

Determinação da envoltória de esforços resistentes de sapatas retangulares

Determination of the shear strength envelope of rectangular footings

Gustavo Rintzel Thomé (1); Ildo Sponholz, MSc (2)

(1) Engenheiro Civil - Autônomo

(2) Mestre Engenheiro Civil – SC Pisos Serviços LTDA
gustavorintzelthome@gmail.com | eng@scpisos.com.br

Resumo

O peso das construções e os carregamentos que estas suportam são necessariamente transmitidos ao solo. Essa transferência pode ser feita de diversas maneiras, com fundações rasas ou profundas. Dentre as fundações rasas, a sapata é a mais comum. As dimensões das sapatas variam em função da carga que elas estão submetidas e da capacidade resistente do solo. Determinada a dimensão da sapata em função da geotecnia, os esforços internos são resistidos em modelo análogo às vigas, sendo realizado o dimensionamento da armadura de flexão e a verificação à punção no concreto. Quando há momento aplicado na fundação, a maneira como as tensões de distribuem tanto no solo quanto no concreto são diferentes, portanto o parâmetro de resistência da fundação passa a não ser apenas a força resistente, mas sim a combinação da força axial com a tendência de giro (momento fletor). Este trabalho, baseado nos princípios da engenharia reversa, apresenta uma metodologia para a determinação da envoltória resistente de fundações rasas, bem como sua implementação em planilha eletrônica. O objetivo é simular situações de projetos em que o esforço a ser resistido pelas sapatas é alterado. Para gerar os diagramas de esforços resistentes, análogos aos dos pilares, discretizou-se a parte comprimida do solo em 500 camadas, para cada uma delas foi determinada a resultante em função da tensão admissível do solo. Variando em progressão aritmética, pode-se simular eventuais momentos aplicados às fundações simulação dos esforços resistentes. A razão da progressão varia em 10 diferentes taxas parametrizadas, sendo a primeira igual a zero (sapata sem momento aplicado) e a última igual à que igual à que a última camada tenha tensão nula. Além disso o ângulo da excentricidade varia de 15 em 15° no intervalo de zero a 90° (por serem sapatas retangulares, basta espelhar os diagramas para a envoltória de 360°). Para cada um dos 70 casos, 10 "inclinações" das tensões, e 7 ângulos perpendiculares às tensões, é determinado os esforços resistentes e então plotados no gráfico.

Palavra-Chave: Sapatas, Flexão composta, Fundações, Excel.

Abstract

The weight of buildings and the loads they support are necessarily transmitted to the ground. This transfer can be done in several ways, with shallow or deep foundations. Among shallow foundations, the footing is the most common. Footing dimensions vary depending on the load they are subjected to and the resistant capacity of the ground. Once the footing dimension is determined, the internal forces are resisted in a model similar to the beams, with the flexural reinforcement dimensioning and the verification of the punching in the concrete. When there is moment applied to the foundation, the way the stresses of distribution in both soil and concrete are different, so the parameter of resistance of the foundation becomes not only the resistant force, but the combination of the axial force with the tendency of whirl. This paper, based on the principles of reverse engineering, presents a methodology for determining the resistant envelope of shallow foundations, as well as its implementation in an electronic spreadsheet. In order to generate the resistant stress diagrams, analogous to those of the columns, the compressed part of the soil was discretized into 500 layers, for each one the resultant was determined according to the permissible soil tension. Varying in arithmetic progression, it is possible to simulate possible moments applied to the foundations simulation of resistant efforts. The tax for the progression varies in 10 different parameterized rates, the first being equal to zero (shoe without moment applied) and the last being equal to the maximum possible eccentricity. In addition, the angle of the eccentricity varies from 15 to 15 ° in the range from zero to 90 ° (as they are rectangular footing, it is enough to mirror the diagrams for the 360 ° envelope). For each of the 70 cases, 10 "slopes" of the stresses, and 7 angles perpendicular to the stresses, the resistance efforts are determined and then plotted on graphs analogous to the resistant column diagrams.

Keywords: Footing, Oblique bending, Foundation, Excel.

1. Introdução

A carga acidental que atua no prédio e que as normas estimam, o peso próprio da estrutura que resulta do projeto, tudo isso precisa ser transmitido ao terreno. (BOTELHO & MARCHETTI 2013).

Essa transferência pode ser feita de diversas maneiras, com fundações rasas ou profundas. Dentre as fundações rasas, a sapata é a mais comum. As dimensões das sapatas variam em função da carga que elas estão submetidas e da capacidade resistente do solo.

A maneira como estas cargas chegarão ao solo variam de edificação para edificação. Usualmente, o vínculo das fundações é considerado como rotulado, ou seja, sem que o solo tenha que resistir à esforços de momento fletor.

Para casos onde seja necessário transmitir momento ao solo, considerações especiais precisam ser feitas. É neste campo que se desenvolve este trabalho.

O presente artigo se desenvolveu através de pesquisa bibliográfica, sobretudo nos temas de geometria analítica, raciocínio lógico e programação em Excel, além dos fundamentos de geotécnica e concreto armado. Após a pesquisa, implementou-se em planilha eletrônica um modelo para determinar a envoltória resistente de sapatas retangulares, em função exclusivamente da capacidade resistente do solo e das dimensões do elemento de fundação.

A ferramenta desenvolvida permite simular situações de projeto em que o esforço na fundação do tipo sapata será alterado, permitindo responder questões como:

- a) Qual a máxima força que se pode aplicar na fundação sendo que esta estará necessariamente submetida a um determinado momento fletor?;
- b) A sapata irá resistir à nova combinação de esforços gerada por uma determinada obra de reforço e/ou acréscimo de área?

Para gerar os diagramas de esforços resistentes, análogos aos dos pilares, discretizou-se a parte comprimida do solo em 500 camadas, para cada uma delas foi determinada a resultante em função da tensão admissível.

Variando a tensão em progressão aritmética, pode-se simular os momentos aplicados às fundações. A razão da progressão varia em 10 diferentes taxas parametrizadas, sendo a primeira igual a zero (sapata sem momento aplicado) e a última igual à que a última camada tenha tensão nula. Além disso o ângulo da excentricidade varia de 15 em 15° no intervalo de zero a 90° (por serem sapatas retangulares, basta espelhar os diagramas para a envoltória de 360°). Para cada um dos 70 casos, 10 “inclinações” das tensões, e 7 ângulos perpendiculares às tensões, é determinado os esforços resistentes e então plotados em gráficos análogos aos diagramas resistentes de pilares.

2 Desenvolvimento

2.1 Fundamentos básicos do dimensionamento de sapatas

Conforme as definições da ABNT NBR 6122:2019, uma sapata é “*elemento de fundação rasa, de concreto armado, dimensionado de modo que as tensões de tração nele resultantes sejam resistidas pelo emprego de armadura especialmente disposta para este fim.*” E com relação a fundações rasas: “*elemento de fundação cuja base está assentada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação, recebendo aí as tensões distribuídas e equilibram a carga aplicada; para esta definição adota-se a menor profundidade, caso esta não seja constante em todo o perímetro da fundação.*”

Conforme Bastos (2019), o projeto da sapata isolada tem as seguintes fases: estimativa das dimensões da sapata, dimensionamento da armadura de flexão, e as verificações: das tensões de compressão diagonais da punção, da aderência da armadura de flexão e do equilíbrio referente ao tombamento e deslizamento.

Como este trabalho parte das premissas da engenharia reversa, não serão abordados tópicos a respeito da estimativa das dimensões, mas sim a capacidade resistente em função da geometria já existente.

2.2 Processo de cálculo

O cálculo adotado no desenvolvimento da planilha é bastante simples, envolve principalmente questões de geometria, sobretudo para a discretização da seção de contato entre a sapata e o solo.

Em um plano cartesiano, cada camada possui um centro de gravidade, e a distância deste para o centro do elemento de fundação será a alavanca para o cálculo do momento fletor tanto no eixo X como no eixo Y. O centro da sapata é definido em função das dimensões do elemento.

Foi arbitrado que a maior dimensão da sapata será denominada “A” e a menor “B”, a dimensão “A” é paralela ao eixo X.

A subdivisão das camadas é feita para diferentes angulações, variando no intervalo de 15 em 15 graus, ou seja, 0; 15; 30; 45; 60; 75 e 90.

As Figuras 1 e 2 apresentam a convenção adotada:

0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
						
						

Figura 1 – Discretização para diferentes ângulos (Autores)

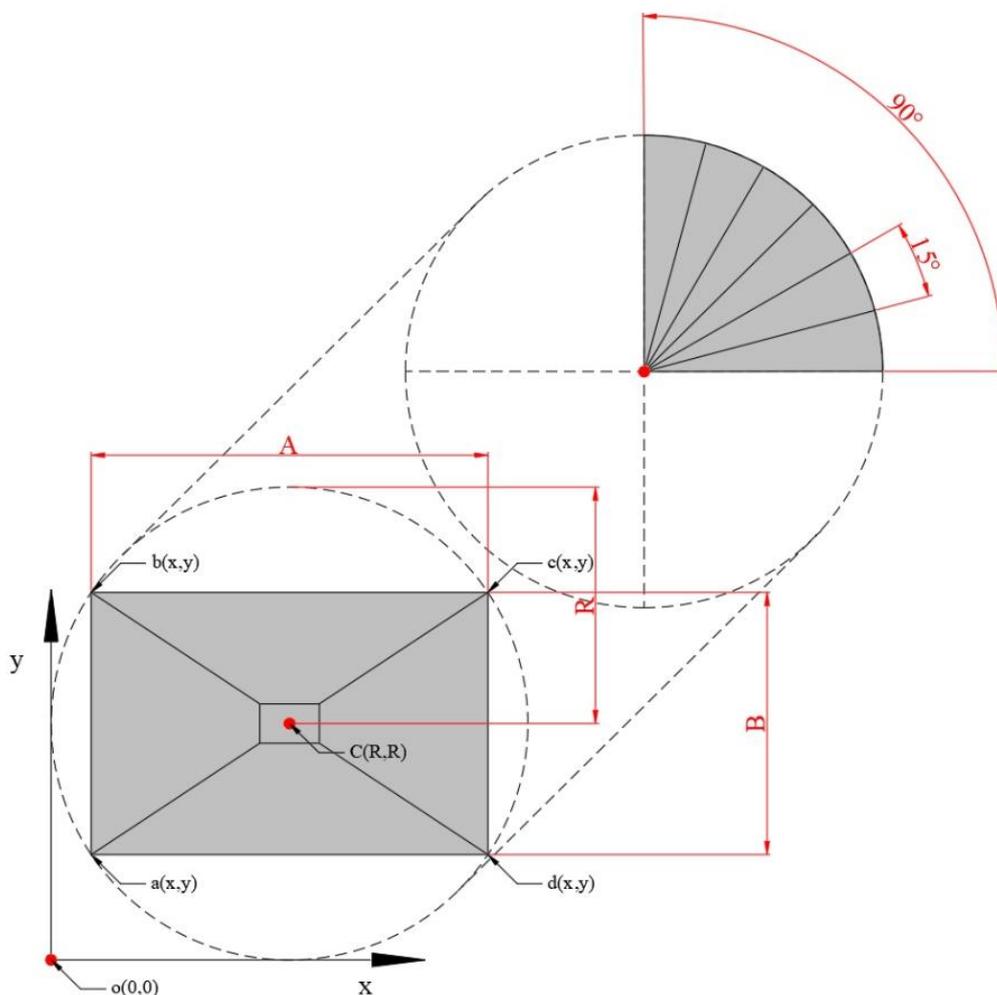


Figura 2 – Plano cartesiano e pontos em coordenadas em função das dimensões da sapata (Autores)

Na Figura 1 é possível perceber a equivalência entre rotacionar as camadas de maneira isolada ou a sapata como um todo. As larguras das camadas variam em função da angulação, assim como seu comprimento. Para determinar o comprimento, utiliza-se as coordenadas de início e fim de cada camada, que quando multiplicado pela largura, resulta na área. Por sua vez, a área multiplicada pela tensão atuante resulta na força resistida.

Como citado anteriormente, a distância entre o centro de gravidade da camada para o centro da sapata, será a alavanca, que multiplicada pela resultante dará a contribuição de momento de cada camada separadamente. A somatória destes pequenos momentos resultará na envoltória resistente total.

As tensões, variam em dez diferentes cenários, sendo o caso 1, onde a tensão é igual a máxima em todas as camadas, e o caso 10 onde apenas uma camada possui a tensão máxima e apenas uma a mínima, os cenários de 2 a 9 são intermediários. A Figura 3 exemplifica:

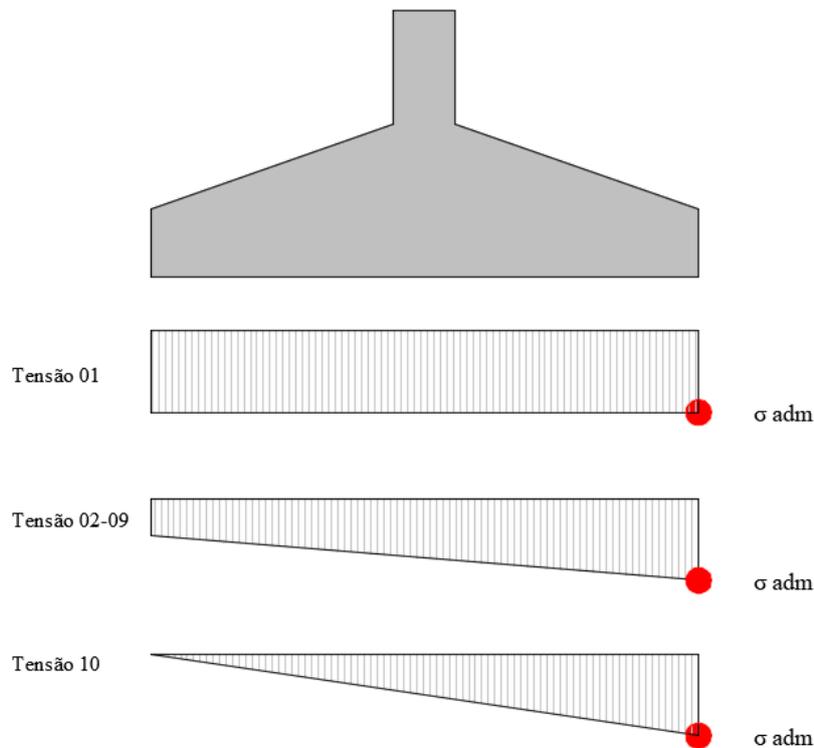


Figura 3 – Diferentes casos de tensões (Autores)

O total de cenários é 70, sendo este o resultado de 10 diferentes taxas de variação das tensões multiplicado por 7 angulações diferentes. Cada um destes cenários representa uma tríade de esforços resistentes (M_x , M_y e N_z).

Estes 70 pontos formam um quadrante no plano cartesiano. Como as sapatas retangulares são bissimétricas, basta espelhar os diagramas para a envoltória completa de 360 graus. Optou-se por este espelhamento pois ainda que as sapatas sejam simétricas, os carregamentos podem não ser, assim fica mais fácil a comparação dos esforços resistentes com os solicitantes.

2.3 Apresentação da planilha

A ideia é que a planilha seja uma ferramenta de uso fácil e intuitivo: com apenas três dados de entrada, lado A, lado B e tensão admissível do solo, o processo de geração do diagrama resistente já é realizado. A Figura 4 apresenta a interface desenvolvida:

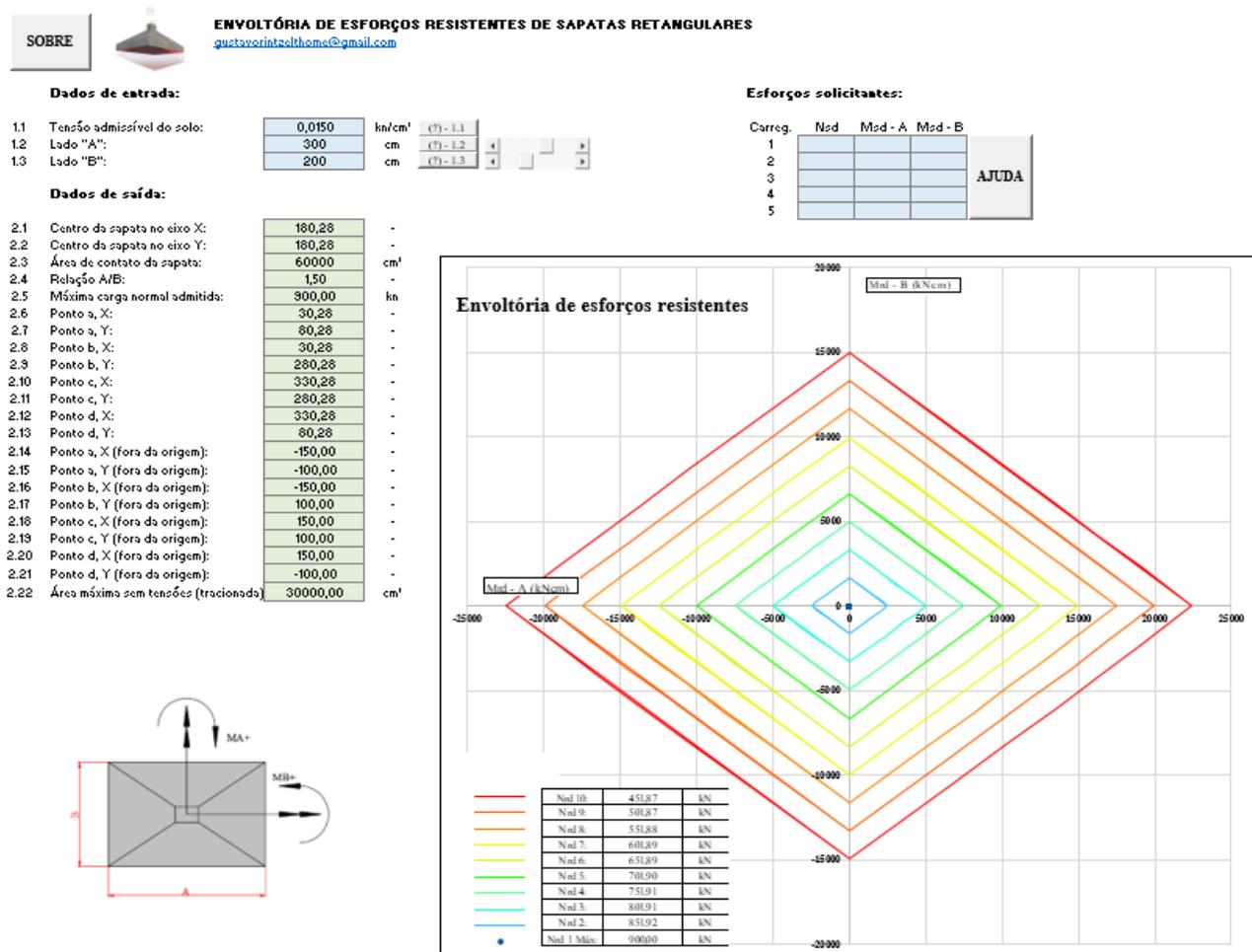


Figura 4 – Interface do usuário (Autores)

As células em azul representam os campos de entrada. Em verde alguns dos cálculos realizados. No canto superior direito há um local para inserir os esforços solicitantes, e assim verificar se estão inseridos dentro da envoltória resistente. No canto inferior esquerdo a convenção de sinais.

As linhas em vermelho, representam o caso “10” da inclinação das tensões, é onde há mais momento fletor e menos força axial. Especificamente neste caso (sapatas retangulares, e uma só camada com a máxima tensão e uma só camada com tensão nula) a força axial resistente é aproximadamente igual a metade do caso “1” que é onde não há momento aplicado e é representado por um ponto azul escuro no diagrama.

Observações: Neste trabalho não se admite mais de uma camada com força nula, assim como a majoração da máxima tensão na flexão composta é desprezada. Pode-se considerar a favor da segurança apesar do motivo ser a simplificação nos cálculos.

2.4 Breves noções sobre o desenvolvimento no Excel

Embora a programação em si não seja o objetivo deste artigo, é interessante compartilhar pontos chave que permitiram a elaboração da ferramenta. Um dos pontos que vale mencionar é a maneira de como foi determinada os vértices de cada camada. Em função do ângulo de inclinação, poderiam ocorrer quatro diferentes casos conforme ilustrado na Figura 5:

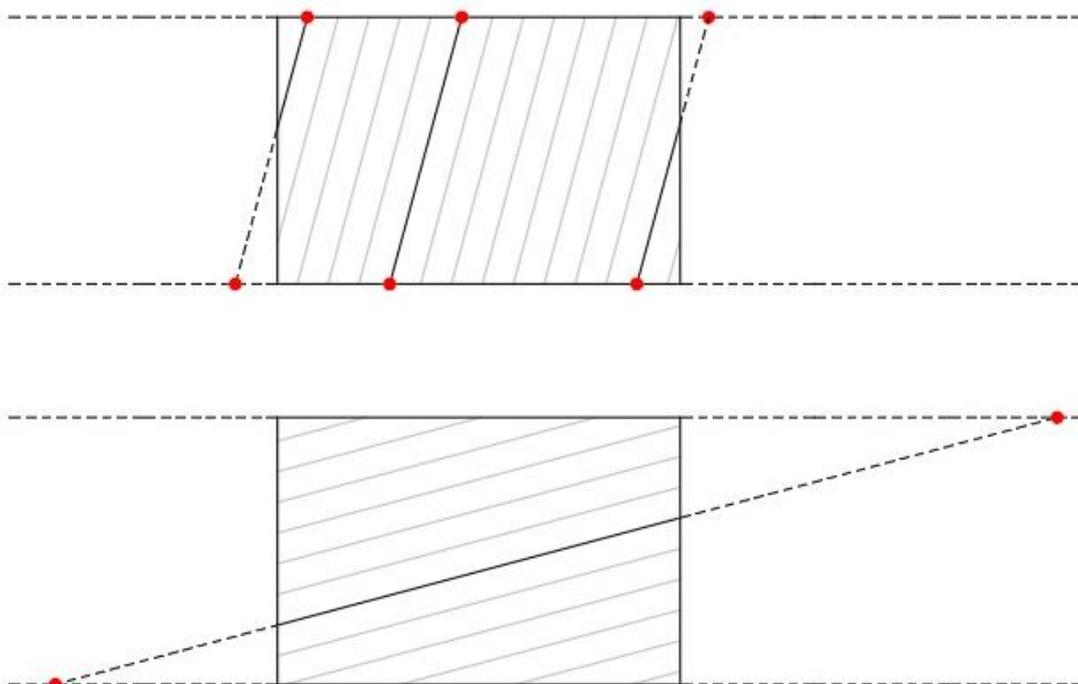


Figura 5 – Localizações das camadas na sapata (Autores)



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

A solução foi adotar uma equação híbrida entre função lógica e trigonométrica. Inicialmente a função lógica determina o caso e em função do caso são determinadas as coordenadas dos vértices. Quando um dos vértices ultrapassa os limites laterais, são calculados novos vértices de maneira que estes estejam faceados à borda.

A título de curiosidade, a planilha final teve aproximadamente 700.000 células programadas, sendo: para cada um dos 70 casos, 500 camadas, e para cada camada pelo menos 20 linhas para a determinação do centro de gravidade, vértices, tensão atuante etc.

3 Conclusões

A ferramenta desenvolvida se mostra útil em verificações preliminares no cálculo estrutural diagnóstico. O objetivo da interface simples é cumprido e se mostra amigável aos engenheiros projetistas de estruturas devido a sua semelhança aos diagramas de pilares presente nos *softwares* comerciais de dimensionamento estrutural.

Como continuidade deste trabalho e sugestão para abordagens futuras, pode-se citar:

- A) Inclusão de mais inclinações de tensões, atendendo as limitações de área máxima sem tensão de compressão, tornando o cálculo mais abrangente;
- B) Inclusão de variáveis para seções diferente das retangulares, possivelmente seções de geometria genérica;
- C) Inclusão de verificações referentes ao elemento de concreto armado em si, como a determinação dos esforços resistentes internos, em função do concreto, dimensões de altura, e taxa de armadura.
- D) Inclusão de verificações referentes a geometria e geotecnia, como verificação ao tombamento e deslizamento.
- E) Reescrever a planilha de forma que o cálculo seja realizado em função dos ábacos de Montoya a fim de comparação e validação do modelo parametrizado apresentado neste trabalho.



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

4 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.

BASTOS, P. S. S. **SAPATAS DE FUNDAÇÃO**. Notas de aula da disciplina de Estruturas de concreto III. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.

BOTELHO, M. H. C. e MARCHETTI, O. **Concreto armado eu te amo**. 7. ed. São Paulo: Edgard Blucher. 2013.

THOMÉ, G. R., Flexão normal simples: vigas em concreto armado de seção genérica, **Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto**. Fortaleza, IBRACON, 2019.