

Análise do Índice de Confiabilidade de Fundações em Estacas Empregando Diferentes Metodologias - Estudo de Caso

Luisa Macedo Paes Côrtes Lopes

Mestranda, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, luisa.lopes@coc.ufrj.br

Paulo César de Almeida Maia

Professor Associado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Brasil, paulomaiauenf@gmail.com

Marta Fleichman Prellwitz

Doutoranda, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Brasil, mfprellwitz@gmail.com

RESUMO: É recorrente na prática de engenharia geotécnica a estimativa da capacidade de carga baseada em uma média dos resultados de sondagens, envolvendo uma série de incertezas. A estas, soma-se as geradas pela escolha do método de cálculo, normalmente baseado em experiência local e correlações empíricas. Métodos estes que aplicam conceitos de fatores de segurança que podem nem sempre satisfazer a segurança contra a ruptura. Assim, como há uma variabilidade tanto nos valores das resistências como das solicitações, tem-se uma distribuição probabilística dos dois eventos, que podem ocasionalmente se sobrepor correspondendo ao risco de ruína. A associação dos fatores de segurança a uma análise probabilística já se tornou normatizada no hemisfério norte. Embora a norma brasileira não mencione estudos de confiabilidade, há um esforço da comunidade acadêmica em compreender e aproximar os engenheiros atuantes no mercado de metodologias que considerem as incertezas presentes nos projetos. Deste modo, o objetivo do deste trabalho é discutir os resultados apresentados pelo emprego de diferentes métodos probabilísticos, avaliando fatores que levam a uma variação de valores de confiabilidade. Foi utilizado como caso de estudo o projeto de fundação de um edifício residencial localizado em Campos dos Goytacazes-RJ

PALAVRAS CHAVE: Fundações, confiabilidade, probabilidade de ruptura

ABSTRACT: Load capacity estimation based on SPT tests results` average is a common practice in engineering and involves several uncertainties. To these are added those associated with the calculation method, usually based on local experience and empirical correlations. These methods apply concepts of safety factors that may not satisfy security against rupture. Thus, since there is a variability in both resistance and stress values, we have a probabilistic distribution of the two events, which may occasionally overlap corresponding to the risk of failure. Although the Brazilian standard does not mention reliability studies, there is an effort of the academic community to understand and to approach the engineers in the market of methodologies that consider the uncertainties presented in the projects. In this way, the objective of this paper is to discuss the results presented using different probabilistic methods, evaluating factors that lead to a variation of reliability values. It was used as a case of study the foundation's project of a residential building located in Campos dos Goytacazes, RJ, Brazil.

KEYWORDS: Pile foundations, reliability, failure probability

1 Introdução

O uso de metodologias determinísticas e fatores de segurança com base em experiência local é amplamente difundido na engenharia geotécnica. Entretanto, tais metodologias não consideram a variabilidade intrínseca da natureza, bem como as geradas desde o processo de aquisição de parâmetros, até os modelos de previsão de capacidade de carga.

Há nas solicitações uma variabilidade que se dá, dentre outras, pela consideração ou não do processo de interação solo-estrutura e do efeito de grupo. Assim como a variabilidade associada ao próprio processo de estaqueamento, com o arredondamento do número de estacas necessárias sob um pilar, e às combinações de ações permanentes e variáveis, como cargas de vento (Aoki e Cintra, 2002).

Coefficientes de segurança, baseados exclusivamente em termos de solicitações e resistências médias, desconsiderando a magnitude do desvio padrão a elas associado, não necessariamente satisfazem a segurança contra a ruptura (Aoki; Menegotto e Cintra, 2002; Teixeira et al., 2012). Uma forma de quantificar as incertezas presentes nos projetos de engenharia é através de abordagens probabilísticas, podendo a confiabilidade projeto ser avaliada pela posição relativa entre as curvas de distribuição estatística da solicitação e da resistência e do grau de dispersão que elas apresentam (Aoki e Cintra, 2002).

Além do costume de empregar as metodologias tradicionais, baseadas em fatores de segurança globais determinados por norma, a não familiaridade de engenheiros com ferramentas estatísticas levam ao baixo uso de análises probabilísticas no ambiente geotécnico (Santa Maria e Dandoulakis, 2018). Todavia, segundo Duncan (2000), é possível a aplicação de análises de confiabilidade através de procedimentos simples, sem a necessidade de dados além dos já empregados em uma análise determinística convencional, gerando um refinamento considerável na avaliação da segurança de um projeto geotécnico.

Com o intuito de discutir os fatores que levam a uma variação do índice de confiabilidade, o presente trabalho apresenta um conjunto de análises realizadas através de duas metodologias probabilísticas, a apresentada por Cintra e Aoki (2010) e as Simulações de Monte Carlo. Avaliando a influência do método de determinação das resistências do elemento de fundação e da consideração de diferentes combinações de carga. Além de comparar os resultados obtidos com os dados recomendados na literatura e em normas internacionais.

2 Confiabilidade e Probabilidade de Ruína

Análises de confiabilidade tem o intuito de quantificar a probabilidade de um determinado evento acontecer. Na engenharia, o evento de interesse é a probabilidade de ruína (p_f), isto é, a probabilidade de que o fator de segurança seja igual ou inferior a 1.

Tal probabilidade pode ser inferida indiretamente a partir de um parâmetro adimensional denominado índice de confiabilidade (β), o qual é dependente da variabilidade das solicitações (S) e das resistências (R). Considerando resistência e solicitação como variáveis aleatórias, as incertezas inerentes podem ser definidas estatisticamente pela média, coeficiente de variação (v) e da função densidade de probabilidade.

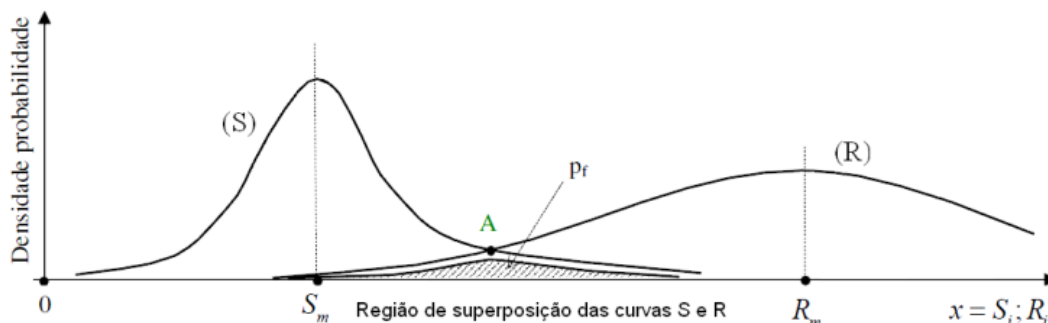


Figura 1: Curva de Densidade de Probabilidade (Barros et al, 2010)

Conforme Cintra e Aoki (2010), a dispersão das curvas de resistência e solicitação podem ser expressas por coeficientes de variação (v), obtidos pela razão entre o desvio padrão (σ) e o valor médio:

$$v_S = \frac{\sigma_S}{S_m} \qquad v_R = \frac{\sigma_R}{R_m} \qquad (1)$$

Tradicionalmente, o fator de segurança global (FS_m) é definido pela razão entre os valores médios de resistência (R_m) e de solicitação (S_m):

$$FS_m = \frac{R_m}{S_m} \qquad (2)$$

O índice de confiabilidade (β) é então definido por:

$$\beta = \frac{1 - 1/FS_m}{\sqrt{v_R^2 + (1/FS_m)^2 v_S^2}} \qquad (3)$$

Por sua vez, a probabilidade de ruptura (p_f), segundo Ang e Tang (1984, apud Aoki e Cintra, 2010), é função direta de β :

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \qquad (4)$$

Que pode ser obtido por expressão em planilha eletrônica:

$$p_f = 1 - \text{DIST.NORM}(\beta; 0; 1; \text{VERDADEIRO}) \qquad (5)$$

Neste trabalho serão considerados inadmissíveis valores de p_f superiores a 1/1000, correspondente a um índice de confiabilidade de 3,09, como recomendado por Aoki et al (2002).

3 Métodos Probabilísticos

3.1 Aoki e Cintra

A metodologia descrita por Aoki e Cintra (2010) é considerada um método probabilístico aproximado, com as variáveis aleatórias caracterizadas pela sua distribuição e parâmetros estatísticos, como média e coeficiente de variação. Os autores consideram uma população finita cujas curvas de densidade de probabilidade assumem uma distribuição normal simétrica.

Neste trabalho, foram definidas como variáveis aleatórias as solicitações (S) e resistências (R). Sendo a primeira obtida através das combinações de cargas apresentadas pelo projetista estrutural, enquanto os valores de capacidade de carga foram obtidos por meio diferentes métodos determinísticos para cada um dos 8 furos de sondagem disponíveis.

3.2 Simulação de Monte Carlo

A Simulação de Monte Carlo consiste na geração aleatória de um determinado número de valores para as variáveis aleatórias independentes. De tal modo, os valores de média e desvio padrão da amostra gerada são obtidos.

Por se tratar de uma técnica de amostragem, os resultados obtidos pela Simulação de Monte Carlo estão sujeitos a erros. Entretanto, com o aumento do número de amostras geradas tem-se uma redução do erro associado. Por isso, geralmente estas análises exigem um grande número de valores gerados.

Através do software Excel, 10 mil valores das variáveis S e R foram geradas para uma distribuição normal simétrica a partir dos parâmetros estatísticos das amostras iniciais.

4 Descrição do Empreendimento

O empreendimento estudado trata-se de um edifício residencial multifamiliar com 196 unidades autônomas localizado na região central de Campos dos Goytacazes, RJ. Sua estrutura é composta de 19 pavimentos, entre garagem, áreas comuns e pavimentos tipo, conforme descrito por Waked (2017).

4.1 Características do Terreno

O terreno apresenta uma área total de 2755,6 m², relativamente plano e nivelado com cota da rua. A partir da investigação geotécnica, composta por 8 furos de sondagem, pôde-se traçar um perfil estratigráfico do terreno, onde é observada uma camada de argila siltosa de consistência mole a média. Seguida de uma espessa camada de areia argilosa, pouco a medianamente compacta. Exceto as verticais 7 e 8, as sondagens apresentam uma camada de argila mole, com espessura entre 2 a 4 metros. Por fim, nas camadas mais profundas do perfil encontra-se uma camada mais resistente, de argila siltosa dura. O nível d'água varia em torno dos 3,50 metros de profundidade. As sondagens SPT foram paralisadas entre as profundidades 18,45 e 20,45 metros seguindo o critério descrito no item 6.4.1 da NBR 6484/2001.

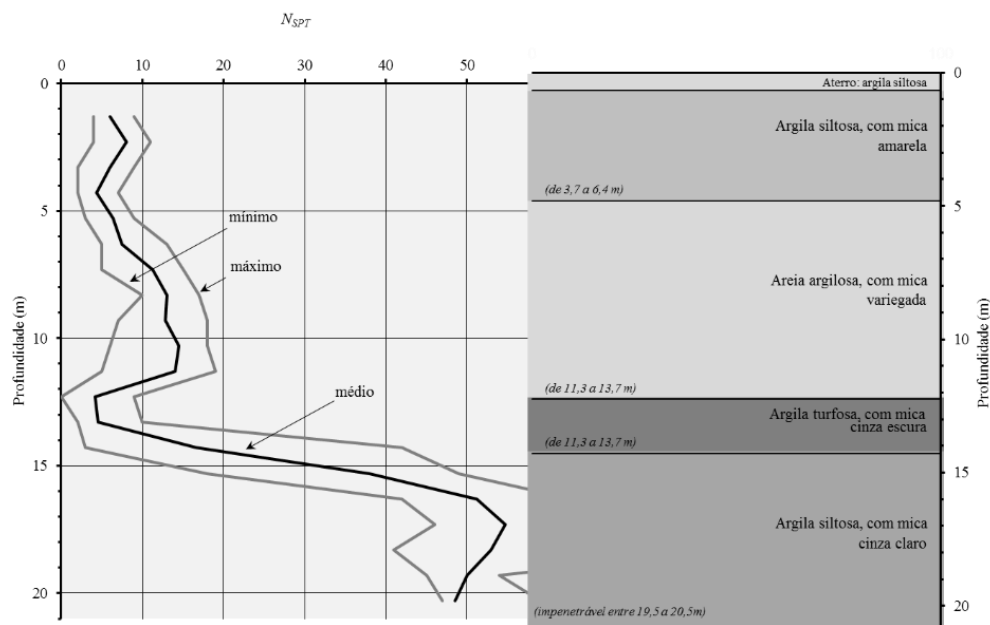


Figura 2: Perfil esquemático (adaptado: Waked, 2017)

4.2 Fundações

As fundações da edificação em estudo são compostas por estacas profundas do tipo hélice contínua monitorada com diâmetros de 40 cm e 50 cm e profundidade de 18 metros, armadas nos primeiros quatro metros. As estacas estão assentes em camada de argila siltosa rija com elevados números de NSPT.

Para a análise probabilística foram consideradas as estacas centrais do edifício, com diâmetro de 50 cm, constituindo 47 blocos com um total de 235 estacas, com solicitações permanentes variando entre 517 kN e 897,6 kN.

5 Solicitações e Resistências

5.1 Cargas nas Estacas

As análises foram feitas considerando duas situações obtidas da tabela de combinações das ações fornecida pelo projetista estrutural. O Caso (S1) foi definido a partir das solicitações permanentes, enquanto o Caso (S2) trata da combinação entre carga permanente e de vento. Tal combinação foi escolhida de forma que resultasse no maior coeficiente de variação (V_s) na distribuição dos esforços unitários nas estacas. A Tabela 1 apresenta os valores da análise das distribuições das solicitações nas estacas para cada caso proposto.

Tabela 1: Dados da análise estatísticas das solicitações (S)

	Caso (S1)	Caso (S2)
Média (S_m)	795,6 kN	794,5 kN
σ_s	59,3 kN	71,5 kN
V_s	7,5	9,0
Solicitação mínima	517,0 kN	507,3 kN
Solicitação máxima	896,7 kN	1001,8 kN

5.2 Métodos Semi-Empíricos

Para a avaliação da capacidade de carga das estacas foram empregados métodos semi-empíricos com base em resultados de SPT. Sendo estes, o método Aoki e Velloso (1975) e o método proposto por Décourt e Quaresma (1978). Foram utilizados dados das 8 sondagens realizadas no local. Assim é possível considerar a variabilidade tanto em termos de método de cálculo como ao longo do perfil do terreno.

Os cálculos foram feitos individualmente para os oito furos de sondagem e com cada método, gerando três casos de análise. Os casos (R0) e (R1) representam, respectivamente, as tensões obtidas pelos métodos de Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978). O Caso (R2) considera a média dos resultados obtidos pelos dois métodos determinísticos, prática comum na engenharia brasileira. A Tabela 2 apresenta os resultados de cada um dos casos.

Tabela 2: Dados da análise estatística das resistências (R)

	Caso (R0)	Caso (R1)	Caso (R2)
Média (R_m)	1246,0 kN	2027,6 kN	1636,8 kN
σ_R	101,4 kN	166,8 kN	428,1 kN
V_R	8,1 %	8,2 %	26,2 %
Resistência mínima	1107,6 kN	1791,2 kN	1107,6 kN
Resistência máxima	1419,4 kN	2309,7 kN	2309,7 kN

6 Análise do Índice de Confiabilidade

A partir dos parâmetros estatísticos obtidos para as resistências (R) e solicitações (S), apresentados nas Tabelas 1 e 2, foram desenvolvidas as análises probabilísticas conforme metodologia descrita por Aoki e Cintra (2010). A Tabela 3 apresenta os valores de probabilidade de ruína (pf), confiabilidade (β) e fatores de segurança para cada combinação de resistência, considerando apenas as cargas permanentes.

Tabela 3: Análises para cargas permanentes (S1)

	Caso (R0)	Caso (R1)	Caso (R2)
R_m	1246,0 kN	2027,6 kN	1636,8 kN
σ_R	101,4 kN	166,8 kN	428,1 kN
V_R	8,1 %	8,2 %	26,2 %
S_m		795,6 kN	
σ_S		59,3 kN	
V_S		7,5 %	
FS	1,6	2,5	2,1
β	3,8	7,0	1,9
p_r	$1,6 \times 10^{-4}$	$5,9 \times 10^{-11}$	$1/39$

Já a Tabela 4 apresenta os resultados considerando a combinação entre cargas permanente e de vento que resultou no maior coeficiente de variação, como explicitado anteriormente.

Tabela 4: Análises para cargas permanentes + vento (S2)

	Caso (R0)	Caso (R1)	Caso (R2)
R_m	1246,0 kN	2027,6 kN	1636,8 kN
σ_R	101,4 kN	166,8 kN	428,1 kN
V_R	8,1 %	8,2 %	26,2 %
S_m		794,5 kN	
σ_S		71,5 kN	
V_S		9,0 %	
FS	1,6	2,6	2,1
β	3,6	6,8	1,9
p_r	$7,3 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-11}$	$1/38$

Como na obra em questão foram realizadas provas de carga, os fatores de segurança apresentados tanto nas análises feitas para cada método individualmente, como pela média dos métodos, se encontram dentro dos valores normatizados. Apesar de resultar em diferentes fatores de segurança, os coeficientes de variabilidade apresentados nos Casos (R0) e (R2) são similares e com índices de confiabilidade acima do limite proposto. Entretanto, a maior variabilidade apresentada pelo Caso (R2) leva a valores inadmissíveis de confiabilidade e probabilidade de ruína.

Avaliando as curvas de densidade de probabilidade, apresentadas na Figura 5, observa-se que as solicitações exibem uma forma mais alongada e fechada, evidenciando que seus valores se aproximam mais do valor médio e, portanto, possuem uma maior densidade de probabilidade e menor desvio padrão.

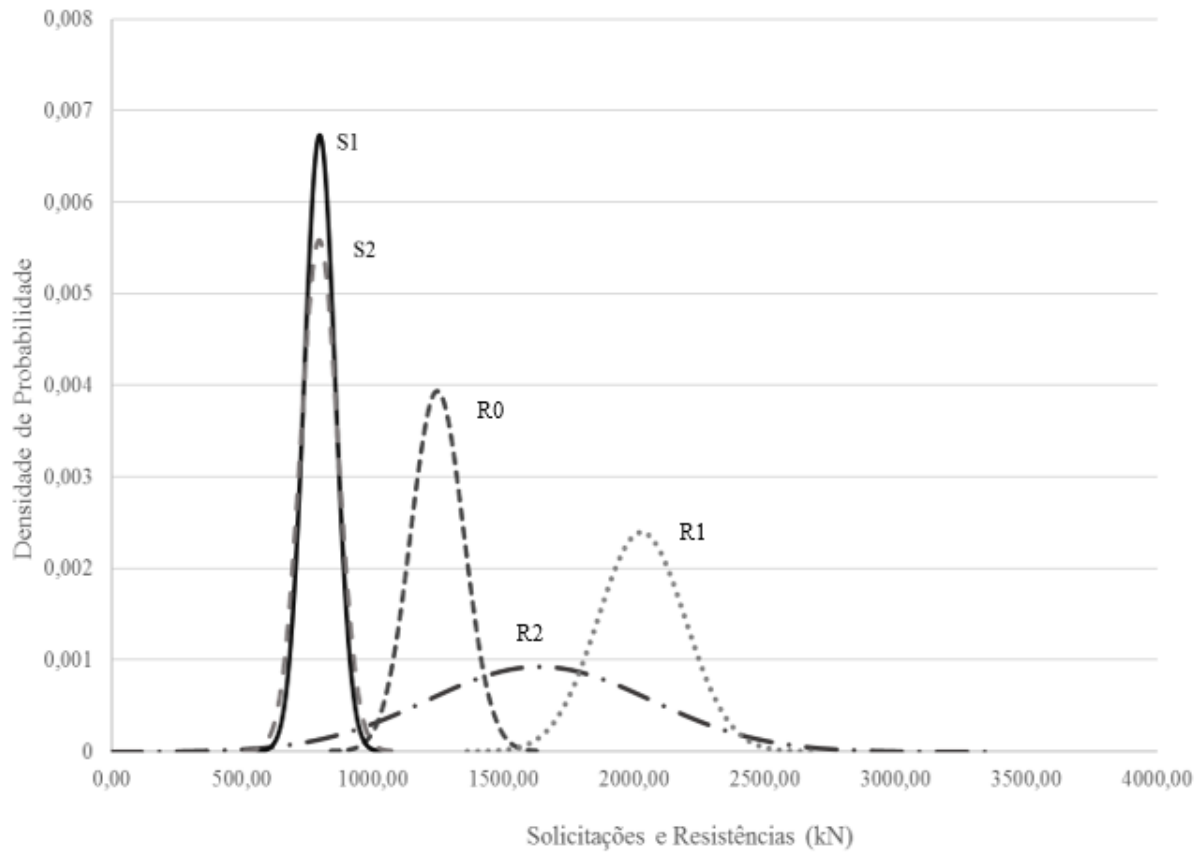


Figura 3: Curvas de Densidade de Probabilidade

Em seguida, foi feito um refinamento da amostragem através de Simulação de Monte Carlo, gerando 10 mil valores para cada um dos casos com referência nos parâmetros apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Análise SMC para cargas permanentes (S1)

	Caso (R0)	Caso (R1)	Caso (R2)
R_m	1245,9 kN	2027,2 kN	1637,6 kN
σ_R	100,9 kN	166,0 kN	423,7 kN
V_R	8,1 %	8,2 %	25,9 %
S_m		795,8 kN	
σ_S		59,5 kN	
V_S		7,5 %	
FS	1,6	2,5	2,1
β	3,8	7,0	2,0
p_r	$1,6 \times 10^{-4}$	$6,9 \times 10^{-11}$	$1/41$

Tabela 6: Análise SMC para cargas permanentes + vento (S2)

	Caso (R0)	Caso (R1)	Caso (R2)
R_m	1245,9 kN	2027,2 kN	1637,6 kN
σ_R	100,9 kN	166,0 kN	423,7 kN
V_R	8,1 %	8,2 %	25,9 %
S_m		794,7 kN	
σ_S		71,9 kN	
V_S		9,1 %	
FS	1,6	2,6	2,1
β	3,6	6,8	2,0
p_r	$7,3 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-11}$	$1/40$

Nota-se que os cálculos feitos pelo método puramente probabilístico apresentam valores de confiabilidade e probabilidade de ruína muito similares aos apresentados pelo método aproximado.

7 Conclusões

A necessidade da aplicação de análises probabilísticas se torna visível a partir do momento em que o uso de diferentes métodos determinísticos para uma mesma configuração de carga e solicitações resulta em diferentes fatores de segurança, como exposto nas Tabelas 3, 4, 5 e 6. Tal fato rompe com a máxima de que fatores de segurança globais necessariamente satisfazem a segurança contra a ruptura.

Ao aplicar um mesmo método de cálculo de capacidade de carga considerando diferentes resultados de sondagens, tem-se uma ideia da incerteza oriunda da variabilidade espacial do terreno. Assim como, a incerteza associada aos métodos determinísticos é evidenciada pela variabilidade demonstrada ao se adotar uma média dos métodos semi-empíricos. Um grande impacto nos resultados é observado devido ao fato de que tais métodos são baseados em experiência local, refletidos nos coeficientes utilizados, os quais já carregam uma variabilidade baseada no banco de dados que o originou. Entretanto, a elevada probabilidade de ruína associada a alta variabilidade no uso de médias de métodos determinísticos não pode ser interpretada necessariamente como uma vulnerabilidade da obra.

Em relação aos resultados obtidos com e sem a consideração das cargas de vento, é notável que para o caso em estudo não houve uma influência relevante, podendo ser atribuído a baixa significância dos acréscimos de carga diante dos valores de carga permanente. Entretanto, quanto maior o peso da carga variável na solicitação atuante na estaca, maior a importância desta nos resultados.

Um dos principais objetivos do presente trabalho é elucidar que uma análise probabilística é dependente da quantidade e qualidade das informações a ela adicionadas. O nível de incerteza decresce com o aumento das informações, entretanto isto pode se manifestar tanto no aumento, quanto na redução do índice de confiabilidade da estrutura, enfatizando a necessidade da aplicação de conceitos probabilísticos ao se dimensionar. Conhecendo os fatores de maior impacto em uma análise probabilística é possível determinar quais parâmetros devem ser mais profundamente estudados e caracterizados em um projeto.

Mesmo uma análise probabilística aproximada, como a apresentada por Aoki e Cintra (2010), é capaz de fornecer informações significativas para projetos geotécnicos e de maior valor agregado do que apenas fatores de segurança aplicados em análises determinísticas. Uma boa prática de engenharia depende da aproximação dos engenheiros geotécnicos a análises de confiabilidade. É necessária ainda uma maior evolução da prática com o emprego de estudos de risco.

AGRADECIMENTOS

A primeira autora gostaria de agradecer à CAPES pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aoki, N.; Cintra, J. C. A.; Menegotto, M. L. Probabilidade de ruína como critério para definir o coeficiente de segurança a ser usado na previsão da carga admissível de fundações por estacas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2002, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABMS, 2002.
- Albuquerque, P. J. R.; Corrêa, C. N. (2018) Avaliação do Risco de Fundação em Estacas Metálicas na Baixada Santista – Estudo de Caso. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA GEOTECNIA E DESENVOLVIMENTO URBANO COBRAMSEG 2018, 2018, Salvador, Bahia. Anais [...]. Salvador: ABMS.
- Alves, A.M.L.; Santa Maria, P.E.L. Análise probabilística de problemas geotécnicos: aplicação à argila do Sarapuí. Solos e Rochas. Vol. 24, No. 1, p. 83-93, 2001.
- Aoki, N. (2008) Dogma do Fator de Segurança. USP, São Carlos.
- Associação Brasileira de Normas Técnica (2010). NBR 6122. Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro.
- Barros, R. et al. (2010) Determinação do Índice de Confiabilidade e da Probabilidade de Ruína de Fundações em Estacas: Estudo De Caso. In: XXXIV JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, San Juan, Argentina. Anais [...].
- Bello, M. H. S.; Faria, S. P.; Bittencourt, D. M. A. (2018) Avaliação de um estaqueamento mediante aplicação do conceito de probabilidade de ruína. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA GEOTECNIA E DESENVOLVIMENTO URBANO COBRAMSEG 2018, 2018, Salvador, Bahia. Anais [...]. Salvador: ABMS.
- Cintra, J. C. A.; Aoki, N. (2010) Fundações por estacas: projeto geotécnico. Editora Oficina de Textos. São Paulo.
- Duncan, J.M. (2000) Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(4): 307-316.
- Lopes, L. M. P. C. (2017) Projeto das Fundações de um Edifício Considerando a Probabilidade de Ruptura. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ.
- Phoon, K. K. (2004) Towards reliability-based design for geotechnical engineering. Special Lecture for Korean Geotechnical Society, Seoul, v. 9, p. 1-23.
- Santa Maria, P. E. L.; Dandoulakis, J. P. (2018) Análise Probabilística da Segurança da Fundação de uma Estrutura Submarina. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA GEOTECNIA E DESENVOLVIMENTO URBANO COBRAMSEG 2018, 2018, Salvador, Bahia. Anais [...]. Salvador: ABMS.
- Silva Neto, A. N.; Oliveira, J. T. R. (2016) Estudos de Confiabilidade e Segurança de Fundações Profundas no Complexo Industrial de Suape com Análise da Variabilidade de Projeto.
- Silva Neto, A. N.; Oliveira, J. T. R.; Ferreira, S. R. M. (2018) Análise de Probabilidade de Ruína e Confiabilidade de Fundações Profundas Submetidas à Prova de Carga Estática Com e Sem Inundação em Solo Colapsível. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA GEOTECNIA E DESENVOLVIMENTO URBANO COBRAMSEG 2018, Salvador, Bahia. Anais [...]. Salvador: ABMS.



Teixeira, A. et al. (2012) Dimensionamento e avaliação da segurança de uma estaca com carga vertical baseado em análises de fiabilidade. Revista Engenharia Civil-Universidade do Minho, p. 41-58.

Velloso, D. A.; Lopes, F. R. (2010) Fundações. São Paulo: Oficina de Textos.

Waked, L. V. (2017) Transferência de Carga de Estacas Hélice Contínua Monitorada em Maciço Sedimentar Durante a Construção de um Edifício. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ.