

Análise Probabilística da Capacidade de Carga das Estacas do Cais do Estaleiro Honório Bicalho em Rio Grande (RS) Empregando Metodologia Bayesiana

Francisco José Von Ameln Luzzardi

Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande/RS, Brasil, franzluzzardi@hotmail.com

Antônio Marcos de Lima Alves

Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande/RS, Brasil, antonioalves@furg.br

RESUMO: O presente trabalho faz uma análise probabilística da capacidade de carga das estacas do cais do estaleiro Honório Bicalho, na cidade de Rio Grande (RS). Foi utilizada uma metodologia baseada no teorema de Bayes, que consiste na atualização da estimativa “a priori” (realizada a partir de sondagens do terreno) através do acréscimo de informações proveniente dos dados de cravação das estacas. Na primeira fase do procedimento de análise, a capacidade de carga das estacas foi estimada através de dois métodos semi-empíricos baseados nos resultados de ensaios tipo SPT (Standard Penetration Test), os métodos de Aoki & Velloso e Décourt & Quaresma, incluindo o efeito da variabilidade nos resultados do ensaio. Na segunda fase da análise, os dados de cravação das estacas foram utilizados para gerar o que, na análise bayesiana, é chamada de “função de verossimilhança”. A capacidade de carga foi estimada a partir de uma fórmula dinâmica, alimentada pelas negas medidas ao final da cravação. Na fase final da análise, com os resultados das distribuições probabilísticas “a priori” e função de verossimilhança, e aplicando-se o teorema de Bayes, determinou-se a distribuição de capacidade de carga “a posteriori”, que consiste na combinação das previsões com as observações da capacidade de carga das estacas. A análise dos resultados indicou a diminuição da dispersão da distribuição da capacidade de carga “a posteriori” em relação aos valores encontrados na distribuição “a priori”, caracterizando a diminuição das incertezas com o acréscimo de dados, comprovando o aumento da confiabilidade quanto à capacidade de carga das estacas utilizando-se a metodologia bayesiana.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas, Capacidade de carga, Análise Probabilística, Teorema de Bayes

1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade de qualquer sistema, produto ou processo está intimamente conectada à relação entre a sua capacidade e a sua demanda. Entretanto, em Engenharia, todo projeto geralmente apresenta graus de incerteza, associados tanto à capacidade (reações) quanto à demanda (ações). Se a capacidade e a demanda de um sistema forem tratadas como variáveis aleatórias, incorporando assim suas incertezas associadas, pode-se estimar, além dos tradicionais fatores de segurança, o chamado índice de confiabilidade, relacionado a uma

probabilidade de falha (Ang e Tang, 1984, Harr, 1987, Aoki, 2002).

As incertezas existentes na engenharia de fundações, geralmente, são provenientes de diversos fatores, tais como as limitações dos modelos matemáticos de previsão de comportamento, o conhecimento limitado das propriedades dos materiais e equipamentos de execução, a heterogeneidade intrínseca do solo, a variabilidade dos carregamentos estruturais, dentre outros.

Segundo Lacasse e Nadim (1998), a estatística, as análises de confiabilidade e as estimativas de risco podem ser ferramentas de apoio à decisão muito úteis na Engenharia

Geotécnica. Duncan (2000) defende a aplicação das teorias probabilísticas de análise de confiabilidade e segurança na Engenharia Geotécnica, através de procedimentos simples. De Mello (2002) afirma que a aplicação de análises probabilísticas aos projetos geotécnicos afasta do uso prático as chamadas “receitas-dogmas”, substituídas pela análise e incorporação de dados experimentais.

A abordagem probabilística bayesiana, ao contrário da abordagem frequentista, não se baseia apenas em dados amostrais (objetivos) das variáveis de estudo, mas também em estimativas subjetivas realizadas antes da amostragem, apoiadas em experiência e julgamento, por exemplo. Assim, a aplicação do Teorema de Bayes torna possível, de uma forma elegante e racional, a combinação de informações “a priori” com informações amostrais (função de máxima verossimilhança), alcançando-se um nível de conhecimento “atualizado” (Hachich, 1998).

Vários trabalhos já abordaram a atualização da capacidade de carga de estacas através do teorema de Bayes, como por exemplo: Kay (1976, 1977), Baecher e Rackwitz (1982), Sidi e Tang (1987), Lacasse et al. (1990), Sugai & Matsuo (1993), Zhang e Tang (2002), Santos (2007), Cabral (2008), Magalhães (2011), Amadori (2013) e Luzzardi (2015).

Este trabalho tem por objetivo a aplicação de uma metodologia de atualização bayesiana da capacidade de carga geotécnica das estacas do cais do Estaleiro Honório Bicalho, em Rio Grande (RS). A estimativa de capacidade de carga “a priori” teve como base os resultados de métodos semi-empíricos de previsão baseados em resultados de ensaios SPT (Standard Penetration Test), adaptados para incluir a variabilidade dos resultados do ensaio. Os registros documentados durante a cravação das estacas, interpretados através de uma fórmula dinâmica, foram utilizados para gerar a função de verossimilhança. A capacidade de carga atualizada (“a posteriori”) foi obtida combinando-se a estimativa subjetiva (“a priori”) com a estimativa objetiva (função de verossimilhança), através do teorema de Bayes.

2 DESCRIÇÃO DA OBRA

O Cais do Estaleiro Honório Bicalho é dividido em cinco plataformas: uma plataforma de load in/out, duas plataformas de montagem e duas plataformas de ligação (Figura 1). Conta com uma ponte de ligação entre o píer e a terra, possuindo uma junta de dilatação entre a primeira plataforma de ligação e a primeira plataforma de montagem.

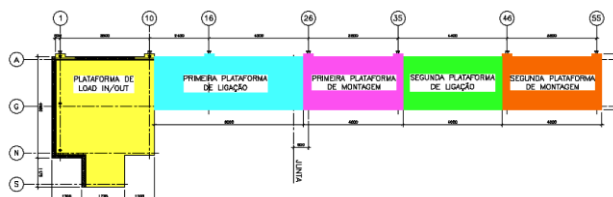


Figura 1. Planta do cais.

Na Figura 2 é mostrada uma seção transversal típica do cais.

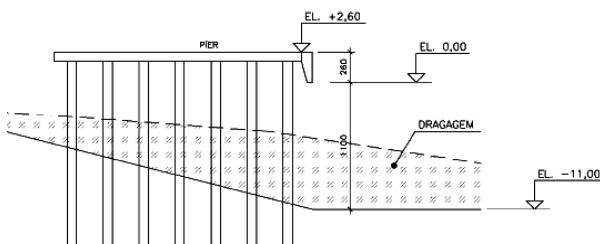


Figura 2. Seção transversal do cais.

O cais possui 373 estacas de concreto protendido, de seção transversal anelar, com comprimento de 39,0 m, possuindo diâmetro externo de 80 cm e diâmetro interno de 50 cm, com espessura de parede de 15 cm. Para armadura foram utilizadas 18 barras de 25 mm CA50 mais 12 cordoalhas de 12,7 mm CP-190 RB. O fck do concreto é superior a 40 MPa.

Conforme o projeto, considerando as combinações das ações sobre a estrutura, foram determinadas as cargas características máximas nas estacas, relacionadas conforme a plataforma, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Cargas características máximas nas estacas.

Plataforma	Força normal máxima (kN)
Load in/Load out	3438
Ligação 1	2638
Montagem 1	2336
Ligação 2	2407
Montagem 2	2461

O martelo de cravação utilizado na obra é da marca Junttan, modelo HHK 12 A, com peso do pilão de 117,72 kN e altura de queda de 1,20 m. Seu sistema de funcionamento é hidráulico de dupla ação, com impacto gerado pela ação da gravidade somada à aceleração hidráulica durante a queda.

Para a caracterização geotécnica do terreno, foram realizados ensaios de campo do tipo SPT (Standard Penetration Test) em 5 pontos ao longo do alinhamento cais, em cada uma das plataformas, possibilitando a construção de um perfil estratigráfico esquemático da região do cais (Figura 3).

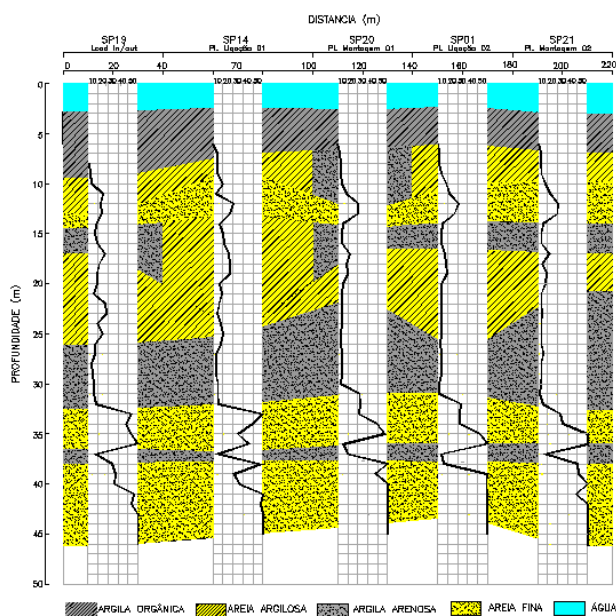


Figura 3. Perfil longitudinal no alinhamento do cais.

Durante a execução do estaqueamento, foi anotado o boletim de cravação de todas as estacas, bem como efetuada a medida de nega ao final da cravação, conforme preconiza a norma brasileira NBR 6122 (2010).

3 ESTIMATIVA “A PRIORI”

Na estimativa da capacidade de carga das estacas, com base nos resultados dos ensaios tipo SPT, adotaram-se dois métodos de previsão: Aoki e Velloso (1975) (com modificações propostas por Laprovitera, 1988, e Benegas, 1993), e Décourt e Quaresma (1978) (também Décourt et al., 1999).

A distribuição probabilística “a priori” da capacidade de carga foi estimada adotando-se a formulação descrita em Alves e Amadori (2012), onde a variabilidade (dispersão) dos valores de N_{SPT} (admitido como variável aleatória) foi incluída nas equações de previsão de Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978), através da aplicação do método FOSM (“First Order Second Moment”). A dispersão no valor de N_{SPT} pode refletir as incertezas associadas aos resultados do próprio ensaio, a variabilidade espacial do solo, bem como as incertezas associadas aos métodos de estimativa de capacidade de carga. Com base em dados publicados da literatura técnica (Baecher e Christian, 2008), foi adotado um coeficiente de variação CV (razão entre desvio padrão e média) de 50% para os valores de N_{SPT} .

Um vez que as fundações são constituídas por estacas de ponta aberta, admitiu-se por hipótese que as estacas não embucham durante a cravação. Portanto, a capacidade de carga geotécnica é composta por uma parcela de ponta (correspondente à área anelar da seção transversal da estaca), uma parcela de atrito lateral externo, e uma parcela de atrito lateral interno (oriunda da coluna de solo posicionada no interior da estaca). O atrito lateral interno foi estimado a partir do atrito externo, considerando-se a diferença entre os perímetros interno e externo, e também um deslocamento da coluna interna de solo em relação à superfície do leito natural. A cota superior da coluna interna de solo foi considerada igual a -10 metros. Admitiu-se também que o atrito unitário interno da estaca é igual a 60% do atrito unitário externo.

A cota de assentamento escolhida para a ponta das estacas foi aquela onde a capacidade de carga média era igual ou maior do que o

dobro da maior carga aplicada em cada estaca, em função da plataforma em que se localiza.

Nas Tabelas 2 e 3 apresentam-se os resultados da análise “a priori”, para os dois métodos de previsão adotados, em termos de elevação da ponta, média (μ_p), desvio padrão (σ_p) e coeficiente de variação (CV, razão entre desvio padrão e média) da capacidade de carga estimada “a priori”.

Tabela 2. Parâmetros da distribuição “a priori” – Método de Aoki & Velloso.

Plataforma	Elevação (m)	μ_p (kN)	σ_p (kN)	CV
Load in/Load out	-34,00	7431	1160	16%
Ligação 1	-33,00	6036	1033	17%
Montagem 1	-33,00	4697	792	17%
Ligação 2	-34,00	5646	1079	19%
Montagem 2	-34,00	5308	950	18%

Tabela 3. Parâmetros da distribuição “a priori” – Método de Décourt & Quaresma.

Plataforma	Elevação (m)	μ_p (kN)	σ_p (kN)	CV
Load in/Load out	-34,00	8063	1515	19%
Ligação 1	-33,00	6572	1362	21%
Montagem 1	-33,00	5539	1078	19%
Ligação 2	-33,00	5487	1113	20%
Montagem 2	-34,00	6107	1281	21%

Observa-se que as estimativas de profundidades de assentamento foram muito parecidas pelos dois métodos de previsão. Os coeficientes de variação obtidos também não diferiram muito, mas são um pouco menores pelo método de Aoki & Velloso.

4 FUNÇÃO DE VEROSSIMILHANÇA

A avaliação objetiva da capacidade de carga das estacas será realizada a partir das negas medidas ao final da cravação. O procedimento para definição da função de verossimilhança, a partir das negas medidas, se baseou na proposta de Guttormsen (1987) para estacas “offshore”. O procedimento se fundamenta na construção de curvas de cravabilidade, que são relações entre a resistência (estática) do solo à cravação e o inverso da nega (ou número de golpes por metro). Os métodos de construção de tais curvas

dependem de parâmetros dinâmicos relativos à estaca, ao solo e ao martelo de cravação.

A variabilidade da capacidade de carga da estaca é avaliada através de três curvas de cravabilidade: uma curva construída com parâmetros médios (curva “esperada”), uma curva construída com os valores médios dos parâmetros somados ao seu desvio padrão (“curva superior”) e uma curva construída com os valores médios dos parâmetros subtraídos de seu desvio padrão (“curva inferior”), como demonstrado na Figura 4.

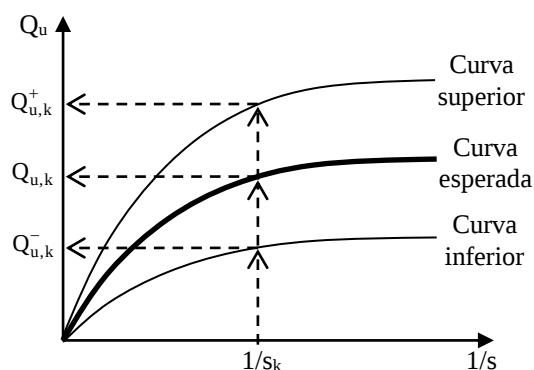


Figura 4. Curvas de capacidade de carga versus o inverso da nega.

Neste trabalho, o procedimento original proposto por Guttormsen (1987) foi levemente modificado. A partir dos valores de nega medidos ao final da cravação, obtém-se, para uma estaca “k”, a sua capacidade de carga esperada ($Q_{u,k}$), a sua capacidade superior ($Q_{u,k}^+$) e a sua capacidade inferior ($Q_{u,k}^-$). O valor médio da capacidade de carga estática (μ_L) será igual à média dos valores esperados da capacidade de carga de todas as estacas daquela área. Já a variância da capacidade de carga em uma determinada área (σ_L^2) será admitida como sendo a soma de duas variâncias parciais:

$$\sigma_L^2 = \sigma_{L,s}^2 + \sigma_{L,v}^2 \quad (1)$$

A parcela $\sigma_{L,s}^2$ traduz o efeito da heterogeneidade do terreno, sendo afetada pela variabilidade das negas medidas em uma determinada área de influência:

$$\sigma_{L,s}^2 = \frac{\sum_{k=1}^m (Q_{u,k} - \mu_L)^2}{m-1} \quad (2)$$

sendo m o número total de estacas situadas na área de influência.

A parcela $\sigma_{L,v}^2$ representa a variância paramétrica, relacionada às incertezas dos parâmetros adotados na construção das curvas de resistência. O valor de $\sigma_{L,v(k)}^2$ de cada estaca é estimado da seguinte forma:

$$\sigma_{L,v(k)}^2 = \left(\frac{Q_{u,k}^+ - Q_{u,k}^-}{2} \right)^2 \quad (3)$$

O valor de $\sigma_{L,v}^2$ de uma área de influência será igual ao valor médio de $\sigma_{L,v(k)}^2$ relativo a todas as estacas situadas naquela área.

Pode-se construir as curvas de cravabilidade através de dois métodos: simulações baseadas na teoria de propagação de ondas em estacas, ou adoção de fórmulas dinâmicas. Apesar da maior robustez e precisão dos métodos baseados na propagação de ondas, neste trabalho optou-se, por simplicidade, pela utilização da fórmula dinâmica atribuída a Weisbach (Jumikis, 1971):

$$Q_d = \frac{2 \cdot e_H \cdot W \cdot h}{s + \sqrt{s^2 + 2 \cdot e_H \cdot W \cdot h \cdot \frac{L}{E \cdot A}}} \quad (4)$$

onde Q_d é a resistência (dinâmica) mobilizada ao final da cravação, e_H é a eficiência do martelo de cravação, W é o peso do martelo, h é a altura de queda do martelo, s é a nega, L é o comprimento da estaca, E é o módulo de elasticidade do material que compõe a estaca, e A é a área da seção transversal da estaca.

No presente estudo, a fórmula original de Weisbach foi alterada, substituindo-se o comprimento real L pelo comprimento equivalente $L^* = \alpha \cdot L$, sendo α um fator de proporcionalidade, função do mecanismo de transferência de carga da estaca. Este fator pode variar entre 0,5 (estaca sem transferência de carga pela ponta) até 1,0 (estaca sem transferência de carga por atrito).

Além disso, foram introduzidos na fórmula dinâmica dois fatores de transformação da resistência dinâmica ao final da cravação (Q_d) em uma capacidade de carga estática de longo prazo (Q_u). O fator FT reflete o crescimento da capacidade de carga com o tempo (“set-up”), e o fator FD representa uma amplificação dinâmica, relacionada à razão entre as resistências mobilizadas na estaca por uma ação dinâmica e por uma ação estática.

Assim, a fórmula modificada de Weisbach pode ser escrita da seguinte forma:

$$Q_u = \frac{2 \cdot e_H \cdot W \cdot h}{s + \sqrt{s^2 + 2 \cdot e_H \cdot W \cdot h \cdot \frac{\alpha \cdot L}{E \cdot A}}} \cdot \frac{FT}{FD} \quad (5)$$

Os parâmetros considerados determinísticos na análise foram o peso do martelo (W), a altura de queda (h) e a área da estaca (A). Na Tabela 4 são mostrados os valores adotados para estes parâmetros.

Tabela 4. Parâmetros determinísticos adotados na fórmula dinâmica.

Parâmetro	Valor
W (kN)	117,72
h (m)	1,2
A (m ²)	0,305

O comprimento L das estacas também foi considerado um parâmetro determinístico, calculado em cada estaca com base nas cotas de topo e ponta registrados durante a cravação.

Os parâmetros considerados aleatórios na análise foram a eficiência do martelo (e_H), o módulo de elasticidade (E), o fator α , e os fatores de correção FT e FD. Na Tabela 5 são mostrados os valores máximo e mínimo concebidos para cada parâmetro, baseados em indicações da literatura e em avaliação criteriosa das características do subsolo.

Tabela 5. Parâmetros aleatórios adotados na fórmula dinâmica.

Parâmetro	Faixa de variação	
	Mínimo	Máximo
e_H	0,65	0,85
$E \text{ (kN/m}^2\text{)}$	30×10^6	32×10^6
α	0,7	0,8
FT	2,0	3,0
FD	1,5	2,0

O valor médio dos parâmetros aleatórios foi obtido pela média aritmética entre os valores extremos (máximo e mínimo). Já o desvio padrão dos parâmetros aleatórios foi estimado a partir da faixa de variação concebida (subtração entre o valor máximo e o valor mínimo). A “regra dos $n\text{-}\sigma$ ” admite que os valores de um determinado parâmetro aleatório normalmente distribuído têm uma determinada probabilidade de recair, em torno da média, a uma distância igual a n vezes o desvio padrão da amostra (Xu e Bian, 2015). É comum a adoção de $n = 3$, baseada no fato de que há 99,73% de probabilidade de que todos os valores do parâmetro recaiam na região compreendida por três desvios padrão em torno da média. Assim, o desvio padrão de um parâmetro poderia ser estimado dividindo-se a faixa de variação por 6.

Entretanto, há evidências de que a divisão da faixa de variação por 6 tende a subestimar o desvio padrão em grande parte dos casos (Christian e Baecher, 2001). Assim, no presente estudo, adotou-se a divisão da faixa de variação por 4, conforme sugestão de Duncan (2001).

Na Tabela 6 demonstram-se os parâmetros da função de verossimilhança em cada plataforma. Também é indicada a profundidade média alcançada pelas estacas de cada plataforma, após a cravação.

Tabela 6. Parâmetros para a função de verossimilhança.

Plataforma	Elevação média (m)	μ_L (kN)	σ_L (kN)	CV
Load in/Load out	-35,60	7133	1121	16%
Ligação 1	-35,42	7629	1022	13%
Montagem 1	-34,47	9072	815	9%
Ligação 2	-34,99	8613	784	9%
Montagem 2	-35,42	8433	865	10%

É possível observar que as capacidades médias obtidas através da função de verossimilhança, em geral, foram superiores às estimativas “a priori”. A exceção é a região da plataforma de Load in/Load out, onde a função de verossimilhança indicou capacidades menores do que as estimadas “a priori”. A dispersão da função de verossimilhança foi inferior à dispersão das estimativas “a priori”. As profundidades alcançadas foram superiores às estimadas, com diferenças entre 1 e 2 metros.

5 ESTIMATIVA “A POSTERIORI”

A estimativa de capacidade de carga “a posteriori” das estacas, através do Teorema de Bayes, combina as estimativas “a priori” (as quais representam as previsões da capacidade de carga das estacas, obtidas a partir dos métodos semi-empíricos), com a função de verossimilhança (obtida a partir dos resultados medidos durante e após a cravação das estacas).

Guttormsen (1987) apresenta as equações para atualização bayesiana da capacidade de carga de estacas, admitindo normalidade e independência entre as distribuições de probabilidade “a priori” e a função de verossimilhança:

$$\mu_U = \frac{\sigma_L^2 \cdot \mu_P + \sigma_P^2 \cdot \mu_L}{\sigma_L^2 + \sigma_P^2} \quad (6)$$

$$\sigma_U^2 = \frac{\sigma_L^2 \cdot \sigma_P^2}{\sigma_L^2 + \sigma_P^2} \quad (7)$$

onde μ_U é o valor médio atualizado e σ_U^2 é a variância atualizada da capacidade de carga estática das estacas. Os demais parâmetros já foram descritos anteriormente.

Guttormsen (1987) também propõe um “indicador de falha”, que, de certa forma, avalia a eficiência da atualização. O indicador é calculado da seguinte forma:

$$D = \frac{\mu_L - \mu_p}{\sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_p^2}} \quad (8)$$

Segundo Guttormsen (1987), um valor de D (em módulo) menor do que 1,5 indica uma atualização satisfatória da resistência oferecida durante a cravação. Valores superiores ao limite estabelecido indicam uma diferença acima do esperado entre as curvas “a priori” e de verossimilhança, o que poderia apontar um erro de avaliação em uma das distribuições. Nestes casos, é indicada uma reavaliação cuidadosa no sentido de explicar a diferença.

Nas Tabelas 7 e 8 encontram-se os resultados atualizados de capacidade de carga, adotando a estimativa “a priori” prevista pelos métodos de Aoki & Velloso e Décourt & Quaresma, respectivamente.

Tabela 7. Parâmetros da distribuição “a posteriori” – Método de Aoki & Velloso.

Plataforma	μ_U (kN)	σ_U (kN)	CV	D
Load in/Load out	7277	806	11%	-0,18
Ligação 1	6842	727	11%	1,10
Montagem 1	6821	568	8%	3,85
Ligação 2	7588	634	8%	2,23
Montagem 2	7015	640	9%	2,43

Tabela 8. Parâmetros da distribuição “a posteriori” – Método de Décourt & Quaresma.

Plataforma	μ_U (kN)	σ_U (kN)	CV	D
Load in/Load out	7462	901	12%	-0,49
Ligação 1	7248	817	11%	0,62
Montagem 1	7788	650	8%	2,61
Ligação 2	7578	641	8%	2,30
Montagem 2	7704	717	9%	1,50

Os resultados da atualização foram satisfatórios, de acordo com o critério de Guttormsen (1987), na análise das plataformas de Load in/Load out e Ligação 1. Nas demais plataformas, o indicador de falha foi superior ao limite estabelecido por Guttormsen (1987). Nestes casos, a função de verossimilhança apontou valores médios de capacidade de carga bem superiores aos previstos pelos métodos de estimativa “a priori”. O fato das profundidades atingidas na cravação terem sido de 1 a 2 metros

superiores às profundidades previstas “a priori” pode explicar esta discrepância. As dispersões obtidas “a posteriori” foram parecidas, na comparação entre os dois métodos de previsão.

Observa-se que as capacidades médias obtidas nas estimativas “a posteriori” ficam entre as médias das distribuições “a priori” e verossimilhança. Além disso, verifica-se uma dispersão atualizada inferior à das estimativas “a priori” e à da função de verossimilhança. Isto demonstra uma redução nas incertezas com o acréscimo de informações na análise Bayesiana.

6 CONCLUSÕES

O trabalho demonstrou a aplicação de uma metodologia bayesiana para atualização das capacidades de carga das estacas de um cais portuário, com base na combinação de estimativas “a priori” com observações de campo. Os resultados indicam uma redução na incerteza associada à capacidade de carga das estacas, induzindo um ganho de confiabilidade no projeto de fundações.

REFERÊNCIAS

- Ang, A.H-S. e Tang, W.H. (1984). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, Risk and Reliability*, New York, John Wiley, Vol. 2, 420 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010). *Projeto e Execução de Fundações*, NBR 6122, Rio de Janeiro, 91 p.
- Alves, A.M.L. e Amadori, T. (2012). Variância Estatística Associada a Métodos Semi-empíricos para Estimativa da Capacidade de Carga de Estacas, *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, No. 20, p. 61-67.
- Amadori, T. (2013). *Análise de Confiabilidade das Fundações da Obra de Ampliação do Cais do Terminal de Contêineres do Porto de Rio Grande (RS) Aplicando Metodologia Bayesiana*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal de Rio Grande, 155 p.
- Aoki, N. (2002). Probabilidade de Falha e Carga Admissível de Fundação por Estacas, *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, Vol. XIX, p. 48-64.
- Aoki, N., Velloso, D.A. (1975). An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles, *Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, Buenos Aires, Vol. 1, p. 367-376.

- Baecher, G.B., Christian, J. T. (2008). Spatial Variability and Geotechnical Reliability, In: *Reliability-based design in Geotechnical Engineering*, Kok-Kwang Phoon (Ed.), Taylor & Francis, pp. 76-133.
- Baecher, G.B., Rackwitz, R. (1982). Factors of Safety and Pile Load Tests, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 6, No. 4, p. 409-424.
- Benegas, E.Q. (1993). *Previsões para a Curva Carga-Recalque de Estacas a partir de SPT*, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 93 p.
- Cabral, E. V. (2008). *Contribuição à Confiabilidade de Estacas Cravadas através de um Estudo de Caso com Aplicação da Teoria Bayesiana*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 136 p.
- Christian, J.T., Baecher, G.B. (2001). Discussion on “Factor of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 8, p. 700–703.
- Décourt, L., Albiero, J.H., Cintra, J.C.A. (1999). Análise e Projeto de Fundações Profundas, In: *Fundações Teoria e Prática*, 2ª. Ed., Capítulo 8, Editora Pini, São Paulo, 751p.
- Décourt, L., Quaresma Filho, A. R. (1978). Capacidade de Carga a partir de valores de SPT, *VI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, Rio de Janeiro, Vol. 1, p. 45–53.
- De Mello, V.F.B. (2002). Reconstruindo as Bases para a Geotecnia Prática Comparativa Difundindo Estatística-Probabilidades (EP) Simples e Convidativas para Tudo, *XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, São Paulo, p. 1271–1294.
- Duncan, J.M. (2000). Factor of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 4, p. 307–316.
- Duncan, J.M. (2001). Closure on “Factor of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 8, p. 717–721.
- Guttormsen, T.R. (1987). Uncertainty in Offshore Geotechnical Engineering, *Application of Bayesian Theory to Pile Driving Predictions*, Research Report Societe Nationale Elf Aquitaine, NGI Report 85307-9.
- Hachich, W. (1998). *Modelos Matemáticos e Probabilistas em Engenharia Geotécnica – Uma Sistematização em Forma de Sonata*, Tese de Livre Docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Harr, M.E. (1987). *Reliability-based Design in Civil Engineering*, New York, McGraw-Hill, 400 p.
- Jumikis, A.R. (1971). *Foundation Engineering*, Intext Educational Publishers, New York, 828 p.
- Kay, J.N. (1976). Safety Factor Evaluation of Single Piles in Sand, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 92, No. 1, p. 1-39.
- Kay, J.N. (1977). Factor of Safety for Piles in Cohesive Soils, *9th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol. 1, p. 587-592.
- Lacasse, S., Guttormsen, T.R. e Goulois, A. (1990). Bayesian Updating of Axial Capacity of Single Pile, *5th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR'89)*, ASCE, p. 287-290.
- Lacasse, S., e Nadim, F. (1998). Risk and Reliability in Geotechnical Engineering, *4th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, St. Louis, p. 1172-1192.
- Laprovitera, H. (1988). *Reavaliação de Método Semi-empírico de Previsão da Capacidade de Carga de Estacas a partir de Banco de Dados*, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 231 p.
- Luzzardi, F. J. A. (2015). *Análise de Confiabilidade das Fundações do Cais do Estaleiro Honório Bicalho no Porto de Rio Grande (RS) Aplicando Metodologia Bayesiana*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 134 p.
- Magalhães, F. C. (2011). *Análise das Fundações da Obra de Modernização do Cais do Porto Novo de Rio Grande (RS) Aplicando Metodologia Bayesiana*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 162 p.
- Santos, M.S. (2007). *Inferência Bayesiana na Avaliação da Segurança de Fundações em Estacas de Deslocamento*, Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 157 p.
- Sidi, I.D. e Tang, W.H. (1987). Updating Friction Pile Capacity in Clay, *5th International Conference on Application of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering*, Vancouver, p. 938-945.
- Sugai, M. e Matsuo, M. (1993). The Control of Steel Pipe Pile Driving Based on Reliability Analysis of Bearing Capacity Estimation, *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 3, p. 40-53.
- Xu, Z., Bian, Z. (2015). Reliability Analysis and Design of Driven Piles Based on n - σ Criteria, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 20, p. 333–348.
- Zhang, L. e Tang, W.H. (2002). Use of Load Tests for Reducing Pile Length, *An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance*, Geotechnical Special Publication No. 116, p. 993-1005.