this was possible to verify that the ACI-318 results on a lower quantity of steel, in opposition the CEB-70 method results on a higher quantity of steel.

Keywords: Construction design, Foundations, Isolated Footings, *Software*, VBA.

1 Introdução

As fundações são as últimas peças em uma construção civil a receberem as solicitações mecânicas antes que ocorra a dissipação no maciço do solo abaixo da construção. Para isso, existem diversas formas e tipos de fundações com comportamentos adaptados para aproveitar eficientemente a condição do solo que servirá de base para a obra.

Basicamente, as fundações podem ser classificadas em dois grandes grupos: as fundações superficiais e as fundações profundas. A diferença está associada à profundidade em que a base é fixada em relação à construção (VELLOSO; LOPES, 1998).

As fundações superficiais são soluções muito versáteis pelo seu modo de construção quando comparada às fundações profundas e devido à grande abrangência de valores possíveis de capacidade de carga do solo (BOTELHO, 2016). Em geral, os recursos de fundações superficiais são divididos em três tipos: blocos, sapatas e radier. As sapatas se distinguem por serem elementos construídos em concreto armado e dimensionados de modo que a armadura possa combater as tensões de tração as quais a sapata será submetida (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). As sapatas podem ser produzidas para apoiar somente um pilar (sapatas isoladas) ou mais de um pilar simultaneamente (sapatas corridas ou combinadas).

No Brasil, os projetos de sapatas necessitam atender às condições mínimas especificadas em normas técnicas, como a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) que trata de estruturas de concreto armado e a NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) que aborda sobre projeto e execução de fundação. Para tanto, o dimensionamento deve considerar, dentre outras condições, as verificações para tensões de compressão diagonais, a aderência mínima da armadura, possibilidade de tombamento, deslizamento da sapata e o combate à punção para sapatas flexíveis (BASTOS, 2021). Assim, diversos métodos foram propostos na literatura e que podem ser empregados para realizar o dimensionamento de uma sapata. No caso de sapatas isoladas, por exemplo, é possível destacar o método das bielas e tirantes (BLÉVOT; FRÉMY, 1967) e outros dois métodos baseados em critérios do CEB-70 (COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON, 1970) e da ACI-318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2019).

Atualmente, o avanço tecnológico tem proporcionado a utilização de algoritmos e *softwares* computacionais para auxiliar no projeto e dimensionamento de sapatas, assim como, de outros elementos da construção civil. Desta forma, o usuário (profissional ou estudante) pode minimizar esforços na realização dos cálculos e verificações, tornando mais eficiente todo o processo para dimensionamento.

Nesse contexto, Wang e Kulhawy (2008) realizaram um estudo para otimização e economia em projetos de fundação utilizando o sistema de planilhas do Excel. No trabalho foram consideradas as condições necessárias para uma fundação que atendesse aos limites de utilização e serviço com custos menores. A planilha desenvolvida foi alimentada por dados dos componentes físicos, dimensões, custos e exigências para o projeto. A otimização foi realizada por meio da função *Solver* do Excel. Contudo, a planilha não possui interface gráfica e o artigo não se aprofundou no dimensionamento das peças de fundação, por focar mais nos custos.

Rosa (2019) também desenvolveu um *software* com intuito de calcular fundações superficiais de concreto armado atendendo critérios de dimensionamento definidos pelas normas EUROCODE. O programa foi desenvolvido na linguagem de programação *Python* e permite o cálculo de capacidade de carga do solo, dimensionamento da geometria da sapata e da armadura e verificações de deslizamento e punção. Além disso, a ferramenta disponibiliza ao usuário a opção de realizar a combinação de esforços advindos de um ou mais pilares calculando parâmetros da fundação para esforços centrados, excêntricos e momentos fletores.

O processo de dimensionamento por meio de métodos computacionais não isenta o profissional da necessidade de obter conhecimento sobre os métodos de cálculo, valores e o comportamento do objeto a ser dimensionado. Para cada situação existem características específicas que devem ser consideradas e que necessitam de uma análise crítica do profissional.

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um *software* com enfoque no dimensionamento de sapatas isoladas. O *software* foi desenvolvido empregando a linguagem de programação VBA aplicado ao Excel devido a grande difusão deste aplicativo da Microsoft em diversas análises e estudos nas áreas das ciências exatas e engenharias. Para realizar o dimensionamento de sapatas isoladas foram implementados três diferentes métodos de cálculo no

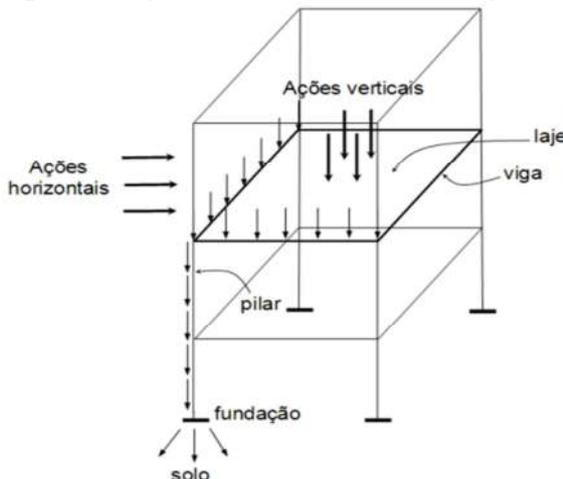
software: bielas e tirantes, assim como outros dois métodos baseados em critérios do CEB-70 e da ACI-318. Desta forma, o *software* desenvolvido dispõe de uma diversidade de opções para dimensionamento de sapatas isoladas, como também, pode ser utilizado como uma ferramenta no aperfeiçoamento do ensino e aprendizagem de estudantes da área de construção civil.

2 Fundações

As fundações são as peças responsáveis por transmitir as cargas vindas da estrutura (vigas e pilares, por exemplo) para o solo base da construção. O projeto de uma fundação depende das características da carga, da edificação e do solo (MIRZA; BRANT, 2009).

Em geral, a transmissão das ações ou cargas em uma edificação, quando aplicadas na laje, são sucessivamente suportadas pelas vigas, os pilares, as fundações e o solo, como mostrado na Figura 1. A parte da estrutura que está acima do solo é chamada superestrutura, enquanto a que está abaixo do solo pode ser chamada infraestrutura.

Figura 1 - Esquema estrutural de uma edificação



Fonte: Alva (2007)

Basicamente, as obras de fundação são compostas por duas partes: a parte estrutural (produzida pelo homem) e o solo, chamado também de “fundação natural” (RAO, 2011). As fundações são utilizadas desde a antiguidade para solucionar problemas onde o solo por si só não sustentaria uma edificação. Algumas técnicas como escavações com estacas de madeira na antiguidade e o uso de perfuração preenchidas com pedras pelos romanos evoluíram até o surgimento das estruturas modernas de fundação que suportam enormes edifícios. (NÁPOLES NETO, 1998)

Devido às particularidades de cada situação construtiva para um projeto de fundação torna-se necessário a observação de parâmetros como: condição do solo, localização, estabilidade da estrutura, nível da água no solo, necessidades do cliente e também as normativas (BOWLES, 1996; MIRZA; BRANT, 2009).

Atualmente, materiais como pedras, estacas de madeira e de aço são usados para solucionar problemas de fundação. No entanto, as fundações são mais comumente desenvolvidas em concreto armado, conforme ilustrado na Figura 2 (RAO, 2011).

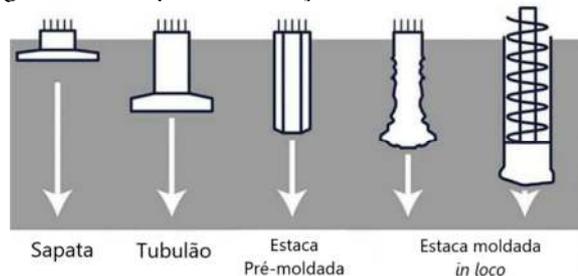
Figura 2 - Fundação executada em concreto armado



Fonte: Universidade Trisul (2021)

As fundações em concreto armado podem ser obtidas a partir de concreto pré-moldado (peças prontas inseridas no solo) ou moldadas diretamente na sua localização final. Na Figura 3 é possível observar alguns modelos de fundações em concreto armado.

Figura 3 - Exemplos de fundação em concreto armado



Fonte: OCP News (2021)

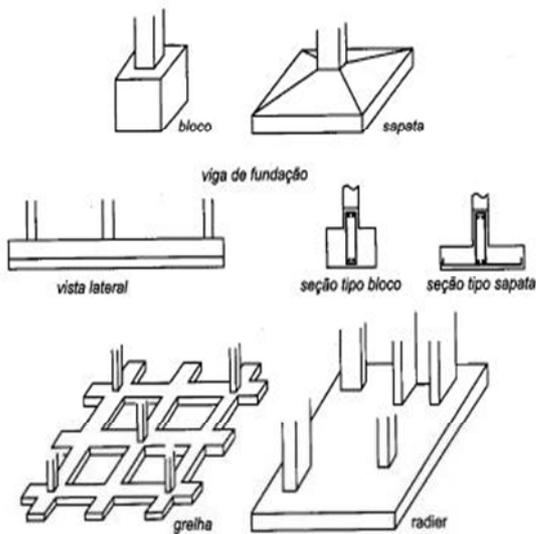
Em geral, as fundações são divididas em dois tipos considerando a profundidade de assentamento da base do elemento de fundação em questão: fundações superficiais (rasas) e fundações profundas (ALONSO, 2019; BOWLES, 1996; VELLOSO; LOPES, 1998). As fundações superficiais (ou rasas) consistem em fundações apoiadas logo abaixo da estrutura e que transmitem as cargas para o solo por meio de sua base (ALONSO, 2019). Já as fundações profundas são caracterizadas por sua base (ou ponta)

estar assentada em maiores profundidades e apresentarem fuste em sua forma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010).

As fundações superficiais costumam apresentar maiores esforços de flexão em comparação com as fundações profundas (RAO, 2011). Para que seja possível o uso de fundações superficiais é necessário uma análise geotécnica que indique se o solo suporta as cargas logo nas primeiras camadas. (REBELLO, 2008)

Quanto à forma, existem diversos tipos de fundações consideradas rasas, tais como: bloco, sapata, viga de fundação, grelha e radier. As formas de fundação superficial podem ser visualizadas na Figura 4.

Figura 4 - Formas de fundação superficial

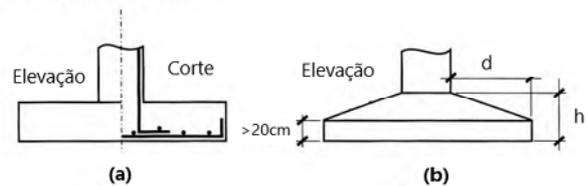


Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Dentre as fundações superficiais, as sapatas são peças construídas em concreto armado de modo a resistir principalmente aos esforços de flexão e apresenta altura reduzida comparada à altura dos blocos. Logo, o aço presente na base da sapata permite suportar cargas que excedam o limite de resistência à tração do concreto (TEIXEIRA; GODOY, 1998).

As fundações do tipo sapata podem ser representadas em planta com formatos variados da base, como: quadrados, retangulares, circulares, entre outros. Além disso, a altura da sapata (h) pode ser constante (Figura 5a) ou variável (Figura 5b). Uma sapata com altura variável ocasiona uma variação do momento fletor entre as faces da sapata e regiões próximas aos pilares. Conseqüentemente, é possível obter uma economia associada à quantidade de concreto utilizado (REBELLO, 2008).

Figura 5 – Sapatas de fundação, (a) altura constante (b) altura variável



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

A altura da sapata é usada como critério para classificá-la quanto a sua rigidez em dois tipos: rígida ou flexível. Sapatas rígidas são aquelas em que a ação da flexão é distribuída nas duas direções de forma uniforme e a ação do cisalhamento também é distribuída em duas direções, não havendo punção. Já nas sapatas flexíveis não é possível garantir a uniformidade e a ocorrência de punção. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014)

As sapatas também podem ser caracterizadas quanto a posição dos pilares em 2 tipos principais: sapatas isoladas ou corridas. A sapata isolada consiste em uma placa de concreto armado com dimensões em valores próximos uns aos outros, utilizada para suportar cargas concentradas como os pilares e as reações vindas das vigas baldrame (REBELLO, 2008). Já as sapatas corridas são elementos de concreto armado com uma dimensão pelo menos 5 vezes maior que a outra, utilizadas quando é necessário suportar cargas transmitidas de forma linear e uniformemente distribuídas (REBELLO, 2008; BASTOS, 2021).

As sapatas isoladas podem apresentar diversos formatos em planta sendo mais recorrentes as formas quadradas e retangulares (com uma das dimensões até 5 vezes maior que a outra) (TEIXEIRA; GODOY, 1998).

3 Dimensionamento de Sapatas Isoladas

Para a confecção dos projetos de fundação é necessário respeitar as normas de execução e desempenho determinadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). Já estruturalmente, elementos de concreto armado precisam respeitar considerações de cálculo e condições exigidas pela norma NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Na NBR 6122 são especificados procedimentos para a execução de ensaios de campo, valores básicos para fatores de segurança, cálculos para encontrar a tensão admissível do solo, dimensões e

profundidades mínimas. Ainda, esta norma descreve as etapas de produção e as características necessárias para que os elementos de fundação sejam fabricados corretamente.

A NBR 6118 trata de projeto e execução de estruturas em concreto armado, estabelecendo os critérios de dimensionamento necessários para as sapatas. A norma apresenta dimensões mínimas, coeficientes de majoração e minoração, critérios para armação em aço, ancoragem e verificação de segurança as quais as sapatas precisam atender.

Antes de realizar o dimensionamento é imprescindível a realização de ensaios de campo para obtenção da resposta do solo às solicitações da fundação. Dentre os ensaios, a realização de provas de carga por meio de placas permite estimar as tensões admissíveis em determinado solo. Os resultados são dispostos em forma de um gráfico tensão x deformação. Para fundações superficiais, a realização da prova de carga permite avaliar qual a maior pressão que pode ser aplicada ao solo sem que ele atinja a ruptura ou sofra recalques excessivos.

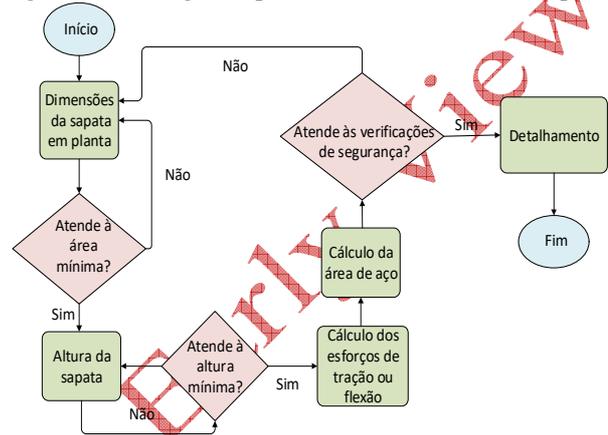
Para a realização do dimensionamento de fundações existem diversos métodos de cálculo em função do tipo, forma e posição. Para sapatas isoladas, o dimensionamento pode ser realizado a partir da aplicação de alguns métodos como: o Método das Bielas e Tirantes (BLÉVOT; FRÉMY, 1957) o método apresentado pelo CEB (COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON, 1970) e o método baseado na ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2019).

Geralmente, os métodos para dimensionamento de sapatas são empregados considerando os critérios dos “Balanços Iguais”. Esse critério torna o dimensionamento menos oneroso pois confere à obra projetada uma simetria entre os balanços (distância da face do pilar e a face da sapata projetada), resultando em taxas de armaduras semelhantes nas duas direções em planta (ALVA, 2007). No entanto, o critério dos balanços iguais pode não ser aplicável quando existirem elementos que limitem o formato da sapata, como construções vizinhas, por exemplo.

Basicamente, para a aplicação dos métodos de dimensionamento devem ser consideradas as etapas dispostas no fluxograma indicado na

Figura 6.

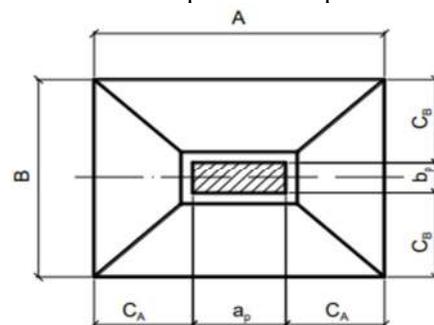
Figura 6 – Fluxograma para dimensionamento de sapatas



Fonte: Adaptado de Bastos (2021)

Figura 6, a primeira etapa consiste em determinar as dimensões da sapata em planta. Para tanto, a vista superior de uma sapata e suas dimensões podem ser visualizadas na Figura 7.

Figura 7 – Dimensões em planta das sapatas isoladas



Fonte: Bastos (2021)

Para determinar as dimensões mínimas da sapata, inicialmente é calculada a tensão na base da sapata (T_{adm}) provocada pela carga advinda do pilar (N_k). Em seguida, a área de superfície (S_{sap}) necessária

pra resistir a essa tensão é estimada considerando um coeficiente de majoração para o peso próprio da sapata (K_{maj}), conforme Equação 1.

$$Ssap = \frac{K_{maj} * Nk * 10}{Tadm} \quad (1)$$

A partir do valor estimado para a área de superfície da sapata e conhecendo as dimensões do pilar (a_p e b_p) é possível determinar as dimensões A e B da sapata, conforme Equações 2 e 3.

$$B = \frac{1}{2}(bp - ap) + \sqrt{\frac{1}{4}(bp - ap)^2 + Ssap} \quad (2)$$

$$A = B + ap - bp \quad (3)$$

As medidas dos balanços C_A e C_B podem ser determinadas por meios das Equações 4 e 5.

$$C_A = \frac{A - ap}{2} \quad (4)$$

$$C_B = \frac{B - bp}{2} \quad (5)$$

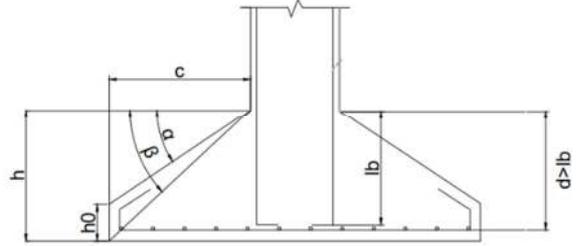
Uma vez determinadas as dimensões das sapatas, a próxima etapa do fluxograma mostrado na Figura 6 consiste em verificar se os valores obtidos atendem o critério de área mínima. A verificação é realizada pois os valores selecionados pelo projetista podem ser menores que os valores mínimos calculados na etapa anterior.

Após a verificação da área mínima da sapata, a etapa seguinte consiste em determinar a altura da sapata (h). Para tanto, a altura é estimada a partir da condição da Equação 6.

$$h \geq \frac{A - ap}{3} \quad (6)$$

A partir do valor selecionado para a altura da sapata é possível determinar a sua rigidez. A sapata será considerada rígida caso a Equação 6 seja verdadeira e flexível caso seja falsa, ambas situações são válidas caso atenda às verificações de segurança e altura mínima. Além disso, a altura da sapata também permite definir outros parâmetros como altura do batente (h_0), ângulos de inclinação (α e β) e altura útil (d). Na Figura 8 é possível visualizar uma vista frontal da sapata com os parâmetros indicados.

Figura 8 – Vista frontal de uma sapata



Fonte: Adaptado de Bastos (2021)

Para garantir uma altura mínima da sapata, deve-se levar em consideração o comprimento de ancoragem necessário para o aço (l_b). Para tanto, o valor de d deve ser maior que l_b .

As etapas para determinação das dimensões em planta e altura da sapata especificados no fluxograma da Figura 6 são comuns para todos os métodos abordados no trabalho. No entanto, as demais etapas são diferentes para cada método, pois cada um adota procedimentos e critérios diferentes para determinar o esforço que será necessário combater com o aço da sapata, o cálculo da área de aço e as verificações de segurança.

A seguir, são descritas as demais etapas do fluxograma da Figura 6 considerando os procedimentos empregados pelos métodos das Bielas e Tirantes, CEB-70 e ACI-318.

3.1 Método das bielas e tirantes

O método das bielas e tirantes é baseado nos estudos de Blévtot e Frémy (1967) que propuseram uma forma de analisar o comportamento das bielas e das tirantes, bem como apresentar formas de cálculo otimizado para blocos sobre estacas (THOMAZ; CARNEIRO, 2016).

Schlaich, em 1989, ao aprimorar o trabalho realizado por Blévtot e Frémy, analisou as proposições para cálculos de blocos e utilizou um modelo próximo ao comportamento de uma treliça, onde os esforços de compressão e tração são interligados (AGUIAR, 2018).

Para aplicação do método das bielas e tirantes no dimensionamento de sapatas isoladas, o cálculo dos esforços é feito por meio da determinação da tração (T_x e T_y) que a sapata é submetida em sua base nas direções paralelas às dimensões A e B, conforme Equações 7 e 8, onde d é a altura útil da sapata.

$$T_x = \frac{Nk(A - ap)}{8d} \quad (7)$$

$$T_y = \frac{Nk(B-bp)}{8d} \quad (8)$$

Após a determinação dos valores de tração na base da sapata, deve ser calculada a área de aço ($A_{s,A}$ e $A_{s,B}$) necessária para combater estas forças relacionando a tração na base da sapata majorada pela utilização de um fator de segurança (T_{xd} e T_{yd}) e a resistência do aço (f_{yd}). Para tanto, as áreas de aço são obtidas a partir das Equações 9 e 10.

$$A_{s,A} = \frac{T_{xd}}{f_{yd}} \quad (9)$$

$$A_{s,B} = \frac{T_{yd}}{f_{yd}} \quad (10)$$

Quanto às verificações de segurança, o método das bielas e tirantes necessita atender às condições de combate ao cisalhamento. Para tanto, o valor da tensão de cisalhamento solicitante (τ_{sd}) não pode ser superior ao valor da tensão de cisalhamento resistente (τ_{rd2}), conforme Equação 11. Os valores de τ_{sd} e τ_{rd2} podem ser determinados por meio das Equações 12 e 13.

$$\tau_{sd} \leq \tau_{rd2} \quad (11)$$

$$\tau_{sd} = \frac{Nd}{u_0 d} \quad (12)$$

$$\tau_{rd2} = 0,27\alpha_v f_{cd} \quad (13)$$

Em que μ_0 é o perímetro de contorno crítico (cm), α_v é coeficiente de efetividade do concreto (MPa), f_{cd} equivale a resistência de cálculo do concreto à compressão (MPa), N sendo a carga de cálculo do pilar (kN) e d representa a altura útil.

3.2 Método do CEB-70

O método do CEB-70 é baseado no boletim do CEB-FIP que consiste em um conjunto de recomendações do “Comitê Europeu do Concreto” para construções e projetos de estruturas de concreto (COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON, 1970; FIB INTERNATIONAL, 2020).

Para realizar o dimensionamento, o procedimento proposto pelo método consiste no cálculo dos esforços de flexão na sapata (SILVA, 1998). Para

tanto, os momentos fletores ($M_{1A,d}$ e $M_{1B,d}$) a uma determinada distância da face da sapata (X_A e X_B) e que atuam no eixo central são determinados conforme Equações 14 e 15.

$$M_{1A,d} = N_d \frac{x_A^2}{2} B \quad (14)$$

$$M_{1B,d} = N_d \frac{x_B^2}{2} A \quad (15)$$

Após determinar os momentos fletores, as áreas de aço $A_{s,A}$ e $A_{s,B}$ relativas as dimensões A e B, respectivamente, são obtidas conforme Equações 16 e 17.

$$A_{s,A} = \frac{M_{1A,d}}{0,85 \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (16)$$

$$A_{s,B} = \frac{M_{1B,d}}{0,85 \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (17)$$

Para verificar as condições de combate ao cisalhamento, o valor da tensão de cisalhamento resistente (τ_{rd1}) não pode ser superior ao valor da tensão de cisalhamento solicitante (τ_{sd}), conforme Equação 18.

$$\tau_{rd1} \leq \tau_{sd} \quad (18)$$

A tensão de cisalhamento solicitante (τ_{sd}) é determinada de forma similar ao método das bielas e tirantes, conforme Equação 12. No entanto, o valor da tensão de cisalhamento resistente (τ_{rd1}) é determinado por meio da Equação 19.

$$\tau_{rd1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \sqrt[3]{100 \rho f_{ck} \frac{2d}{Cb}} \quad (19)$$

Em que ρ é a menor taxa de armadura calculada; f_{ck} é a resistência à compressão do concreto (MPa).

3.3 Método da ACI-318

A norma americana ACI-318 especifica as condições mínimas de cálculo e projeto para estruturas de concreto, amparando legalmente as construções e projetos que sigam as atribuições nela demonstradas (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2019).

Considerando que esse trabalho contempla a execução segundo as normas da ABNT vigentes no Brasil, o método descrito na norma ACI-318 será usado de modo a não desrespeitar as normas da ABNT.

O dimensionamento realizado por meio da norma ACI-318 utiliza os esforços de flexão em uma face triangular da sapata. Os momentos fletores M_A e M_B referentes às dimensões A e B da sapata, respectivamente, podem ser determinados por meio das Equações 20 e 21.

$$M_A = \frac{N_d}{12} * (A - a_p) \quad (20)$$

$$M_B = \frac{N_d}{12} * (B - b_p) \quad (21)$$

O cálculo da área de aço e as verificações de segurança para esse método são similares ao método do CEB-70, mostrado na seção 3.2.

4 Visual basic for application (VBA)

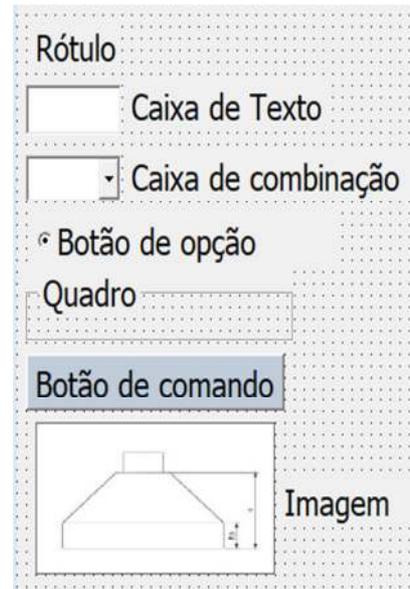
O *Office Visual Basic for Applications* (VBA) é uma linguagem de programação orientada a eventos que permite estender a aplicativos do *Office*. O VBA pode ser aplicado à automação e operação de tarefas repetitivas, além de ações como adicionar novas funcionalidades às aplicações (como o Excel) e personalizar a interação do usuário com o *software* (MICROSOFT, 2021).

A interface do VBA é constituída por elementos como os Formulários (*UserForms*), os Módulos e as Classes. Todos os elementos podem ser utilizados por meio do *Visual Basic for Application Editor* (VBAE) que consiste em uma parte do VBA que permite a edição, a configuração, a criação e os testes dos elementos presentes no Excel (BERTOLO, 2021).

As planilhas e Macros constituem uma base para a programação no VBAE. Os Macros permitem condensar uma ou mais ações em um só comando de modo que, ao acessá-lo, essas ações sejam executadas automaticamente (BERTOLO, 2021). Os macros podem ser escritos em código e gravados pela ferramenta “Gravar Macro”, localizado na aba “Desenvolvedor” do Excel.

Os macros podem auxiliar na construção do formulário a partir da gravação de ações que podem ser lidas e reestruturadas. Além disso, as ferramentas de elementos interativos do VBA podem ser utilizadas para a construção do formulário e acessadas por meio da opção “Caixa de Ferramentas” na interface do VBAE. Na Figura 9 é possível visualizar alguns elementos interativos disponíveis na caixa de ferramentas.

Figura 9 – Ilustrações das ferramentas

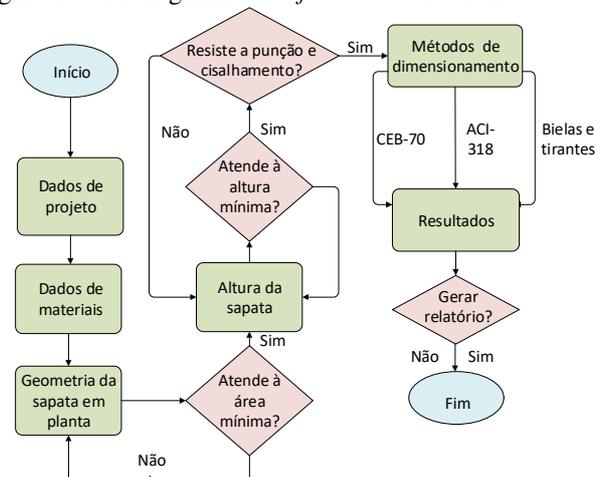


Fonte: Elaboração própria

5 Princípio de funcionamento do software

O programa foi desenvolvido de forma a permitir ao usuário um dimensionamento em etapas, por meio de interfaces gráficas diferentes a cada fase. O esquema de funcionamento do *software* é baseado nas etapas dispostas no fluxograma ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma da *software* desenvolvido



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 10, a primeira etapa consiste em inserir as informações de projeto como dimensões do pilar e a sua carga. Posteriormente, na próxima etapa, alguns dados dos materiais utilizados para a construção da sapata são informados, como resistência do aço e concreto, assim como o diâmetro (bitola) do aço.

Na terceira etapa são especificadas as dimensões da sapata em planta. As dimensões podem ser calculadas pelo *software*, conforme especificado na

seção 3, ou podem ser inseridas pelo usuário. Contudo, para o segundo caso, as dimensões informadas pelo usuário devem atender a uma condição de área mínima determinada a partir dos parâmetros informados.

Após selecionar as dimensões da sapata e verificar o atendimento da condição de área mínima, a próxima etapa consiste em determinar a altura da sapata. De forma similar às etapas anteriores, a altura da sapata pode ser calculada pelo *software* ou inserida pelo usuário, desde que a condição de altura mínima seja atendida.

Posteriormente, a próxima etapa consiste na verificação de segurança analisando se a sapata é resistente à punção e ao cisalhamento, conforme equações 11 e 18. Caso esta etapa não seja atendida, torna-se necessário inserir novos valores para a altura.

Caso as etapas anteriores tenham sido atendidas, o próximo passo consiste em selecionar o método de dimensionamento que será utilizado. Para tanto, três diferentes métodos são disponibilizados pelo *software*: bielas e tirantes, CEB-70 e ACI-318, conforme descritos na seção 3.

Após selecionar o método de cálculo, uma tela com os resultados do dimensionamento será disponibilizada e que permitirá ao usuário gerar um memorial de cálculo da sapata.

Para a verificação do funcionamento do *software* foi realizado um estudo de caso hipotético para o dimensionamento de uma sapata utilizando os valores mínimos calculados para cada método.

6 Estudo de caso

Para avaliar o funcionamento do *software* proposto neste trabalho foi considerado que a sapata a ser dimensionada deve suportar um pilar de 20 cm x 30 cm com carga de 1000 kN, tensão admissível do solo de 0,3 MPa e bitola do aço com 10 mm.

Após iniciar o *software*, foram preenchidos os campos da tela de dados de projeto indicado na Figura 11. Na etapa dos dados de projeto foram informadas as dimensões e carga do pilar, assim como a tensão admissível do solo.

Figura 11 – Estudo de caso: informações de projeto

Fonte: Elaboração própria

Posteriormente, na próxima janela, foram solicitados os valores dos coeficientes de segurança e de resistência do concreto e do aço, assim como, a espessura do concreto para recobrimento da armadura. Nesse caso, valores pré-definidos e baseados na norma NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) foram utilizados selecionando o botão “Valores Padrão”. A janela preenchida com as informações dos materiais pode ser visualizada na

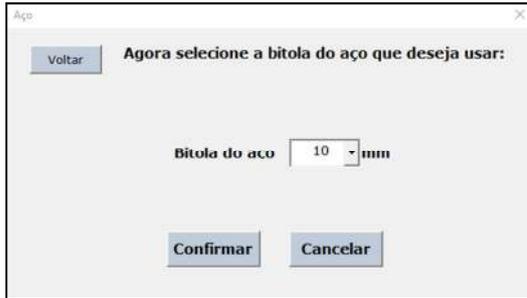
Figura 12.

Figura 12– Estudo de caso: informações de materiais

Fonte: Elaboração própria

A seção seguinte consiste na seleção do diâmetro (bitola) do aço a ser utilizado. Para tanto, foi selecionada a mesma bitola do pilar (10 mm), como mostrado na Figura 13.

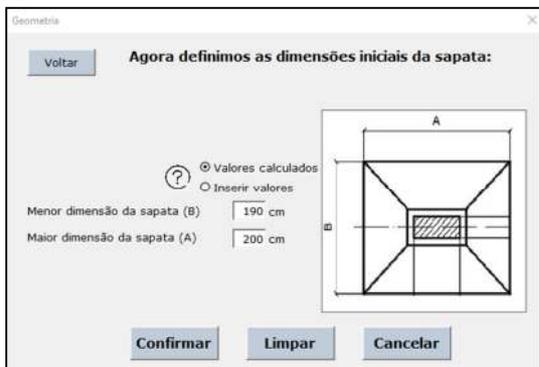
Figura 13– Estudo de caso: bitola do aço



Fonte: Elaboração própria

Posteriormente, na etapa seguinte foram solicitadas as dimensões da sapata. Nesse caso, os valores mínimos calculados pelo programa foram utilizados, conforme mostrado na Figura 14.

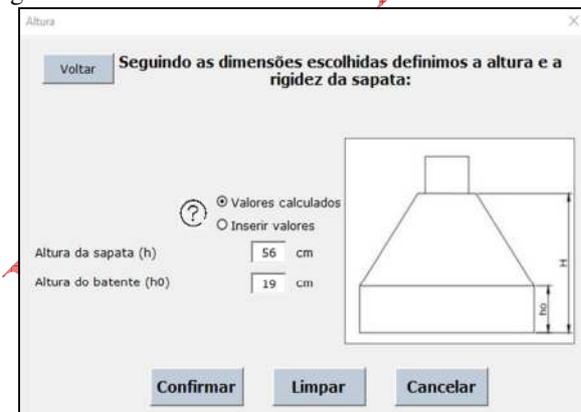
Figura 14– Estudo de caso: dimensões da sapata em planta



Fonte: Elaboração própria

Na próxima etapa, a altura da sapata e do batente foram selecionados considerando as dimensões mínimas calculadas pelo programa, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Estudo de caso: altura

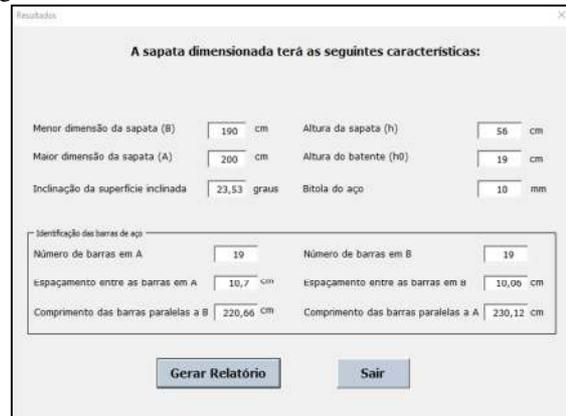


Fonte: Elaboração própria

Com as informações anteriores, o programa determinou que a sapata é considerada rígida. Com intuito de analisar os resultados, foi realizado o dimensionamento para cada um dos métodos. Os

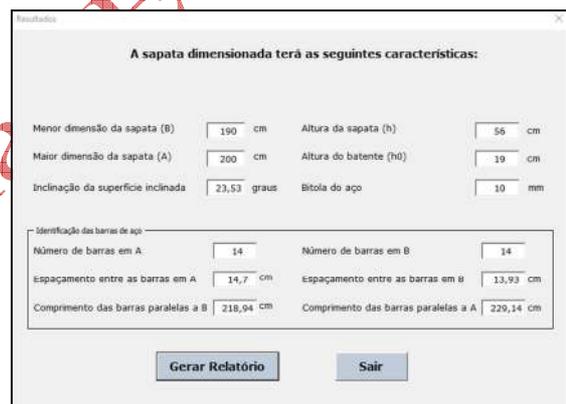
resultados do dimensionamento segundo os métodos CEB-70, ACI-318 e método de bielas e tirantes podem ser observados, respectivamente, nas Figuras 16 a 18.

Figura 16– Estudo de caso: método CEB-70



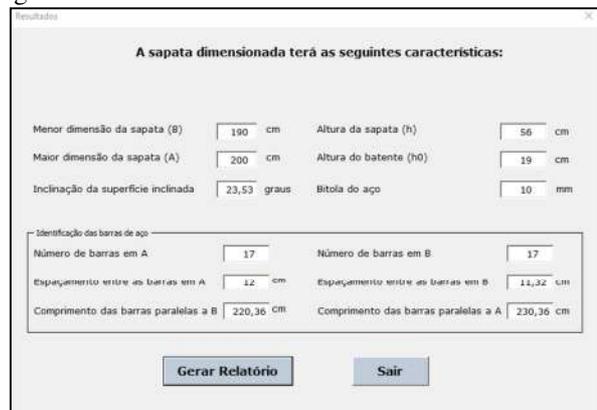
Fonte: Elaboração própria

Figura 17 – Estudo de caso: resultados ACI-318



Fonte: Elaboração própria

Figura 18 – Estudo de caso: resultados bielas e tirantes



Fonte: Elaboração própria

Os resultados apresentados para cada método foram obtidos considerando os valores mínimos calculados para as condições do estudo de caso. Em se tratando do número de barras para cada direção, o

método do CEB-70 resultou em 19 barras em ambas as direções, sendo o maior valor entre os métodos, como visto na Figura 16. A Elaboração própria

Figura 17 mostra os resultados do método da ACI-318 em que número de barras foi o menor entre os métodos analisados, com 14 barras de aço nas direções A e B. Para o método das bielas e tirantes o resultado foi de 17 barras para as duas direções, conforme observado na Figura 18, apresentado valor intermediário.

Em relação ao espaçamento entre as barras, observando a Figura 16 o resultado para o método CEB-70 foi o menor entre os três métodos, sendo de 10,7 cm para o lado A e 10,06 cm para o lado B. O método ACI-318 resultou nos maiores valores com 14,7 cm e 13,93 cm para as faces A e B, respectivamente, conforme a Elaboração própria

Figura 17. Já o método das bielas e tirantes também resultou em valores intermediários quanto ao espaçamento, sendo 12 cm para A e 11,31 cm para B, conforme mostrado na Figura 18.

Quanto ao comprimento das barras, o método do CEB-70 (Figura 16) resultou nos comprimentos de 220,66 cm para as barras paralelas a B e 230,12 cm para as barras paralelas a A. Para o método ACI-318 (Elaboração própria

Figura 17), os comprimentos foram de 218,94 cm e 229,14 cm para as barras paralelas a B e a A, respectivamente. Conforme apresentado na Figura 18, os valores de comprimento referentes ao método das bielas e tirantes foram de 220,36 cm para barras paralelas a A e 230,36 cm para barras paralelas a B. Desse modo, ao observarmos os valores de comprimento das barras, os valores foram muito próximos para os três métodos, sendo o mais discrepante o da ACI-318. No entanto, o método das bielas e tirantes foi o único que apresentou valores de comprimento de ancoragem iguais para ambas as direções no problema investigado.

7 Considerações finais

Nesse trabalho foi realizado o desenvolvimento de um *software* para auxiliar no dimensionamento de sapatas isoladas empregando a linguagem de programação VBA. O *software* permitiu aprofundar o conhecimento sobre a lógica de programação em VBA e do uso do Excel, além de ter se mostrado promissor e útil no âmbito acadêmico e profissional, pois agregou recursos voltados a resolução e análise de situações de dimensionamento, atendimento de normas específicas e por apresentar uma interface simplificada em que as informações são inseridas gradativamente, acrescentando clareza ao processo de dimensionamento.

O *software* desenvolvido forneceu um maior número de opções para a realização dos cálculos ao disponibilizar três diferentes métodos de dimensionamento, ficando a critério do usuário selecionar e analisar qual método será mais conveniente para cada situação analisada. Além disso, a utilização do *software* em um estudo de caso permitiu evidenciar a sua aplicabilidade e eficiência em problemas de cálculo de sapatas isoladas.

Como trabalhos futuros, o *software* pode ser aperfeiçoado a partir da inserção de outras condições de dimensionamento, como momento fletor aplicado na sapata, excentricidade do pilar e sapatas dimensionadas em diferentes formatos. Além disso, a realização de um estudo de sensibilidade dos parâmetros e a implementação de outros métodos para dimensionamento de sapatas no *software* poderão ser investigados, proporcionando maiores possibilidades de escolha para o cálculo.

8 Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building Code Requirements For Structural Concrete (ACI 318-19) And Commentary**. Farmington Hills: ACI, 2019.

AGUIAR, C. C. P. **Dimensionamento de Estruturas Especiais de Concreto Armado pelo Método de Bielas e Tirantes**. 2018. 129 f. Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

ALONSO, U. R. **Exercícios De Fundações**. 3.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2019.

ALVA, G. M. S. **Projeto Estrutural de Sapatas**. Santa Maria: UFSM, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

BASTOS, P. S. S. **Sapatas de Fundação**. Disponível em: <www.pf.feb.unesp.br/pbastos>. Acesso em: 10 mar. 2021.

BERTOLO, L. A. **Apostila: Lições de VBA do Excel**. Disponível em: <<http://www.bertolo.pro.br/FinEst/SemanaContabeis2007/MacroExcel.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2021.

BLEVOT, J.; FREMY, R. **Semelles sur Pieux. Annales de L'institut Technique du Bâtiment** et des Travaux Publics, Paris, v. 20, n. 230, p. 224-273, 1967.

BOTELHO, M. H. C. **Princípios da Mecânica dos Solos e Fundações para a Construção Civil**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2016.

BOWLES, L. E. **Foundation Analysis and Design**. 5.ed. Singapura: McGraw-hill, 1996.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON - CEB. **Recommandations Particulières au Calcul et a L'exécution des Semelles de Fondation**. Bulletin d'information n.73. (Paris): CEB, 1970

FIB INTERNATIONAL. **CEB-FIP International Recommendations for the Design and Construction of Concrete Structures: vol. 1**. Disponível em: <<https://www.fib-international.org/publications/ceb-bulletins/ceb-fip-international-reco-detail.html>>. Acesso em: 25 set. 2020.

MICROSOFT. **Referência do VBA do Office**. Disponível em: < <https://docs.microsoft.com/pt-br/office/vba/api/overview/>>. Acesso em: 06 mar. 2021.

MIRZA, S. A. and BRANT, W. Footing Design. In: SAATCIOGLU, M. **ACI Design Handbook: Design of Structural Reinforced Concrete Elements in Accordance with ACI 318-05**. Farmington Hills: American Concrete Institute - ACI, 2009, p. 189-204.

NÁPOLES NETO, A. D. F. História das fundações: uma breve história das fundações. In: HACHICH, W.; FALCONI, F.F.; SAES, J.L.; FROTA, R.G.Q.; CARVALHO, C.S.; NIYAMA, S. (Org.). **Fundações: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 17-33.

OCP NEWS. **Principais tipos de fundações**. Disponível em: <<https://ocp.news/colunista/arquitetura-eixo11/principais-tipos-de-fundacoes>>. Acesso em: 13 mar. 2021.

RAO, N. S. V. K. **Foundation Design: theory and practice**. 1.ed. Singapura: John Wiley & Sons, 2011.

REBELLO, Y. C. P. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. 4. ed. São Paulo: Zigurate, 2008.

ROSA, J. A. C. P. da. **Programa de Cálculo de Fundações Superficiais em Conformidade com os Eurocódigos 2 e 7**. 2019. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Aveiro, Aveiro, 2019.

SCHLAICH, J.; SCHAEFER, K. **Konstruieren im Stahlbetonbau**. 2.ed. Berlin: Beton-Kalender, 1998.

SILVA, E. L. **Análise dos Modelos Estruturais para Determinação dos Esforços Resistentes em Sapatas Isoladas**. 1998. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. de. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: FALCONI, FREDERICO F. et al (Ed.). **Fundações: Teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 227-264.

THOMAZ, E.; CARNEIRO, L. **Considerações sobre o Dimensionamento de Blocos sobre Estacas com o Uso do Método das Bielas e Tirantes**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 9., 2016, Rio de Janeiro. Proceedings [...] Rio de Janeiro: ABECE, 2016.

UNIVERSIDADE TRISUL. **Blocos de Fundações - Execução**. Disponível em: <<https://www.universidadetrisul.com.br/etapas-construtivas/execucao-de-blocos-de-fundacoes>>. Acesso em: 13 mar. 2021.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. Concepção de Obras de Fundações. In: FALCONI, F. F. et al (Ed.). **FUNDAÇÕES: Teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. Cap. 6. p. 211-226.

WANG, Y.; KULHAWY, F. H. **Economic Design Optimization of Foundations**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. v. 134, n. 8, p. 1097-1105, 2008.