

Análise de Métodos Baseados no SPT para Previsão de Capacidade de Carga à Tração de Fundações por Estacas Helicoidais

Caio César de Sousa Oliveira

Mestrando, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, caio.cesar.oliveira@usp.br

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

Profª Titular, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, chctsuha@sc.usp.br

João Manoel Sampaio Mathias dos Santos Filho

Pós-doutorando, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, jmsmfilho@sc.usp.br

Rafael de Barros Aranha Piccolo

Engenheiro de Projetos, Neoenergia, Campinas, Brasil, rafael.piccolo@neoenergia.com

RESUMO: As estacas helicoidais no Brasil vêm sendo amplamente utilizadas como fundações de torres de linhas de transmissão de energia para resistir a carregamentos de tração. O procedimento mais utilizado para estimar a capacidade de carga dessas estacas é a correlação empírica com o torque final de instalação. Entretanto, as correlações de torque disponíveis na literatura normalmente dependem da instalação e sua aplicação não permite que a resistência seja estimada com precisão única e exclusivamente na fase de projeto. Adicionalmente, métodos para estimar a capacidade de carga dessas estacas com base em ensaios *in situ*, como o SPT e o CPT, são raros. Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar o desempenho preditivo de dois métodos de projeto baseados no SPT: Kanai (2007) e Perko (2009). Tais métodos foram aplicados a um banco de dados de provas de carga estática à tração realizadas em estacas helicoidais instaladas em 11 locais diferentes no Brasil. As estatísticas dos valores da razão entre capacidade de carga medida e calculada como média, coeficiente de variação e distribuições de probabilidade foram determinadas e, de modo geral, os métodos baseados nos resultados do ensaio SPT avaliados apresentaram um desempenho insatisfatório nas previsões das capacidades de carga das fundações analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, estacas helicoidais, prova-de-carga, ensaio SPT, previsão de capacidade de carga

ABSTRACT: Helical piles in Brazil have been widely used as foundations for power transmission line towers to resist tensile loads. The most common method used to estimate the load capacity of these piles is empirical correlation with the final installation torque. However, torque correlations available in the literature typically rely on the installation process, and their application does not allow for precise estimation of resistance solely during the design phase. Additionally, methods to estimate the load capacity of these piles based on *in situ* tests, such as SPT and CPT, are rare. In this context, this study aims to evaluate the predictive performance of two SPT-based design methods: Kanai (2007) and Perko (2009). These methods were applied to a database of static tensile load tests conducted on helical piles installed at 11 locations in Brazil. Statistics of load capacity measured by the calculated mean, coefficient of variation, and probability distributions were determined, and overall, the SPT-based methods evaluated showed poor performance in predicting the load capacities of the analyzed piles.

KEYWORDS: Foundations, helical piles, pile load test, SPT test, pile capacity prediction

1. INTRODUÇÃO

Estacas helicoidais ou tirantes helicoidais (se usadas apenas para resistir a cargas de tração), também conhecidas como estacas parafusadas, são compostas por uma ou mais chapas helicoidais soldadas a uma haste de aço (Figura 1). As estacas são compostas por uma seção guia a qual demais seções de extensão são emendadas para atingir as profundidades de projeto necessárias. Este tipo de estaca é “aparafusada” ao solo através da aplicação de um torque no topo da haste, e penetra no solo de forma suave e contínua.



Figura 1. Estacas helicoidais (a), instalação (b), e prova de carga à tração (c).

Nas últimas décadas, o uso de fundações helicoidais tem aumentado devido a diferentes vantagens, tais como boa resistência a cargas de compressão e de tração, efeito de ancoragem das hélices, instalação simples e rápida que causa mínima perturbação em seu entorno, adaptabilidade para trabalho em espaço confinado, fácil instalação de estacas inclinadas, controle da instalação via torque, instalação abaixo do nível d'água, bom desempenho em condições sísmicas e cíclicas, facilidade de reciclagem e reutilização, etc. Embora o uso das estacas helicoidais esteja aumentando a cada dia, ainda há a necessidade de métodos de projeto mais confiáveis e precisos para estimar a capacidade de carga à tração deste tipo de fundação.

Os métodos de projeto existentes para estacas helicoidais são baseados em modelos de transferência de carga e parâmetros de resistência do solo. Métodos relacionando a capacidade axial dessas estacas com ensaios *in situ* ainda são escassos. Além do mais, os métodos existentes como os baseados no SPT ainda são pouco eficientes para os solos brasileiros e o aprimoramento desses métodos pode ser atingido via coleta e calibração através do processamento de dados, possibilitando assim uma melhor precisão das previsões de resistências das estacas durante a fase de projeto.

Por conseguinte, este estudo tem como objetivo analisar os métodos propostos por Kanai (2007) e Perko (2009), ambos fundamentados em resultados de ensaio SPT, a fim de avaliar a precisão de suas previsões em comparação com dados obtidos de provas de carga estática de tração realizadas em estacas helicoidais instaladas em 11 locais do Brasil. Para tal análise, foram consideradas estacas instaladas verticalmente, com uma profundidade relativa (H/D) superior a 5 e equipadas com 3 hélices. Optou-se por esse número de hélices para eliminar a influência dessa variável do banco de dados, facilitando a identificação de possíveis padrões e tendências das outras variáveis.

2. MÉTODOS DE PROJETO PARA CAPACIDADE À TRAÇÃO DE ESTACAS HELICOIDAIS BASEADOS NO SPT

Os métodos avaliados neste estudo, fundamentados no ensaio SPT, consideram o mecanismo das capacidades individuais das hélices, possibilitando sua aplicação às estacas fabricadas no Brasil, as quais são compostas por hélices espaçadas a uma distância de três vezes seu diâmetro.

2.1. Método de Kanai (2007)

Kanai (2007) realizou uma série de provas de carga instrumentadas tanto à tração quanto compressão em estacas de quatro hélices. Com base nas medições de campo, o autor propôs uma equação empírica baseada

no valor de N do SPT cuja capacidade de carga à tração das estacas helicoidais (Q_u) é composta pela soma das resistências individuais de cada hélice e da resistência da haste, conforme segue:

$$Q_u = \sum_{i=1}^n q_{wi} \cdot A_{wi} + U \sum_{j=1}^z L_j f_j \quad (1)$$

Onde: q_{wi} é a capacidade última da hélice = $a \cdot N$ (kPa)

A_{wi} é a área efetiva resistida pela hélice (m^2)

i é o índice da hélice (1 a n , onde n é o número de hélices da estaca)

U é o perímetro da haste (m)

L_j é o comprimento efetivo da haste onde há contribuição na resistência (m)

f_j é o máximo atrito unitário da haste = $b \cdot N$ (kPa)

j é o número de camadas de solo ao longo do comprimento efetivo da haste

a , b são coeficientes de capacidade de carga do solo.

N é o valor de N do SPT (o autor não comenta a energia utilizada, portanto, foi assumido valores de N60)

Tabela 1. Valores para os coeficientes a e b para correlação do valor de N do SPT (Kanai, 2007)

a		b	
1ª hélice (ponta)	2ª a 4ª hélices	haste	
70 (areia, cascalho)	50 (areia, argila)	1 (areia)	3 (argila)

Em sua abordagem, o autor considerou os efeitos da perturbação pelas hélices ao serem instaladas no solo. Nesse caso, o solo acima da hélice da ponta tem menor perturbação em comparação com o solo acima das hélices superiores, uma vez que estes são penetrados e revolvidos pelas hélices mais de uma vez. Para a avaliação do método cuja hélice da ponta está instalada em solo argiloso, foi usado também o valor de a igual a 70, assim como Kanai (2007) que utilizou o mesmo valor tanto em areias quanto em argilas para as hélices superiores.

2.2. Método de Perko (2009)

Perko (2009), também baseado no mecanismo das capacidades individuais das hélices, propôs o seguinte método para a previsão da capacidade de carga de fundações por estacas de múltiplas hélices:

$$Q_u = \sum_n q_{ult} \cdot A_n + \alpha H_{eff} (\pi d) \quad (2)$$

Onde: A_n é a área efetiva resistida pela n -ésima hélice

α é a adesão entre o solo e a haste (kPa)

H_{eff} é o comprimento da haste definido entre o topo do terreno e a hélice de topo descontado o seu diâmetro

q_{ult} é a tensão de ruptura do solo acima da hélice (Tabela 2)

Tabela 2. Correlações entre o tipo de solo e a capacidade de carga da hélice em função do valor de N do ensaio SPT (Perko 2009)

Solo (característica primária)	tensão de ruptura q_{ult} (kPa/golpes/30cm)
Solo de grão fino	68 N_{70}
Solo de grão grosso	74 N_{70}
Base rochosa	81 N_{70}

As correlações das capacidades de carga das hélices são apresentadas na Tabela 2. Os valores de N indicados na tabela são referentes à eficiência de 70% no ensaio SPT. Perko (2009) não apresenta correlação para a resistência por atrito na haste e recomenda que tal valor seja ignorado em favor da segurança ou estimada em função de equações baseadas nos parâmetros de resistência dos solos. Portanto, neste trabalho, foram avaliadas as seguintes situações: (a) seguir a recomendação do autor e ignorar a resistência por atrito na haste, e (b) considerar a resistência promovida pela haste através da correlação com o N_{SPT} proposta por Kanai (2007).

3. CARACTERÍSTICAS DO BANCO DE DADOS

No banco de dados coletado pelos autores consta diversas provas de carga estáticas à tração conduzidas em fundações por estacas helicoidais instaladas em diferentes locais do Brasil. Para o presente trabalho, foi estabelecido que a capacidade de carga à tração da estaca é relativa a um deslocamento líquido (total menos alongamento elástico da haste) de 10% do diâmetro médio das hélices (critério de ruptura da norma internacional de estacas helicoidais AC358). Neste artigo, são avaliadas estacas de três hélices instaladas verticalmente, as quais correspondem a um total de 15 provas de carga retiradas do banco de dados apresentado em Tsuha et al. (2024).

A tabela a seguir resume as características principais do banco de dados composto por 15 provas de carga à tração de estacas helicoidais de três hélices instaladas perfazendo 0° com a vertical:

Tabela 3. Características das 15 estacas utilizadas.

CARACTERÍSTICA	Número de estacas	Min valor	Max valor
<i>Solo constatado na região das hélices</i>			
Areia	5	-	-
Solo arenoso	7	-	-
Argila	2	-	-
Solo argiloso	1	-	-
<i>Diâmetro da haste (mm)</i>			
73	4	-	-
88,9	7	-	-
101,6	4	-	-
<i>Dimensão das estacas</i>			
Diâmetro da haste, d (mm)	-	73	101,6
Diâmetro da hélice, D (mm)	-	203,2	355,6
Comprimento enterrado, L (m)	-	4,0	19,8
<i>Torque e capacidade de carga à tração medidos</i>			
*Torque final de instalação, T_f (kN.m)	-	2,9	19,7
**Capacidade de carga à tração, Q_u (kN)	-	48,9	582,8
Fator torque K_T (m ⁻¹)	-	15,5	38,5
<i>SPT N60</i>			
N_{60} na hélice da ponta (golpes/30cm)	-	6	72
* Torque médio medido ao final da instalação correspondente a um trecho de três vezes o diâmetro da maior hélice (D_{max})			
** carga que conduz a um deslocamento líquido (total menos elástico) igual a 10% do diâmetro médio das hélices			

A Figura 2 apresenta um resumo das características geométricas das estacas, juntamente com os valores N_{60} na profundidade das hélices das pontas das 15 estacas estudadas. A Figura 3 exhibe os resultados medidos do torque final de instalação, capacidade de carga à tração e fator torque em relação aos diferentes tipos de solos presentes no banco de dados.

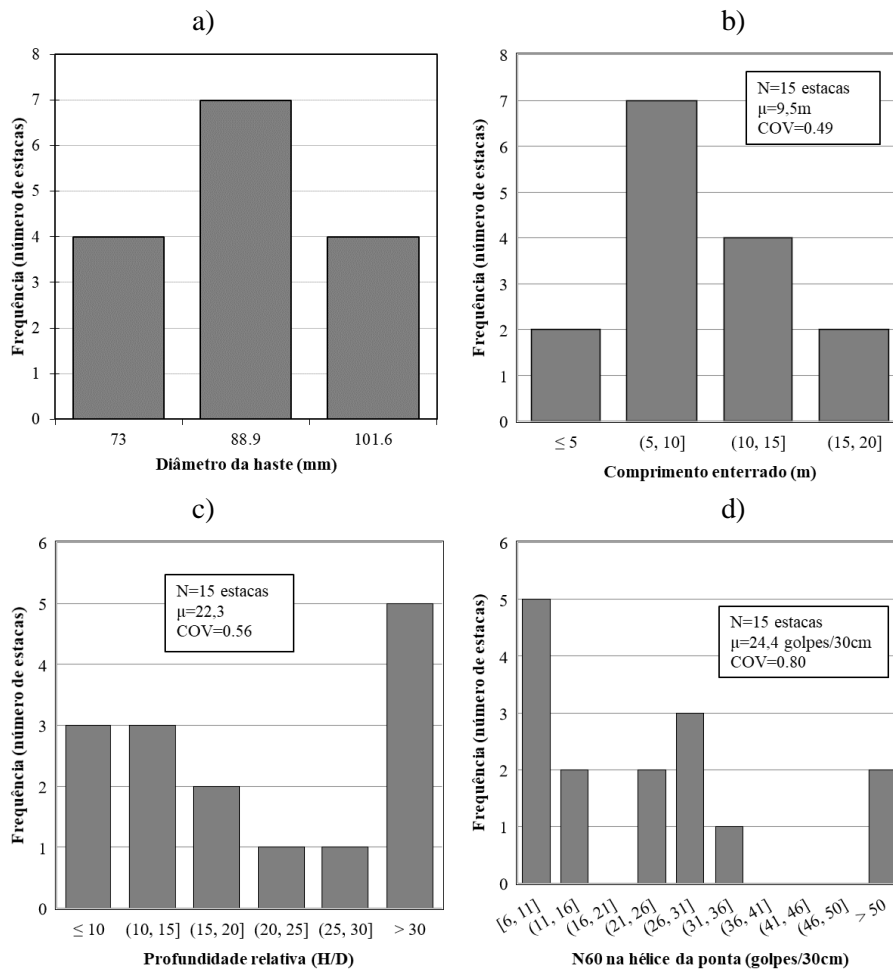


Figura 2. (a, b e c) propriedades geométricas das estacas; e d) valores de N_{60} nas hélices da ponta das estacas.

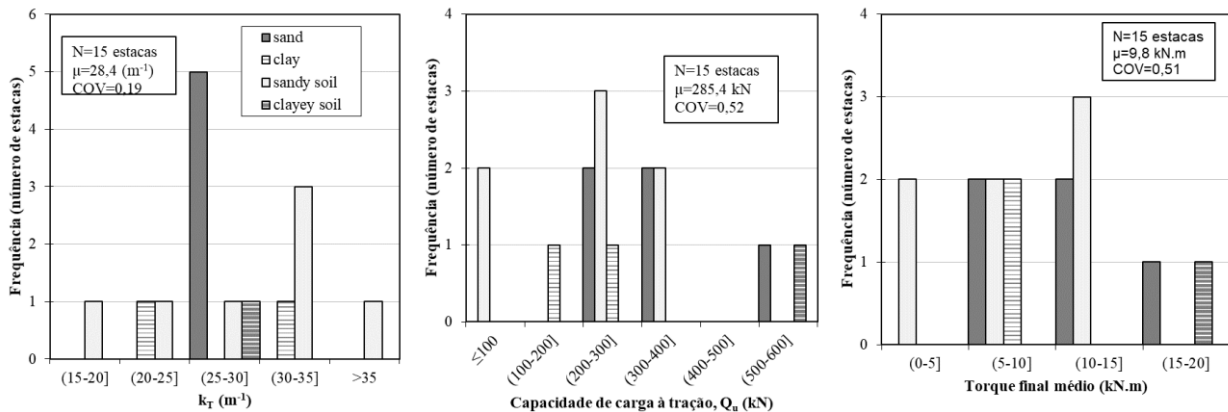


Figura 3. Valores medidos do fator torque (a), capacidade de carga à tração (b) e torque final médio de instalação (c) para diferentes tipos de solos.

4. AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS

Os métodos serão avaliados através do fator do modelo (do inglês model factor, M) que é a razão entre o valor medido e o calculado da capacidade de carga ($Q_{u,msd}/Q_{u,calc}$). A performance será ponderada com base nas médias, desvios padrão, coeficientes de variação e distribuições de probabilidade acumuladas de M .

A Figura 4 compara a resistência à tração medida nas provas de carga com a calculada pelos métodos de Kanai (2007) e Perko (2009):

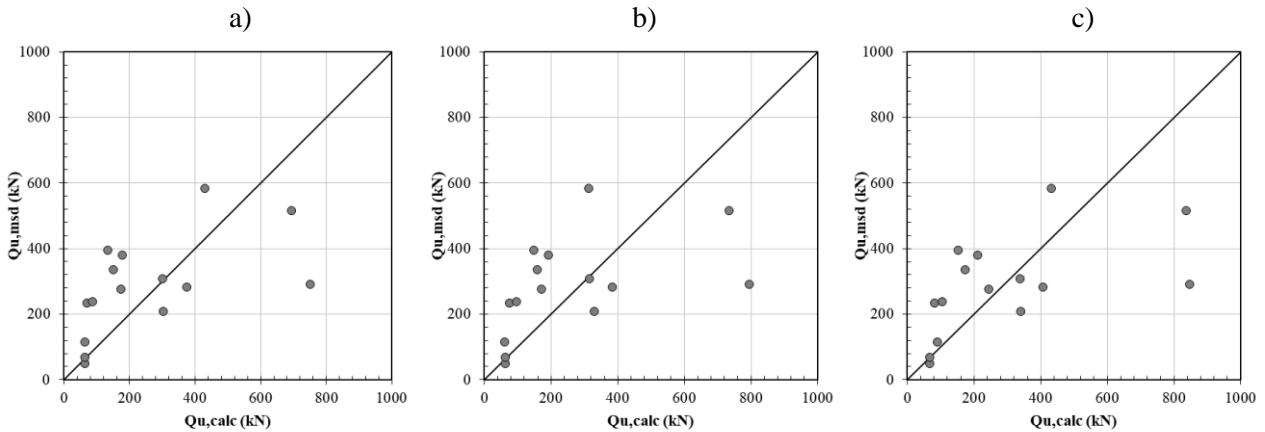


Figura 4. Comparação entre a capacidade de carga medida e calculada: a) Kanai (2007); b) Perko (2009); e c) Perko (2009) considerando a contribuição da haste.

Os resultados apresentados na Figura 4 mostram que ambos os métodos avaliados, Kanai (2007) e Perko (2009) com e sem a resistência da haste, não são precisos na previsão da capacidade de carga à tração das estacas de três hélices testadas. A Figura 5 mostra os histogramas de distribuição de frequências e as probabilidades acumuladas do fator do modelo M dos métodos analisados.

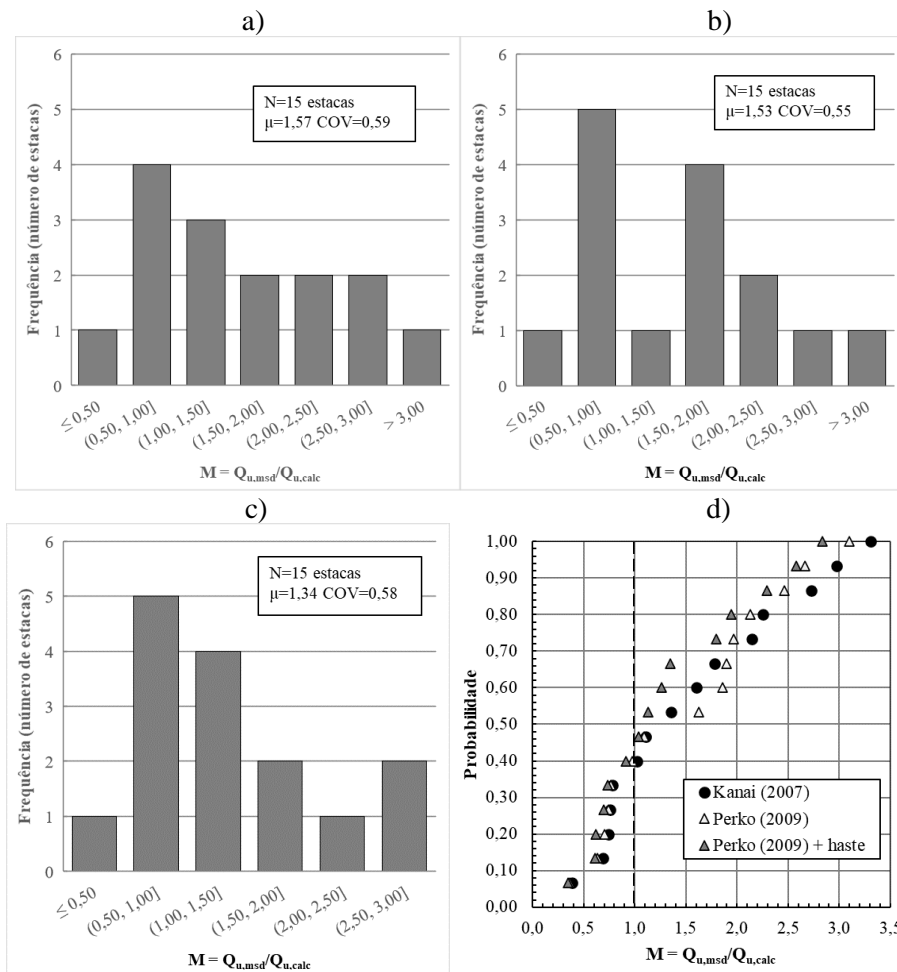


Figura 5. Histogramas de distribuição de frequências e função densidade de probabilidade dos métodos baseados no SPT analisados: a) Kanai (2007); b) Perko (2009); c) Perko (2009) considerando a contribuição da haste; e d) função densidade de probabilidade acumulada.

Os histogramas de frequência referentes à Figura 5 a), b) e c) visualmente revelam que a precisão das previsões é dispersa, conforme pode ser verificado pelos coeficientes de variação compreendidos entre 0,55 a 0,59. Além do mais, a associação entre os altos coeficientes de variação e a média dos valores de M , compreendidos entre 0,3 e 3,5, indica que os métodos de Kanai (2007) e Perko (2009) desempenharam insatisfatoriamente nas fundações analisadas, conforme demonstrado na Figura 5 d).

Portanto, tais métodos devem ser calibrados em função das unidades geotécnicas onde as estacas foram instaladas. A Tabela 3 resume as métricas estatísticas dos métodos aplicados às 15 estacas do banco de dados.

Tabela 3. Performance dos métodos de projeto baseados no SPT em relação aos resultados das provas de carga.

Método	Referência	Tipo	Valores de M				
			Mín	Máx	Média	Desy. Pad.	COV
1	Kanai (2007)	Métodos	0,39	3,31	1,57	0,92	0,59
2	Perko (2009)	baseados no	0,37	3,09	1,53	0,84	0,55
3	Perko (2009) c/ resistência da haste	SPT	0,34	2,83	1,34	0,77	0,58

Adicionalmente, Tsuha et al. (2024) observaram que os métodos baseados no torque de instalação são mais adequados para estimar a capacidade de carga à tração de estacas helicoidais devido à sua menor variabilidade nas previsões, mesmo sem calibração para os solos brasileiros. Entre os métodos de torque analisados por Tsuha et al. (2024), o modelo simplificado de Tsuha e Aoki (2010) adaptado por Oliveira (2024) demonstrou um desempenho superior em relação aos demais métodos analisados em seu estudo.

Em contrapartida, os métodos baseados no torque dependem do torque final cujo é obtido em campo somente durante a instalação da estaca, o que limita a aplicação do método durante a fase de projeto. Nesse contexto, uma alternativa viável seria estimar o torque com base em dados de testes *in situ* como o SPT ou CPT como, por exemplo, o método proposto por Da Silva et al. (2021) que calcula o torque de instalação de estacas helicoidais em areia argilosa usando dados do SPT e, no caso do CPT, existem abordagens sugeridas por Gavin et al. (2013), Spagnoli (2017), Al-Baghdali et al. (2017) e Davison et al. (2018).

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisadas 15 provas de carga à tração em fundações por estacas helicoidais de três hélices verticais instaladas em 11 locais do Brasil. O banco de dados foi submetido a uma análise por dois métodos de previsão baseados em resultados de ensaio SPT, que possibilitaram verificar a qualidade das previsões das capacidades de carga. Portanto, das análises conclui-se:

1. Os métodos de Kanai (2007) e Perko (2009) apresentaram baixa acurácia na previsão da capacidade de carga à tração das estacas do banco de dados, indicando que os-parâmetros de correlação com valores de N_{SPT} dos métodos analisados precisam ser calibrados para os solos brasileiros;
2. Pesquisas futuras são necessárias e sugere-se que a calibração dos métodos considere separadamente o atrito da haste e a capacidade das hélices, levando em conta o efeito da perturbação das hélices superiores em relação à inferior;
3. Calibrações regionalizadas em unidades geotécnicas semelhantes podem reduzir a variabilidade das previsões;
4. As estacas helicoidais ainda carecem de métodos teóricos e empíricos para prever sua capacidade de carga com base em ensaios *in situ*, como o SPT, amplamente utilizado no Brasil e em muitos outros países. Os métodos existentes, por exemplo, podem ser ajustados usando-se um banco de dados de provas de carga mais amplo para possibilitar a calibração de seus parâmetros com base em técnicas de regressão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio à pesquisa. À Vértice Engenharia e ao projeto PD-07284-0002/2020 do programa P&D ANEEL do grupo Neoenergia pelos dados cedidos para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Baghdadi, T., Davidson, C., Brown, M. J., Knappett, J. A., Brennan, A., Augarde, C., ... & Blake, A. (2017) CPT based design procedure for installation torque prediction for screw piles installed in sand. In 8th Offshore Site Investigation and Geotechnics International Conference: ‘Smarter Solutions for Future Offshore Developments’ (pp. 346-353). Society for Underwater Technology.
- Davidson, C., Al-Baghdadi, T., Brown, M., Brennan, A., Knappett, J., Augarde, C., ... & Ball, J. (2018) A modified CPT based installation torque prediction for large screw piles in sand. In 4th International symposium CPT (pp. 255-261).
- Gavin, K., Doherty, P., & Spagnoli, G. (2013) Prediction of the installation torque resistance of large diameter helical piles in dense sand. In Proc. of 1st Int. Geotechnical Symp. of Helical Foundations. USA: Amherst.
- ICC-ES (International Code Council – Evaluation Service) (2018). *AC308 Acceptance Criteria for Helical Pile Systems and Devices*. Washington, DC: ICC-ES.
- Kanai, S. (2007). A seismic retrofitting application by means of multi-helix micropiles. In Proceedings of the 23rd US–Japan Bridge Engineering Workshop, Tsukuba, Japan (pp. 5-7).
- Oliveira, C. C. S. (2024) *Analysis of pile load tests data to enhance the prediction of multi-helix piles performance based on in-situ measurements*. Dissertação de mestrado (não finalizada). Universidade de São Paulo, Brasil.
- Perko, H.A. (2009) *Helical piles: a practical guide to design and installation*. 1st ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Spagnoli, G. (2017) A CPT-based model to predict the installation torque of helical piles in sand. *Marine georesources & geotechnology*, 35 (4), p. 578-585.
- Tsuha, C.H.C., Aoki, N. (2010) Relationship between installation torque and uplift capacity of deep helical piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 47 (6), p. 635–647.