

Aplicação de Análise Probabilística ao Cálculo de Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua

Probabilistic Analysis of Bearing Capacity of Continuous Flight Auger Piles

Heitor Cardoso Bernardes

Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Campus Darcy Ribeiro, Brasília, DF, Brasil.

E-mail: heitor_cabe@hotmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2053-5240>

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 8, n. 1, p. 53-68, janeiro-junho, 2021 - ISSN 2358-6508

[Recebido: agosto 1º, 2019; Aceito: junho 20, 2020]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2021.v8i1.3459>

Endereço correspondente / Correspondence address

Alameda dos Carvalhos, Quadra 01, Lote 14, Jardins
Florença, Goiânia, GO, Brasil. CEP.: 74.351-011

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora: Aline Zanchet

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo verificar a aplicação de métodos semi-empíricos para o cálculo de capacidade de carga de estacas hélice contínua da fundação de uma obra de construção civil em Goiânia-GO, considerando uma abordagem probabilística. Para a verificação proposta, foram utilizados os métodos semi-empíricos desenvolvidos por Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Antunes e Cabral (1996), bem como o método probabilístico Monte Carlo (METROPOLIS; ULAM, 1949). A variabilidade do solo foi considerada através dos resultados de sondagens à percussão do tipo SPT. Os resultados foram comparados com provas de carga estáticas realizadas no local, permitindo a verificação da probabilidade de ruptura da estrutura de fundação para cada método semi-empírico avaliado. Dentre os métodos analisados, o proposto por Décourt e Quaresma (1978) foi o que apresentou uma distribuição de probabilidade mais próxima da verificada para as provas de carga, o que indica sua maior aptidão para o dimensionamento geotécnico de estacas hélice contínua sob as condições locais.

Palavras-chave: Análise Probabilística. Capacidade de carga. Estaca Hélice Contínua. Método Monte Carlo.

Abstract

The present paper verifies the application of semi-empirical methods to compute the bearing capacity of continuous flight auger piles built in Goiânia-GO, considering a probabilistic approach. The semi-empirical methods proposed by Aoki and Velloso (1975), Décourt and Quaresma (1978) and Antunes and Cabral (1996) were used together with the Monte Carlo method (METROPOLIS; ULAM, 1949) in a probabilistic approach. Soil variability was considered through the results of standard penetration tests. The results were compared with static pile load tests performed in situ, which allowed probabilistic analysis of failure for each semi-empirical method assessed. Among those analyzed, the Décourt and Quaresma (1978) method presented a probability distribution closer to the one computed using the pile load tests data, which indicate this method as the most appropriate for the geotechnical design of continuous flight auger piles under local conditions.

Keywords: Probabilistic analysis. Bearing capacity. Continuous flight auger piles. Monte Carlo Method.

1 Introdução

A escassez de parâmetros geotécnicos confiáveis e representativos, decorrente da falta de priorização da execução de ensaios de laboratório e campo, reduz a segurança das obras de engenharia. Este problema é aumentado quando considerada a abordagem determinística, amplamente empregada na prática da engenharia e adotada nas normas técnicas brasileiras vigentes. A incompatibilidade entre as melhores práticas e o tratamento usual das normas decorre da variabilidade intrínseca de parâmetros utilizados nos cálculos e verificações de projeto, característica notadamente marcante em estruturas geotécnicas, nas quais o solo apresenta-se como um material de construção dotado de significativa variabilidade natural.

Tal contexto torna interessante a aplicação da abordagem probabilística, que considera a variação dos parâmetros de cálculo por meio de distribuições de probabilidade que, por sua vez, permitem estimar probabilidades de falha, visando o gerenciamento de riscos das estruturas de engenharia. Apesar da abordagem probabilística aplicada a engenharia ser um conceito já consolidado, iniciado com os trabalhos pioneiros de Benjamim e Cornell (1970) e de Ang e Tang (1975), sua aplicação prática ainda é restrita, inclusive em situações que envolvem elevado grau de incerteza, como cálculo da capacidade de carga de fundações.

Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2019) o cálculo da capacidade de carga de estacas no projeto de fundações pode ser realizado por métodos teóricos, semi-empíricos ou provas de carga. Dentre as alternativas citadas, os métodos semi-empíricos são adotados na grande maioria dos casos, devido ao menor custo envolvido na obtenção dos parâmetros de entrada do projeto e pela facilidade e objetividade na aplicação das formulações matemáticas.

No contexto nacional, merecem destaque os métodos de cálculo de capacidade de carga de estacas propostos por Aoki e Velloso (1975), por Décourt e Quaresma (1978) e por Antunes e Cabral (1996). Tais métodos são baseados nos resultados de ensaios do tipo SPT (*Standard Penetration Test*), tendo sua aplicabilidade comprovada para estacas do tipo hélice contínua em diversos trabalhos científicos (AMANN, 2010; FRANCISCO et al., 2004; SOUSA et al., 2018).

Tendo em vista a variedade de métodos disponíveis e as diferenças inerentes a cada um, a utilização de um em detrimento do outro acaba ficando a cargo do engenheiro projetista, que geralmente toma a decisão considerando aspectos como a familiaridade com o método e a prática regional. Desta forma, a escolha inadequada do método utilizado para o cálculo de capacidade de carga pode resultar em projetos pouco econômicos, ou com algum grau de comprometimento do fator de segurança.

Este trabalho apresenta a aplicação do método probabilístico Monte Carlo (HAMMERSLEY; HANDSCOMB, 1964; METROPOLIS; ULAM, 1949) no cálculo da

capacidade de carga, por métodos semi-empíricos, de estacas do tipo hélice contínua monitorada construídas em uma obra de construção civil localizada na cidade de Goiânia-GO. Assim, tem-se o objetivo de verificar a probabilidade de ruptura e a adequação de cada método semi-empírico analisado aos resultados de provas de carga estáticas realizadas na mesma obra, permitindo que a escolha do método de dimensionamento geotécnico de estacas seja realizada a partir de um critério técnico e objetivo.

2 Métodos probabilísticos aplicados a capacidade de carga de estacas

Lisboa (2008) aplicou o método da aproximação de Primeira Ordem da Variância – *First Order Second Moment* (FOSM) (CHRISTIAN; LADD; BAECHEER, 1992; HASOFER; LIND, 1974) – para analisar a influência de cada parâmetro de entrada, no cálculo da capacidade de carga de estacas raiz, pelo método de Décourt e Quaresma (1978). Os resultados foram comparados com provas de carga estáticas, que permitiram verificar que o parâmetro dominante na confiabilidade do cálculo da carga de ruptura é o índice de penetração médio, ao longo do fuste da estaca, que correspondeu a uma variância entre 65% e 90% da capacidade de carga calculada.

Zhang e Chen (2012) analisaram os efeitos da variabilidade espacial dos resultados de ensaios do tipo SPT no cálculo da capacidade de carga de estacas pré-moldadas cravadas em areia, por meio da aplicação do método FOSM. Os autores ressaltam que para distâncias entre 0,5 m e 3 m, medidas entre o local da sondagem e o centro da estaca, o índice de penetração médio, tanto ao longo do fuste quanto na região da base da estaca, apresentam um coeficiente de correlação entre 0,3 e 0,7, que é função da relação entre o comprimento e o diâmetro da estaca. Concluiu-se que métodos probabilísticos aplicados ao cálculo da capacidade de carga de estacas cravadas devem considerar a correlação citada, sob risco de subestimar a probabilidade de ruptura das estacas, em uma ordem de magnitude (ZHANG; CHEN, 2012).

Husain (2016) aplicou o método probabilístico Monte Carlo para considerar a variabilidade do peso específico e do ângulo de atrito do solo no cálculo da capacidade de carga de estacas isoladas, moldadas “*in loco*”, pelo método teórico de Bowles (1996). Os resultados da capacidade de carga seguiram uma distribuição log-normal, apresentando como fator dominante do cálculo da capacidade de carga o ângulo de atrito do solo. A influência verificada em decorrência da variabilidade do peso específico do solo não foi significativa.

Cosic et al. (2016) e Wyjadlowski et al. (2018) utilizaram abordagens probabilísticas para analisar a confiabilidade do método de cálculo de capacidade de carga de estacas proposto pelo Eurocode 7 (EN 1997-1:2004), que possui fundamentação semi-empírica e é baseado nos resultados de ensaios de piezocone.

As análises incluíram a influência da profundidade da estaca, permitindo calcular o aumento na probabilidade de falha da estaca em situações adversas, como no caso da profundidade de execução não atingir a profundidade prevista em projeto (WYJADLOWSKI; BAGIŃSKA; REINER, 2018).

Quanto aos métodos utilizados para análises probabilísticas, tem-se o método Monte Carlo (MMC) como o mais robusto dentre outros métodos alternativos, como o FOSM ou o Método das Estimativas Pontuais (PEM), proposto por Rosenblueth (1975). A razão para isso está no fato do MMC ser capaz de fornecer uma solução numérica para a distribuição de probabilidade da variável de engenharia dependente, considerando parâmetros (variáveis independentes) que apresentam variabilidades próprias (ASSIS et al., 2001).

A principal desvantagem do MMC está no processo de convergência da função de distribuição de probabilidade, que exige um grande número de simulações aleatórias para aproximar o comportamento amostral, gerado no método, para o populacional. Entretanto, o método pode ser associado à técnica de cadeias de Markov (NAYLOR; MUDD; YOO, 2010) para um processo de amostragem mais eficiente, otimizando o tempo de processamento gasto nas análises. Luo e Dong (2019) utilizaram este procedimento para a análise de confiabilidade de um extenso banco de dados de capacidade de carga de estacas, incluindo 107 estacas escavadas e 151 estacas cravadas.

3 Metodologia

A obra analisada consiste em um shopping center construído no município de Goiânia-GO, com 4 pavimentos e aproximadamente 5800 m² de área de projeção da construção em planta. O edifício foi concebido em estrutura metálica e sua fundação projetada em blocos sobre estacas tipo hélice contínua monitorada, com 40 cm de diâmetro e 21 m de comprimento.

3.1 Investigação Geotécnica

A investigação geotécnica local consistiu na realização de dez sondagens do tipo SPT. Todas as sondagens indicam um perfil de solo composto por argila arenosa amarela, com diferentes consistências, da superfície a até 27 metros de profundidade. As sondagens não atingiram camadas impenetráveis à percussão, e o nível d'água foi verificado a 5 metros de profundidade. A obra ainda contou com a realização de cinco provas de carga estáticas (PCE), levadas até a ruptura ou até duas vezes a carga de trabalho da estaca, sendo esta igual a 750kN.

Para determinação das cargas de ruptura das estacas (Q_u) foi utilizado o método de extrapolação proposto por Van der Veen (1953). A carga de ruptura foi

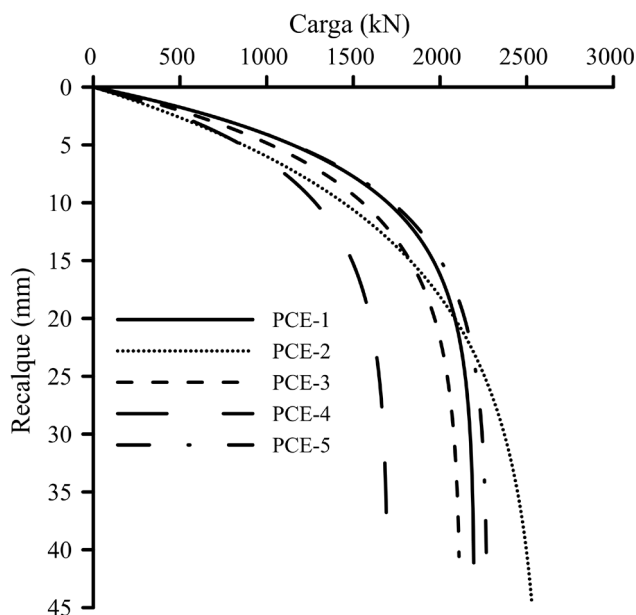
adotada como sendo o valor referente a um recalque igual a 10% do diâmetro da estaca (TERZAGHI, 1943), conforme mostra a Tabela 1. A escolha deste critério, em detrimento do proposto pela NBR 6122 (ABNT, 2019), decorreu da adoção de métodos semi-empíricos que utilizam o mesmo critério.

Tabela 1. Carga de ruptura das provas de carga

PCE	Q_u (kN)
12	2194
2	2500
3	2110
4	1694
5	2267

Os resultados das provas de carga, e suas respectivas cargas de ruptura, podem ser verificados na Figura 1.

Figura 1. Resultados das cinco provas de carga estáticas



3.2 Análise Estatística - Probabilística

Devido aos valores do índice de penetração (N_{spt}) serem crescentes com a profundidade, optou-se por calcular as distribuições de frequência, as medidas de tendência central e as medidas de variação para três camadas, de espessuras iguais a 6 m (0 m a -6 m), 11 m (-6 m a -17 m) e 4 m (-17 m a -21 m). A definição das camadas foi realizada com base no tipo de solo e na variação dos valores de índice de penetração. A definição deste perfil de solo também teve como objetivo reduzir o número de variáveis independentes envolvidas nas simulações da análise probabilística, sem comprometer a aderência dos dados às distribuições de probabilidade adotadas. Para a determinação

da capacidade de carga da base da estaca, foi considerada uma amostra referente aos valores de N_{spt} medidos a profundidades iguais a 21 m, 22 m e 23 m.

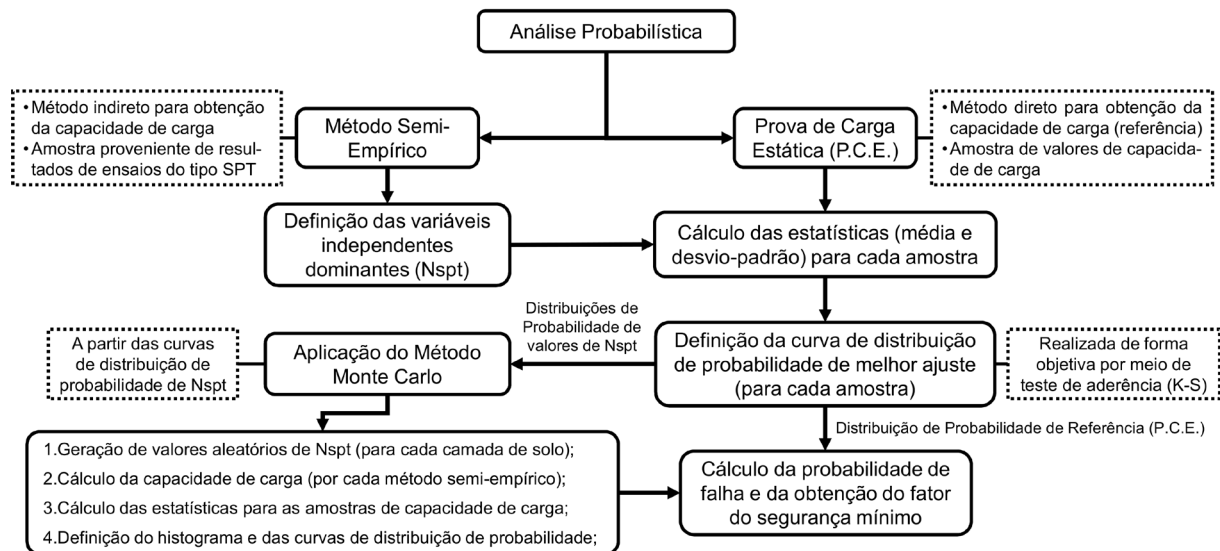
Devido a sua aplicabilidade a pequenas amostras (SENGER; ÇELIK, 2013), o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (KOLMOGOROV, 1933) foi utilizado para verificar a aderência entre as distribuições de probabilidade testadas e os dados amostrais de N_{spt} . As estatísticas referentes às provas de carga estáticas (PCE) também foram calculadas, e assim tiveram sua distribuição de probabilidade definida e aderência verificada pelo teste K-S.

De posse das distribuições de probabilidade do N_{spt} para cada camada definida ao longo da estaca, foram realizadas simulações probabilísticas para o cálculo da capacidade de carga pelos métodos semi-empíricos de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Antunes e Cabral (1996). As simulações foram realizadas pelo Método Monte Carlo, seguindo cinco etapas principais, de forma similar ao proposto por Husain (2016):

- I. Definir o problema em termos das variáveis independentes dominantes – N_{spt} , conforme verificado por Lisboa (2008) – e determinar suas respectivas distribuições de probabilidade.
- II. Gerar valores aleatórios de N_{spt} por camada.
- III. Calcular, de forma determinística, a capacidade de carga da estaca pelos valores aleatórios de N_{spt} gerados pelo método Monte Carlo, para cada camada do perfil de solo.
- IV. Extrair os resultados de capacidade de carga para N simulações e gerar as estatísticas, o histograma e a distribuição de probabilidade referente à capacidade de carga.
- V. Executar a sequência de etapas para os três métodos semi-empíricos escolhidos.

A metodologia adotada no presente trabalho, incluindo as cinco etapas supracitadas, segue representada pelo fluxograma exposto na Figura 2.

Figura 2. Fluxograma representativo da metodologia utilizada



4 Análise dos resultados

4.1 Distribuição de Probabilidade – SPT

Após o tratamento estatístico dos dados foram verificados coeficientes de variação entre 12% e 54%, em concordância com os valores propostos pela literatura, entre 15% e 53,5%, (KULHAWY, 1992; KWAK et al., 2010; UZIELLI, 2008).

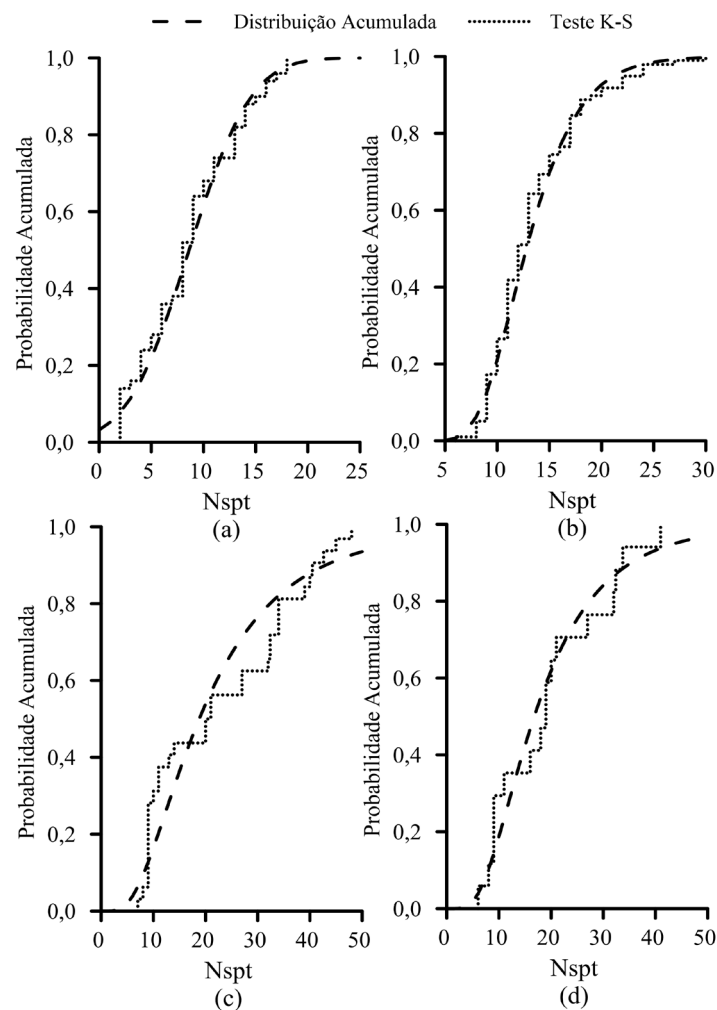
As distribuições de probabilidade utilizadas para representar a variabilidade dos dados de Nspt, por camada, estão listadas na Tabela 2. O critério utilizado para a definição das distribuições listadas na Tabela 2 foi o teste de aderência K-S, a um nível de significância igual a 5%. Os valores de média (μ), desvio padrão (δ) e a comparação entre distância máxima ($D_{m\acute{a}x}$) e a distância crítica (D_{cr}), calculados pelo teste K-S, podem ser verificados na Tabela 2.

Tabela 2. Média, desvio padrão e distâncias do teste K-S

Camada / Distribuição	μ	δ	$D_{m\acute{a}x}$	D_{cr}
I / Normal	8,62	4,66	0,108	0,188
II / Log-Normal	2,55	0,31	0,122	0,135
III / Log-Normal	2,93	0,65	0,164	0,234
Base / Log-Normal	2,82	0,58	0,151	0,318

As distribuições de probabilidade acumuladas com os testes K-S das camadas I, II, III e da base da estaca podem ser verificadas, respectivamente, nas Figuras 3a, 3b, 3c e 3d.

Figura 3. Distribuição de probabilidade acumulada e teste K-S para as camadas I (a), II (b), III (c) e para a base da estaca (d)

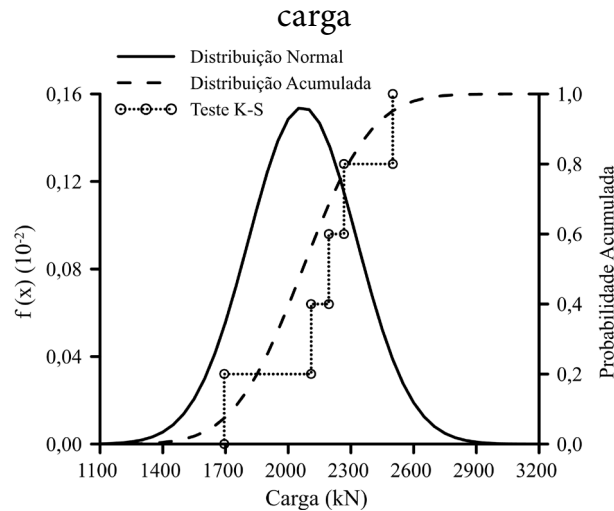


4.2 Distribuição de Probabilidade – PCE

Os dados de carga de ruptura obtidos através das provas de carga estáticas foram representados por uma distribuição normal de probabilidade, conforme exposto na Figura 4. A distribuição permite inferir uma probabilidade de 95% de que os valores de carga de ruptura para as estacas da obra permaneçam entre 1550 kN e 2565 kN.

O teste de aderência foi realizado pelo método K-S. A Figura 4 mostra o bom ajuste entre a distribuição de probabilidade acumulada e a distribuição calculada pelo teste, o que pode ser confirmado pelo cálculo das distâncias $D_{m\acute{a}x}$ e D_{cr} . Considerando um nível de confiança igual a 5%, o $D_{m\acute{a}x}$ obtido pelo teste foi igual a 0,149, menor que o $D_{cr} = 0,563$ para amostra contendo 5 elementos.

Figura 4. Distribuição de probabilidade normal e teste K-S realizados para as provas de carga



4.3 Análise probabilística - Método Monte Carlo

Foram realizadas 20,9 milhões de simulações para o cálculo de capacidade de carga por cada método semi-empírico, de modo a garantir um nível de confiança igual a 90%. As simulações apresentaram resultados bem ajustados à distribuição log-normal, conforme pode ser verificado nas Figuras 5, 6 e 7 para, respectivamente, os métodos de Décourt e Quaresma (1978), Antunes e Cabral (1996) e Aoki e Velloso (1975). A aderência da distribuição log-normal foi verificada pelo teste K-S nos três casos.

A Figura 5 indica que o método de Décourt-Quaresma (1978) apresentou capacidade de carga média ligeiramente maior, igual a 1563 kN. As Figuras 6 e 7 indicam distribuições de probabilidade similares, com menores valores médios de capacidade de carga, iguais a, respectivamente, 1285 kN e 1190 kN.

Figura 5. Histograma e distribuição de probabilidade considerando o método de Décourt-Quaresma (1978)

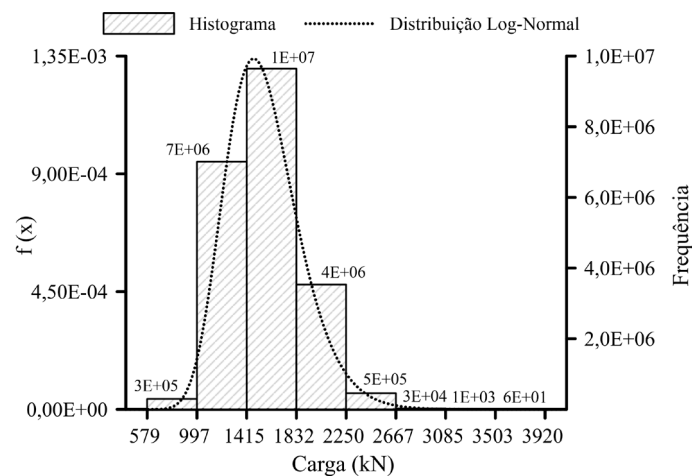


Figura 6. Histograma e distribuição de probabilidade considerando o método de Antunes e Cabral (1996)

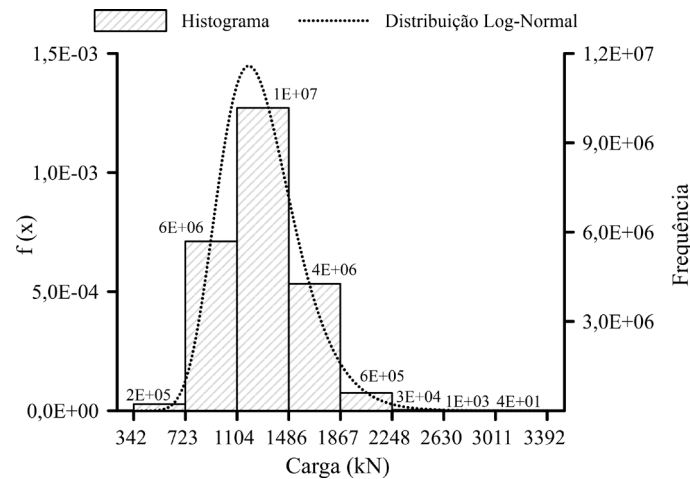
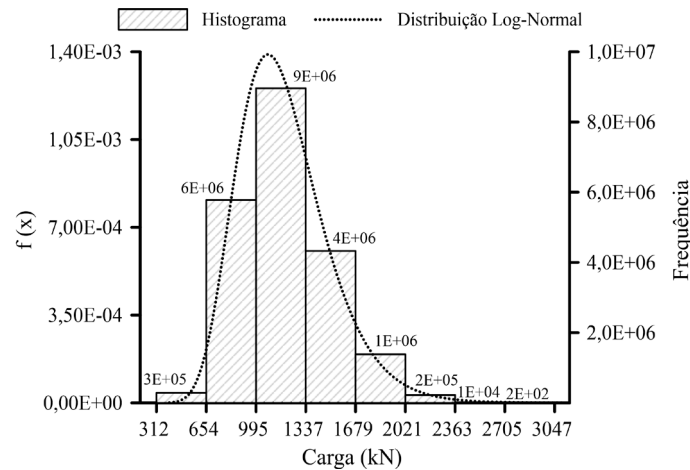


Figura 7. Histograma e distribuição de probabilidade considerando o método de Aoki e Velloso (1975)

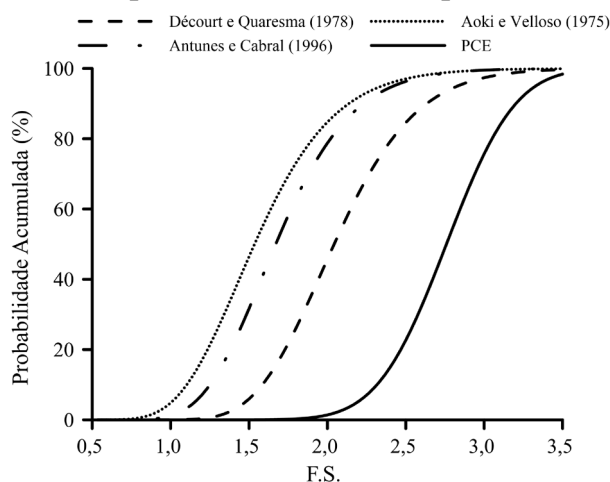


Considerando a amplitude da variação da capacidade de carga obtida pelas provas de carga (entre 1550 kN e 2565 kN, com 95% de confiança) a Tabela 3 representa a probabilidade do cálculo da capacidade de carga, por cada método analisado, corresponder à amplitude verificada. Todos os métodos apresentaram resultados conservadores, com capacidades de carga médias menores que as observadas nos ensaios de prova de carga. O método de Décourt e Quaresma (1978) foi o que apresentou resultados mais próximos aos verificados em campo, com uma probabilidade de 47,2% de apresentar capacidade de carga dentro da faixa de maior probabilidade da PCE.

Tabela 3. Probabilidade da capacidade de carga da estaca permanecer entre 1550 kN e 2565 kN

Método Semi-empírico	Probabilidade
Décourt e Quaresma (1978)	47,2%
Antunes e Cabral (1996)	17,2%
Aoki e Velloso (1975)	12,4%

A Figura 8 mostra a evolução da probabilidade de ruptura para cada método conforme o fator de segurança (F.S.) contra ruptura geotécnica. Para o cálculo do fator de segurança foi considerada uma carga de trabalho para as estacas igual a 750 kN (conforme adotado em projeto).

Figura 8. Probabilidade acumulada dos fatores de segurança por cada método analisado e para os resultados das provas de carga

Apesar de todos os métodos apresentarem resultados conservadores, o que é comum em métodos semi-empíricos, o método de Décourt e Quaresma (1978) foi o que mais se aproximou dos resultados obtidos nas provas de carga. Os resultados da Figura 8 foram tabelados (Tabela 4) quanto à probabilidade de falha ($F.S. < 1$) e quanto à probabilidade da obra atingir o fator de segurança mínimo estabelecido por norma para o projeto em questão (maior ou igual a 1,6), para cada método analisado e para as provas de carga.

Tabela 4. Probabilidade de falha e probabilidade de obtenção do fator de segurança mínimo

Método Semi-empírico	F.S. < 1	F.S. $\geq 1,6$
Décourt-Quaresma (1978)	0,015 %	89,1 %
Antunes e Cabral (1996)	1,139 %	57,6 %
Aoki e Velloso (1975)	4,814 %	43,6 %
PCE	$1,8 \times 10^{-5}$ %	99,9 %

Os resultados relativos a probabilidade de falha e ao alcance do fator de segurança mínimo confirmam o método de Décourt e Quaresma (1978) como o mais apropriado para cálculo da capacidade de carga das estacas da obra analisada. O referido método também é o único a apresentar probabilidade de falha coerente com limites reportados na literatura, entre 0,01% (LACASSE et al., 2013) e 0,1% (WHITMAN, 1984) para obras de fundação. As maiores probabilidades de falha verificadas para os métodos de Antunes e Cabral (1996) e Aoki e Velloso (1975) indicam que os métodos apresentaram resultados excessivamente conservadores. Desta forma, caso fossem utilizados no dimensionamento das estacas, conduziriam a maiores comprimentos de estaca, aumentando a capacidade de carga das mesmas de forma desnecessária.

5 Conclusão

O presente trabalho, ao trazer um caso de aplicação da abordagem probabilística ao cálculo de capacidade de carga de estacas hélice contínua monitorada, por métodos semi-empíricos, torna-se de significativo interesse à comunidade geotécnica regional, especialmente por ser oriundo de investigações geotécnicas e provas de carga realizadas na região Centro-Oeste. A metodologia utilizada considerou como variáveis dependentes os valores de índice de penetração N_{spt} em diferentes camadas do perfil de solo, conforme os dados geotécnicos disponíveis.

Os resultados indicam que o método semi-empírico de Décourt e Quaresma (1978) é o mais apropriado para o cálculo da capacidade de carga de estacas tipo hélice contínua, em perfis de solo típicos como o da obra analisada. A probabilidade de falha para o referido método e para as provas de carga foram inferiores ao limite de 1 para 1000 sugerido por Whitman (1984).

Os resultados demonstram a importância da aplicação dos métodos estatísticos-probabilísticos para verificar a aderência dos modelos de cálculo da engenharia a cada situação particular. Tal fato é especialmente importante na geotecnia, área na qual a variabilidade de parâmetros é muito significativa. Na obra analisada, foi verificada que a adoção de diferentes métodos semi-empíricos pode levar a projetos pouco econômicos ou com redução dos fatores de segurança.

Recomenda-se que a metodologia aplicada seja utilizada por profissionais da área, auxiliando na tomada de decisão e na implantação dos conceitos de gestão de risco em engenharia geotécnica, sendo uma alternativa vantajosa à tradicionalmente adotada abordagem determinística.

Referências

- AMANN, K. A. P. *Metodologia semi-empírica unificada para a estimativa da capacidade de carga de estacas*. São Paulo, 2010. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- ANG, H. A. S.; TANG, W. H. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- ANTUNES, W. R.; CABRAL, D. A. Capacidade de carga em estacas hélice contínua. In: III SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA, São Paulo, 1996. *Anais...* São Paulo, 1996.
- AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles. In: V PAN-AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING - PACSMFE, Buenos Aires, 1975. *Anais...* Buenos Aires, 1975.
- ASSIS, A. P. et al. *Métodos estatísticos aplicados à Geotecnia*. Publicação GAP-002/2001, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. *NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro, 2019. 108 p.
- BENJAMIN, J. R.; CORNELL, C. A. *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*. New York: McGraw Hill Company, 1970.
- BOWLES, J. *Foundation Analysis and Design*. 5th. ed. Singapore: McGraw Hill Company, 1996.
- CHRISTIAN, J. T.; LADD, C. C.; BAECHER, G. B. Reliability and Probability in Stability Analyses. In: II SPECIALTY CONFERENCE ON STABILITY AND PERFORMANCE OF SLOPES AND EMBANKMENTS, New York, 1992. *Anais...* New York: ASCE, 1992.
- COSIC, M. et al. Probabilistic analysis of bearing capacity of piles with variable parameters in CPT test and calculation according to the requirements of Eurocode 7 (EN 1997-1: 2004) regulations. *Structural Integrity and Life*, v. 16, n. 1, p. 25-34, 2016.
- DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. Capacidade de Carga de Estacas a Partir de Valores de SPT. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES - COBRAMSEF, Rio de Janeiro, 1978. *Anais...* Rio de Janeiro, 1978.
- EN 1997-1:2004, Eurocode 7: Geotechnical Design - Part 1: General Rules, Brussels, Belgium, p.171, 2004.
- FRANCISCO, G. M. et al. Uma avaliação de métodos de previsão da capacidade de carga de estacas hélice contínua. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS - SEFE, São Paulo, 2004. *Anais...* São Paulo, 2004.
- HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. *Monte Carlo Methods*. London: Methuen & Co., 1964.
- HASOFER, A. M.; LIND, N. C. An exact and invariant first-order reliability format. *Journal of Engineering Mechanics Division*, v. 100, n. 1, p. 111-121, 1974.

- HUSAIN, A. A. Probabilistic Study for Single Pile in Cohesionless Soil Using Monte Carlo Simulation Technique. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 7, n. 2, p. 628–633, 2016.
- KOLMOGOROV, A. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *G. Ist. Ital. Attuari*, v. 4, p. 83–91, 1933.
- KULHAWY, F. H. On the evaluation of soil properties. *ASCE Geotechnical Special Publication*, n. 31, p. 95–115, 1992.
- KWAK, K. et al. Reliability-based calibration of resistance factors for static bearing capacity of driven steel pipe piles. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 47, n. 5, p. 528–538, 2010.
- LACASSE, S. et al. Reliability of Axial Pile Capacity Calculation Methods. In: GÉOMONTRÉAL, Montreal, 2013. *Anais...* Montreal: Canadian Geotechnical Society, 2013.
- LISBOA, E. G. Avaliação probabilística de determinação da capacidade de carga pelo método Décourt-Quaresma. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA - COBRAMSEG, Búzios, 2008. *Anais...* Búzios, Rio de Janeiro: ABMS, 2008.
- LUO, Z.; DONG, F. Statistical Investigation of Bearing Capacity of Pile Foundation based on Bayesian Reliability Theory. *Advances in Civil Engineering*, v. 2019, n. 9858617, p. 7, 2019.
- METROPOLIS, N.; ULAM, S. The Monte Carlo method. *Journal of the American Statistical Association*, v. 44, p. 335–341, 1949.
- NAYLOR, M.; MUDD, S.; YOO, K. Markov chain Monte Carlo (MCMC) inversion of hillslope elevation and soil thickness data for the baselevel history. *Egu General Assembly*, v. 12, p. 8745, 2010.
- ROSENBLUETH, E. Point estimates for probability moments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 72, n. 10, p. 3812–3814, 1975.
- SENGER, O.; ÇELIK, A. K. A Monte Carlo simulation study for Kolmogorov-Smirnov two-sample test under the precondition of heterogeneity: upon the changes on the probabilities of statistical power and type I error rates with respect to skewness measure. *Journal of Statistical and Econometric Methods*, v. 2, n. 4, p. 1–16, 2013.
- SOUSA, T. C. et al. Análise de Métodos Semi-Empíricos para o Cálculo da Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua Monitorada em Obras de Fortaleza. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA - COBRAMSEG, Salvador, 2018. *Anais...* Salvador, Bahia: ABMS, 2018.
- TERZAGHI, K. *Theoretical soil mechanics*. New York: Wiley, 1943.
- UZIELLI, M. Statistical analysis of geotechnical data. In: III INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE CHARACTERIZATION, Taipei, 2008. *Anais...* Taipei, 2008.
- VAN DER VEEN, C. Bearing capacity of a pile. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Zurich, 1953. *Anais...* Zurich, 1953.

WHITMAN, R. V. Evaluating calculated risk in Geotechnical Engineering. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 110, p. 145–188, 1984.

WYJADLOWSKI, M.; BAGINSKA, I.; REINER, J. Probabilistic assessment of pile capacity based on CPTu probing including random pile foundation depth. *MATEC Web of Conferences - Theoretical Foundation of Civil Engineering*, v. 196, n. 01058, p. 1–8, 2018.

ZHANG, L.; CHEN, J. Effect of spatial correlation of standard penetration test (SPT) data on bearing capacity of driven piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 49, p. 394–402, 2012.