

Estudo do Comportamento Mecânico de Sapatas Estaqueadas Comparativamente às Sapatas Isoladas

Rafael Vital Januzzi

UEMG, João Monlevade, Brasil, rafael@vitaljanuzzi.com

Marcela Laert Moreira

UEMG, João Monlevade, Brasil, marcela.laert09@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho visa estudar o comportamento mecânico da sapata estaqueada em comparação à sapata isolada via Método dos Elementos Finitos (MEF), e apresentar definições, motivação do seu estudo, revisão de pesquisas já realizadas e as vantagens desta associação. Durante o levantamento bibliográfico, notou-se que pouco se produz de conteúdo no Brasil sobre a associação de mais de um tipo de fundação, apesar de ser crescente o número de obras que empregam técnicas conjugadas a fim de garantir maior segurança e estabilidade da estrutura e também de surgir linhas de pesquisa que analisam as estacas como elemento redutor de recalque de fundações superficiais. Para determinar as características geométricas da fundação e propriedades mecânicas do solo, para posterior modelagem numérica, foram feitas correlações empíricas com base no índice de penetração N_{SPT} de um determinado terreno, para definir os parâmetros do solo como módulo de elasticidade, peso específico, ângulo de atrito e tensão admissível. Em seguida foram calculadas as dimensões geométricas da sapata conforme a NBR 6118/2014 e NBR 6122/2010, para um carregamento de 50 (Tf). Após obter as propriedades necessárias do sistema de fundação, foi realizada a modelagem numérica, via Método dos Elementos Finitos, de uma sapata isolada e outra sapata com as mesmas propriedades, porém associada a um grupo de estacas. Observou-se que os resultados obtidos em simulação numérica realizada pelo presente trabalho, validaram as definições presentes na literatura, ressaltando assim a vantagem da utilização de estacas como elemento redutor de recalque. Outra conclusão que se observou é a consideração da resistência de contato entre a sapata e o solo e quanto à resistência de ponta das estacas associadas à ela, pois o grupo de estacas distribuiu melhor a tensão para o solo.

PALAVRAS-CHAVE: Sapata estaqueada, Sapata, Fundações, MEF

1 INTRODUÇÃO

Nas obras de Engenharia um elemento de grande importância e muito estudada por pesquisadores e profissionais do ramo é a fundação das edificações. Responsável por transmitir os carregamentos decorrentes do uso e o peso próprio das edificações ao solo, ela deve ser muito bem dimensionada. Não são raras as situações nas quais empregam-se técnicas conjugadas a fim de garantir maior segurança e estabilidade a estrutura.

Sales, 2000, relata que na engenharia classificam-se as fundações em rasas ou profundas, e de uma forma geral não se associam diferentes tipos em um mesmo elemento. Porém, nos últimos anos, cresce o número de obras que utilizam a associação da sapata (fundação rasa) com estacas (fundação profunda), sendo denominada como sapata estaqueada. Essa associação de elementos é proposta a fim de melhorar o desempenho das sapatas quanto ao recalque, capacidade de carga ou mesmo reduzindo custos. Esses projetos são

caracterizados pelo uso predominante de métodos empíricos de análise, o que talvez não represente a complexidade do comportamento deste tipo de combinação de elementos de fundação.

Desenvolveu-se, com o presente trabalho, um modelo numérico, via método dos elementos finitos (MEF), para representar o comportamento mecânico das sapatas estakeadas e assim compara-las com sapatas não estakeadas. Os principais aspectos analisados foram a influência do estaqueamento na capacidade de carga do elemento e o efeito que o estaqueamento tem na redução do recalque. Dessa forma pretende-se enriquecer a literatura sobre este assunto que é escasso no Brasil. Esta linha de pesquisa vem sendo desenvolvida em algumas instituições tais como Universidade de Brasília (Sales, 2000; Souza e Cunha, 2003), Universidade Federal do Rio de Janeiro (Bergman, M, 1998), Universidade Federal de Viçosa (Lopes, 1997; Silva, 2000; Araújo, 2001; Soares, 2003), dentre outros.

2 MÉTODOS

2.1 Métodos e correlações empíricas para definição das propriedades do solo

Com base no índice de penetração N_{SPT} de determinado terreno (Figura 1), foram feitas correlações empíricas para definir os parâmetros do solo como módulo de elasticidade, peso específico, ângulo de atrito, coeficiente de Poisson e tensão admissível.

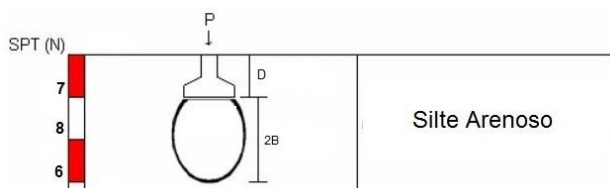


Figura 1. Perfil gerado a partir da sondagem SPT.

Para definir o $N_{méd}$ foi feita uma média aritmética entre os SPTs da região localizada entre a cota de assentamento e o término que o bulbo de tensões poderia atingir:

Para determinação da capacidade de carga de um conjunto solo-fundação, para realizar o

dimensionamento da fundação, foi utilizado o método simplificado, em que se determina capacidade de carga média para um tipo de solo, baseada na sua descrição gerada pelo ensaio SPT. São tabelas contendo os mais variados tipos de solos, Alonso (1943) e Teixeira e Godoy (1996) dizem que se pode calcular a tensão admissível de uma fundação superficial utilizando o SPT médio das camadas a partir da cota de apoio da fundação, apenas dividindo este por 0,05, este método só é aplicado para $5 < N_{SPT} \leq 20$, segundo Alonso (1943).

Os parâmetros do solo determinados pelos métodos e correlações empíricas e foram utilizados para calibração do modelo numérico são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do solo determinados pelos métodos e correlações empíricas.

Módulo de elasticidade (E)	100 Kg/cm ²
Peso específico (γ)	19KN/m ³
Coesão (C)	18KPa
Ângulo de atrito (ϕ)	30°
Coeficiente de Poisson (ν)	0,2
Tensão admissível (σ_{adm})	1,4 Kg/cm ²

2.2 Dimensionamento da sapata

Conforme a NBR 6118 (ABNT,2014), para o cálculo e dimensionamento de sapatas devem ser utilizados modelos tridimensionais lineares ou modelos biela-tirante tridimensionais.

Foi realizado o dimensionamento da sapata isolada rígida, que é um elemento com seção não alongada ($B_2 < 3B_1$) que transmite ações de um único pilar centrado diretamente ao solo. É também o tipo de sapata mais utilizada.

onde:

B_1 é a maior dimensão da sapata;

B_2 é a menor dimensão da sapata.

Conforme a referência e prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014) as dimensões das sapatas foram definidas e seguem descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Dimensões calculadas da sapata.

B₁ maior dimensão da sapata (m)	B₂ menor dimensão da sapata (m)	h altura da sapata (m)
2,00	1,85	0,60

2.3 Simulação numérica

A simulação numérica foi realizada utilizando como ferramenta um programa computacional comercial baseado no MEF para solucionar problemas geotécnicos. Decidiu-se pelo desenvolvimento de análises Linear-Elástico visto que em situações rotineiras de engenharia a condição de utilização é governada pela Teoria da Elasticidade. O interesse dessa primeira fase do trabalho foi apenas estudar a distribuição das tensões no solo em função da utilização ou não das estacas nos elementos de fundação superficiais, neste caso nas sapatas. Um estudo mais aprofundado, utilizando modelagem não linear será desenvolvido na continuidade desse trabalho.

As propriedades físicas do solo foram obtidas por meio de correlações com o ensaio SPT de uma terreno localizado na área central do município de João Monlevade, Minas Gerais. Esses dados alimentaram o modelo numérico possibilitando a análise do comportamento mecânico dos elementos.

3 RESULTADOS

3.1 Análise dos dados obtidos via MEF

3.1.1 distribuição de tensões em sapata isolada

A Figura 02 apresenta o bulbo de tensões da sapata isolada, comparando o resultado obtido pela simulação numérica realizada neste trabalho com a literatura. Observa-se que o modelo numérico proposto apresenta uma distribuição de tensões no solo similar ao presente na literatura.

A Figura 3 apresenta os resultados da distribuição de tensão da sapata ao longo da profundidade. Na profundidade de 6 m,

corresponde a cota de assentamento da fundação. Nota-se que a correlação profundidade versus tensão é inversamente proporcional, pois à medida que há um aumento da profundidade, diminui o acréscimo de tensão. Ou seja, conforme nos distanciamos da base da sapata, a intensidade das tensões aplicadas diminuem até um ponto em que a carga praticamente não exerce mais influência no meio. Percebe-se que as tensões maiores se concentram próximas à superfície do terreno.

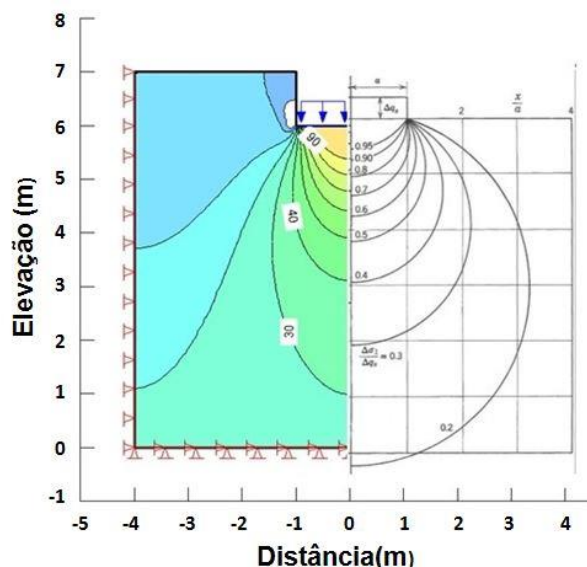


Figura 2. Bulbo de tensões da sapata isolada

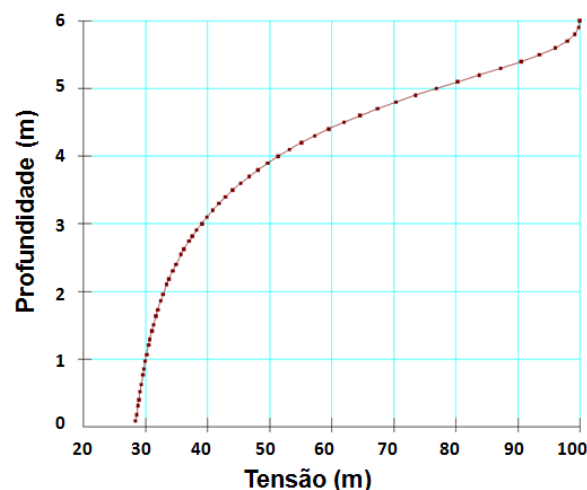


Figura 3. Tensão x profundidade, sapata isolada.

3.1.2 deformação do solo – recalque sapata isolada

As maiores deformações se concentram nas regiões de maiores tensões, ou seja, próximas à base da sapata. As Figuras 4 e 5 ilustram esse

fenômeno. Quanto maior a profundidade, menor o recalque e portanto, a massa de solo mais próxima à sapata sofre um maior deslocamento.

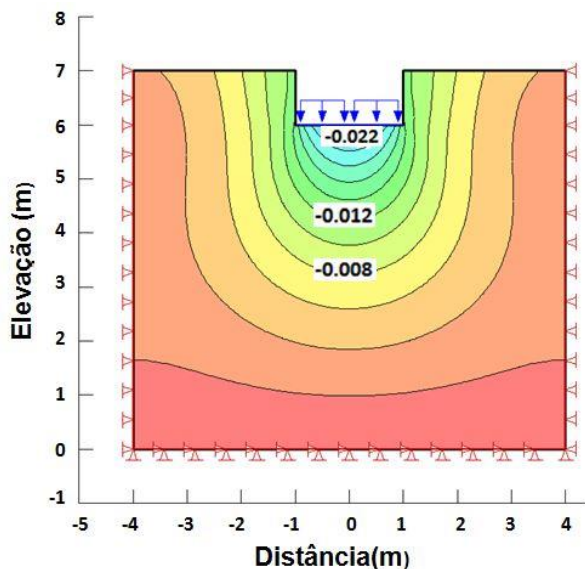


Figura 4. Recalque da sapata isolada.

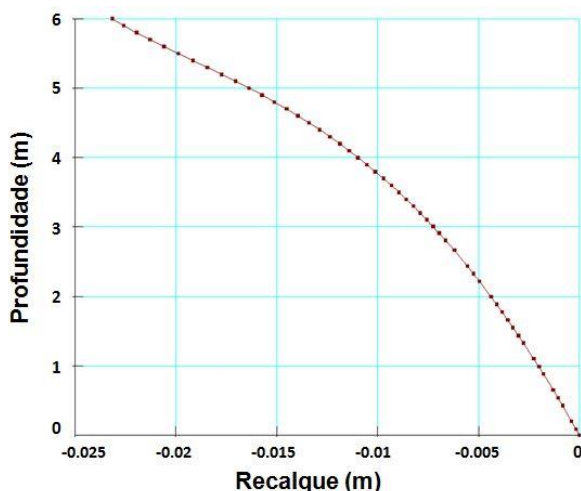


Figura 5. Recalque x profundidade sapata isolada

3.1.3 distribuição de tensões em sapata estacada

A Figura 6 apresenta a distribuição de tensões no solo da sapata estacada. Nota-se que as estacas alteraram o bulbo de tensões se comparado à sapata isolada. A maior interferência que pode se visualizar é principalmente na região de contato sapata-estaca e nas extremidades inferiores (ponta) das pequenas estacas (estacas na ordem de 30 cm de diâmetro). Já na Figura 7 são apresentados os valores da distribuição de tensões no solo, nota-

se que na cota 5,7 (m) a tensão no solo é de 90 (Kpa), já quando faz-se a mesma avaliação com o gráfico da sapata isolada, observa-se que a tensão, na mesma cota, é da ordem de 98 (Kpa).

Pode-se observar, por tanto, que houve uma melhor distribuição de tensões na sapata estacada e um menor espraio das tensões no entorno. Esses dados mostram uma grande vantagem das sapatas estacadas em fundações de divisa, pois causariam menor interferência nas fundações de edificações vizinhas.

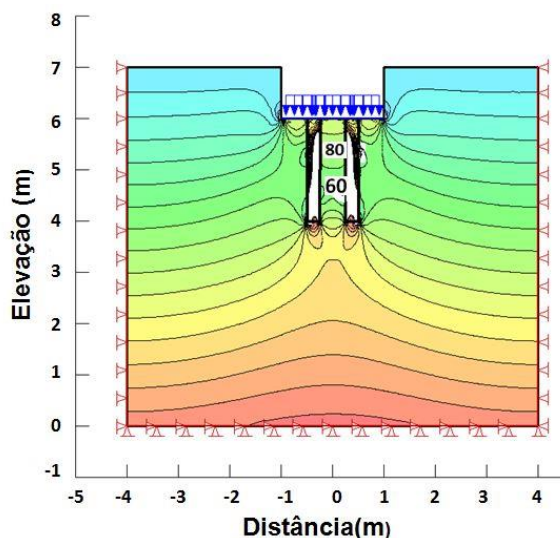


Figura 6. Bulbo de tensão sapata estacada.

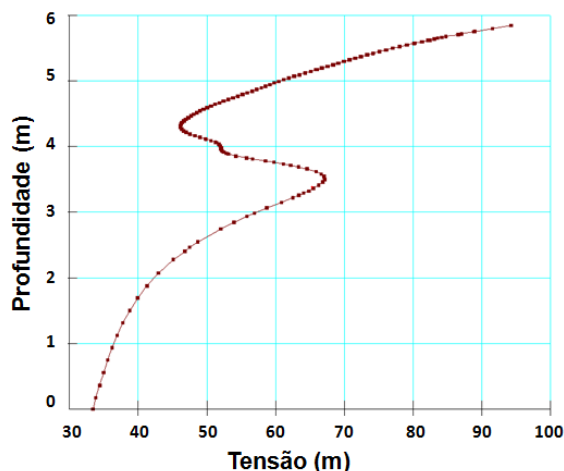


Figura 7. Tensão x profundidade sapata estacada

3.1.4 deformação do solo – recalque sapata estacada

Pode-se notar, na Figura 8 e 9, que as estacas influenciaram na distribuição de tensões no solo e como consequência, tem-se a redução das deformação comparativamente ao método tradicional. Na cota 5,9 (m), Figura 9, o recalque é de 0,02 (m), já na sapata isolada, na mesma cota, a deformação foi da ordem de 0,023 (m) como mostra a Figura 5.

O modelo apresentado sugere diferenças de recalques da ordem de 0,003 (m) para estacas com profundidade de apenas 2 metros, 30 cm de diâmetro e carregamento pequeno, da ordem de 500 (KN). Uma sugestão é variar a profundidade e/ou o diâmetro das estacas e avaliar a sua influência no sistema. Possivelmente será encontrado uma redução de recalque mais significativa.

As estacas associadas à sapata aumentam a área de contato da fundação com o solo e consequentemente distribui melhor as tensões no solo. Os dados apresentados até o momento confirmam que as estacas atuam como um elemento redutor de recalque.

Outra vantagem que pode ser observada foi o aumento da segurança das fundações quanto ao efeito de recalque, pois a sapata estacada apresentou menor recalque do solo para as mesmas condições imposta a sapata comum.

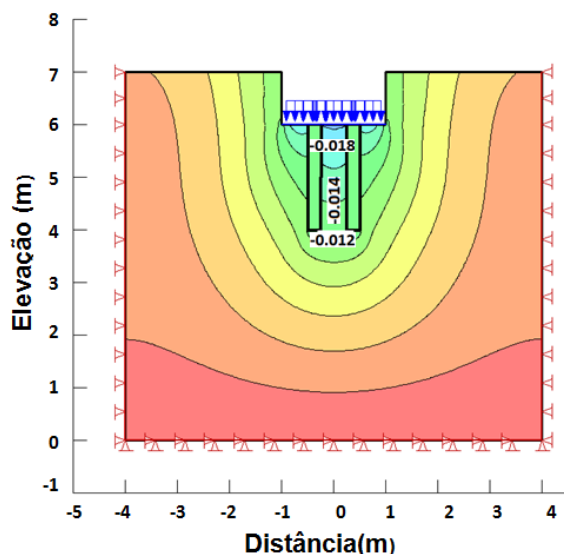


Figura 8. Recalque sapata estacada

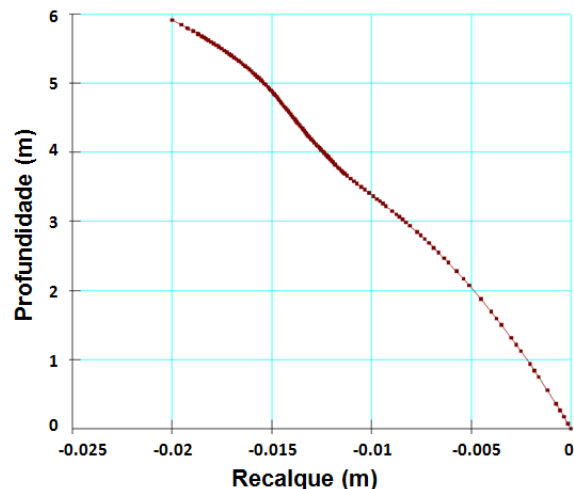


Figura 9. Recalque x Profundidade Sapata Estacada

4 CONSIDERAÇÕES

Nota-se que os resultados apresentados na literatura comprovam os obtidos em simulação numérica realizada pelo presente trabalho, ressaltando a vantagem da utilização de estacas como elemento redutor de recalque. Outra conclusão que se observou é a consideração da resistência de contato entre a sapata e o solo e quanto à resistência de ponta das estacas associadas à ela, pois o grupo de estacas distribuiu melhor a tensão no solo.

Assim, a sapata estacada mostra-se como uma alternativa vantajosa para edificações de pequeno porte e principalmente como elemento de fundação de divisa. É importante lembrar que mais estudos são necessários para assegurar a sua utilização, como por exemplo a interferência que as estacas exercem sobre os elementos estaca (segunda fase da pesquisa).

REFERÊNCIAS

- Alonso, U. R. (1943). *Exercícios de Fundações*, São Paulo: Edgard Blucher.
- Araújo, S.M. (2001). *O Ensaio Pressiométrico de Ménard e sua Utilização na Estimativa da Capacidade de Carga e Recalque de Fundações Assentes em Solo Residual de Gnaiss*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- Associação brasileira de normas técnicas – ABNT – NBR 6118/14, *Projeto de estruturas em concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

- Associação brasileira de normas técnicas – ABNT – NBR 6122/10, *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- Berberian, D. (2014). *Sondagens e ensaios in situ para engenharia*; 9ª edição.
- Bergman, M. (1998). *Contribuição ao Estudo do Comportamento de Associações Sapata-Estaca*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.
- Bezerra, J.E. (2003). *Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceito e Aplicações*. UnB, Brasília-DF.
- Bueno, B.S. (1985). *Capacidade de Carga de Fundações Rasa*. Viçosa, MG: UFV;
- Butterfield, R., & Banerjee, P.K. (1971). *The problem of pile group – pile cap interaction*. *Geotechnique* 21(2): 135-142.
- Campos, J.C. (2015). *Elementos de Fundações em Concreto*. São Paulo, SP.
- Chagas, F.S.F. (2005). *Modelagem de Problemas de Engenharia: Solução de Equações Diferenciais Parciais pelo Método de Elementos Finitos*. Unifor, Fortaleza, CE.
- Cintra, J. C. A. (1998). *Fundações em Solos Colapsíveis da EESC/USP*, São Carlos. 106p.
- Duarte, L. N. (2006). *Análise de Prova de Carga Instrumentada em um Sapata Rígida*. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.
- Duarte, L. N. (2009). *Projeto de Fundação Mista*. Viçosa, Minas Gerais.
- El-mossalamy, Y & Franke, E. (1997). *Piled rafts foundation – numerical modelling to simulate the behavior of piled raft foundations*. The authors, Darmstadt, Germany, 182p.
- Fabrizio, M. Rossignolo, J. A. *Fundações*. São Carlos-SP. (S.D).
- Godoy, N. S.; Teixeira, A. T. (1996). *Análise, projeto e execução de fundações rasas*. Ed. Pini, São Paulo.
- Hooper, J.A. (1973). *Review of behavior of piled raft foundation*. CIRIA. Report 83.
- Long, P. D. *Footings with settlement-reducing piles in non-cohesive soil*. 1993, 179 p. PhD Thesis, Dep. of Geotechnical Eng. Chalmers Univ. of Technology, Gothenburg, Sweden, 1993.
- Lopes, G. S. (1997). *Execução e Análise de uma Prova de Carga Direta em Verdadeira Grandeza em Solo Residual de Gnaíse*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade federal de Viçosa, Viçosa- MG.
- Ottaviani, M. (1975). *Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups*. *Geotechnique* 25(2): 159-174.
- Pinto, C. S. (1998). *Resistência ao Cisalhamento dos Solos*. São Paulo. Escola Técnica da Universidade de São Paulo.
- Poulos, H. G. (1968). *The influence of rigid pile cap on the settlement behavior of an axially loaded pile*. *Civil Eng. Trans Inst. Civil Engrs. Aust Vol. C.E* 10:206-208.
- Poulos, H. G. (1972). *Load settlement prediction for piles and piers*. *J. Soil Mech. Fdns. Div. ASCE*, v. 98, SM9, 379-397
- Poulos, H. G. (1991). *In Computer methods and advances in geomechanics (eds Beer et al.)*, Rotterdam: Balkema.
- Russo, P. *Interazione terreno struttura per piastrine su pali*. 1996, 289 p. Tese de Doutorado, Univ. di Roma La Sapienza e di Napoli Federico II. Napoli. 1996.
- Sales, M. M. *Análise do comportamento de sapatas estaqueadas*. 2000. 229 f. Tese de Doutorado, Publicação G.TD/002A, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 2000.
- Sanctis, L. de. *Modellazione ed analisi di piastre su pali*. 2000, 304 p., Tese de Doutorado, Univ. di Roma La Sapienza e di Napoli Federico II, Roma. 2000.
- Silva, C. E. F. (2000). *Estudo da Distribuição de Cargas ao Longo do Fuste e na Base do Tubulão*. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-Minas Gerais.
- Sommer, H., Wittmann, P.; Ripper, P. (1985) *Piled raft foundation of a tall building in Frankfurt clay*. *ICDMFE*, v. 11, n 4, 2253-2257.
- Sousa, L. C. M. e Cunha, R. P. (2003). *Estudo Experimental do Comportamento de Sapatas Assentes em Solo Poroso Reforçado*. Universidade de Brasília, Brasília - Distrito Federal.
- Terzaghi, K., e Peck, R.B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd. Ed. John Wiley, New York, 1967. Primeira edição em 1948.
- Velloso, D. A. Lopes, F. R. *Fundações, critérios de projeto – investigação do subsolo Edição vol1: Fundações Superficiais*. São Paulo-SP. Oficina dos Textos. 2004