

Estudo de caso de fundações por estacas helicoidais instaladas em solo tropical residual

José Antonio Schiavon

Departamento de Geotecnia, EESC - USP, São Carlos, Brasil, jaschiav@sc.usp.br

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

Departamento de Geotecnia, EESC - USP, São Carlos, Brasil, chctsuha@sc.usp.br

Luc Thorel

Laboratório GMG, IFSTTAR, Nantes, França, luc.thorel@ifsttar.fr

RESUMO: No Brasil, as estacas helicoidais são frequentemente instaladas em terrenos de solos residuais. Nesses casos, a perturbação causada pela instalação resulta num significativo grau de desestruturação deste solo particular. Para avaliar o comportamento deste tipo de fundação em solo residual do interior do Estado de São Paulo, o presente trabalho apresenta uma investigação realizada com duas estacas helicoidais de uma hélice, que foram instrumentadas em uma seção da haste acima da hélice e ensaiadas à tração em prova de carga com carregamento rápido. A resposta carga-deslocamento de ambas as estacas foi similar, com uma diferença de 9% na capacidade de carga. No entanto, na ruptura, convencionada, a resistência pela hélice mostrou diferença de 24% em relação à média. Por causa da significativa perturbação causada pela instalação no solo estudado, os resultados do método teórico foram consideravelmente superestimados.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca helicoidal, solo residual, resistência à tração, prova de carga.

1 INTRODUÇÃO

O uso de estacas helicoidais tem se expandido para além das aplicações na indústria energética. A ampla utilização nas aplicações mais tradicionais da engenharia civil foi resultado de sua rápida instalação, capacidade de ser carregada imediatamente após a sua instalação, e suporte a carregamentos de tração e compressão (Stephenson, 2010).

As estacas helicoidais comumente utilizadas são compostas de uma ou mais placas circulares em forma de hélice soldadas a uma haste central, normalmente de seção transversal tubular. No Brasil, o diâmetro das hélices normalmente varia entre 2,5 a 6 vezes o diâmetro da haste. Quando múltiplas, as hélices de uma mesma estaca podem ter diâmetros iguais ou diâmetros crescentes a partir da ponta

da estaca (extremidade inferior). O passo de cada hélice deve ser cuidadosamente conformado e deve ser o mesmo para todas as hélices da estaca, para que estas passem por uma única trajetória durante a instalação. O número de placas helicoidais de uma estaca depende das condições do solo e da capacidade de carga requerida.

A instalação das estacas helicoidais é feita por meio de processo análogo ao aparafusamento, com o uso de um motor hidráulico acoplado ao braço de uma retroescavadeira. Um torquímetro é conectado entre o motor hidráulico e a haste a ser instalada para medir o torque de resposta durante a instalação.

Na instalação das estacas helicoidais, o solo atravessado pela hélice e pela haste é deformado e cisalhado. Nesta situação, solos estruturados,

como os solos residuais, podem sofrer destruição quase que completa de sua estrutura. Uma vez que a capacidade de carga à tração depende do solo acima da hélice, essa perturbação do solo certamente afetará o comportamento da ancoragem.

A estrutura de solos naturais se refere aos aspectos de fábrica e de pontes cimentadas entre partículas. O primeiro representa o arranjo espacial das partículas de solos e disposição de contatos, enquanto que o segundo pode ser progressivamente destruído durante a deformação plástica (expressão da “desestruturação”). A presença de alguma ligação cimentícia interparticular, mesmo que fraca, geralmente implica em uma componente adicional de resistência e rigidez, traduzindo-se também no aparecimento de interceptos de coesão (Viana da Fonseca, 2008).

Tsuha (2007) apresentou os resultados de provas de carga à tração em estacas helicoidais instaladas no solo residual de gnaiss da cidade de Contagem-MG e no solo residual de arenito do Campo Experimental da EESC-USP, em São Carlos-SP. Em Contagem-MG, as estacas com 2 e 3 hélices foram instaladas com as hélices em profundidades entre 3,0 e 6,0 m em solo não saturado, e os resultados calculados pelos métodos teóricos de estimativa de capacidade de carga mostraram-se próximos dos resultados das provas de carga. Por outro lado, para o caso das estacas de duas hélices testadas em São Carlos-SP, que foram instaladas com as hélices entre 13,0 e 15,0 m e abaixo do nível d'água (N.A.), os métodos teóricos superestimaram a capacidade de carga à tração.

O efeito da instalação no solo acima das hélices foi avaliado por Santos (2013) por meio de ensaios CPT (elétrico) nas proximidades de estacas helicoidais instaladas em solo residual de diabásio e não-saturado. Não foi observada diferença significativa entre resistência de ponta do cone (q_c) de ensaios realizados próximos e distantes da estaca instalada. No entanto, os resultados de atrito lateral (f_s) foram inferiores nos pontos próximos às estacas. Maiores diferentes de f_s puderam ser observadas em

maior profundidade, onde o solo residual estruturado era mais resistente.

Assim como mencionado por Tsuha (2007) e Tsuha *et al.* (2016), uma maior queda de resistência ocorre em solos mais resistentes por causa da destruição da estrutura do solo com a passagem das hélices. Em solos menos resistentes, as perdas são menores. Além disso, o efeito da perturbação do solo durante a instalação sobre a resposta à tração se deve a (i) redução das tensões radiais ao redor da estaca, e (ii) resposta menos resistente do solo remoldado acima das hélices por causa da penetração destas (Tsuha *et al.*, 2016).

Em ensaios triaxiais feitos com amostras retiradas de pontos próximos (solo perturbado) e distantes (solo não perturbado) das estacas helicoidais testadas por Santos (2013), Tsuha *et al.* (2016) mostraram que as amostras retiradas próximo das estacas exibiram resposta menos rígida e menores picos de resistência. Também, os valores de intercepto de coesão para as amostras de solo não perturbado foram maiores do que para o solo perturbado (próximo da estaca), tratando-se de uma evidência da desestruturação do solo residual.

O presente trabalho apresenta uma investigação experimental sobre a resposta à tração de duas estacas helicoidais instaladas em solo residual, tendo sido as hélices instaladas abaixo do nível d'água (NA). A partir dos experimentos realizados, os resultados dos métodos de cálculo mais utilizados foram avaliados.

2 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE CARGA À TRAÇÃO

Estacas helicoidais com uma hélice se comportam de maneira similar às ancoragens em placa. O mecanismo de ruptura poderá ser dado de dois modos (Figura 1): a) ancoragem rasa, na qual a superfície de ruptura apresenta um formato de cone e atinge a superfície do terreno; b) ancoragem profunda, na qual ocorre ruptura do solo ao redor da hélice mas a

superfície de ruptura não atinge o nível do terreno.

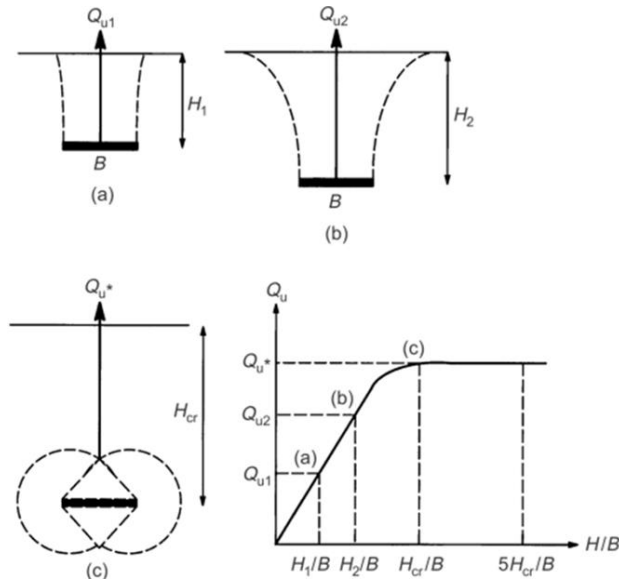


Figura 1. Mecanismos de ruptura de estacas mono-hélice (adaptado de Merifield *et al.* 2001).

Embora muito utilizados, os métodos teóricos geralmente produzem resultados discrepantes, por causa da dificuldade em se estabelecer valores adequados dos parâmetros para cada terreno. Por isso, a correlação empírica com o torque de instalação, inicialmente proposta por Hoyt e Clemence (1989), tem sido amplamente utilizada na prática.

2.1 Método das Capacidades Individuais

Na ruptura, admite-se que ocorra deslocamento no solo acima de cada hélice sem atingir a hélice superior. Na compressão ocorre o mesmo, porém o sentido do deslocamento de solo é inverso. A capacidade de carga à tração correspondente a cada hélice das estacas helicoidais (Q_h) em areia, argila e solos intermediários pode ser dada por:

$$Q_h = A_h q' N_q = A_h \gamma' D N_q \quad (\text{em areia}) \quad (1)$$

$$Q_h = A_h c N_c = A_h c 9 \quad (\text{em argila}) \quad (2)$$

$$Q_h = A_h (c N_c + q' N_q) \quad (\text{solo } c-\phi) \quad (3)$$

A_h = área projetada da hélice em um plano perpendicular ao eixo do tubo;

D = profundidade da hélice na vertical;

N_c = fator de capacidade de carga igual a 9;

N_q = fator de capacidade de carga;

c = coesão;

q' = tensão efetiva acima da hélice;

γ' = peso específico efetivo do solo.

Dentre diversas proposições, o fator de capacidade de carga N_q sugerido pela Hubbel (2003) depende do ângulo de atrito do solo (ϕ), e é adaptado do trabalho de Meyerhof (1976). O valor proposto é o de N_q de Meyerhof dividido por 2 (Eq. 4). No entanto, em vários casos, o uso dos valores de N_q adaptados de Meyerhof (1976) tem superestimado a capacidade de carga à tração.

$$N_q = 0,5(12\phi)^{\phi/54} \quad (4)$$

Para ancoragens profundas, a resistência lateral (Q_s) pode ser determinada por (Clemence *et al.*, 1994; Mooney *et al.* 1985):

$$Q_s = A_s q_m K_u \tan \delta \quad (\text{em areia}) \quad (5)$$

$$Q_s = A_s C_a \quad (\text{em argila}) \quad (6)$$

$$Q_s = A_s q_m K_u \tan \delta + A_s C_a \quad (\text{solo } c-\phi) \quad (7)$$

A_s = área de contato da haste com o solo;

C_a = adesão na haste;

D = profundidade da hélice na vertical;

K_u = coeficiente de empuxo lateral na tração;

q_m = tensão efetiva média ao longo da haste;

δ = ângulo de atrito de interface.

Os valores de K_u da Eq. 4 são recomendados por Mitsch and Clemence (1985) para estacas helicoidais num intervalo de ϕ entre 25° e 45°.

$$K_u = 0,09e^{0,08\phi} \quad (\phi \text{ em graus}) \quad (8)$$

Por fim, a capacidade de carga da fundação, Q_u , será dada pela soma de Q_h e Q_s .

2.3 Correlação Empírica com o Torque de Instalação

Hoyt e Clemence (1989) analisaram 91 provas de carga em 24 diferentes locais com tipos variados de solo. Seus resultados mostraram que uma correlação entre o torque final de instalação e a capacidade de carga à tração de estacas helicoidais apresentou melhor ajuste quando comparada com os métodos de capacidade individual e da ruptura do cilindro. Segundo os autores, isto pode ser devido à eliminação das variáveis aleatórias que exibem inconsistência nos dois métodos anteriores.

A capacidade de carga (Q_u) à tração de estacas helicoidais pode também ser estimada, durante a execução, com base no valor do torque final de instalação da estaca pela expressão (Hoyt e Clemence, 1989):

$$Q_u = K_t T \quad (5)$$

K_t = fator empírico de torque;
 T = torque final de instalação.

O valor de K_t para estacas helicoidais pode ser influenciado por (Tsuha, 2007):

a) diâmetro externo das hélices e da haste (com o aumento das dimensões da estaca o valor de K_t diminui, ou seja, o torque de instalação aumenta proporcionalmente mais do que a capacidade de carga quando as dimensões da estaca aumentam);

b) ângulo de atrito na interface entre a chapa da hélice e areia durante a instalação (quando o ângulo de atrito na interface é maior, ocorre o aumento do torque de instalação, e não da capacidade de carga, por isso, com o aumento deste ângulo, o valor de K_t diminui);

c) ângulo da hélice com a horizontal (quanto maior for o passo da hélice, maior será o torque, porém a capacidade de carga não aumenta, por isso, com o aumento deste ângulo, o valor de K_t diminui).

O manual da Hubbel (2003) aponta que o valor do fator empírico de torque K_t deve variar de 10 a 66 m^{-1} . Valores de K_t sugeridos

Perko (2009) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores do fator K_t (Perko, 2009)

Diâmetro da haste	K_t (m^{-1})
$d = 73 \text{ mm}$	26
$d = 89 \text{ mm}$	23
$d = 114 \text{ mm}$	16

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Estacas helicoidais

Duas estacas metálicas helicoidais de uma hélice e haste de seção tubular com diâmetro externo $d = 101,6 \text{ mm}$ foram utilizadas nesta investigação (Figura 2). As hélices (uma em cada estaca) tinham diâmetro $D = 305,0 \text{ mm}$, espessura da placa $t_w = 12,5 \text{ mm}$ e passo $p = 97 \text{ mm}$.



Figura 2. Seções guia das estacas helicoidais EH1 e EH2 em preparação para instrumentação.

Ambas as estacas, denominadas de EH1 e EH2, foram instrumentadas com extensômetros elétricos em ponte completa em uma seção logo acima da hélice, para medir da força axial desenvolvida naquela seção durante o ensaio. A impermeabilização do circuito foi feita com uma camada de fita isolante comum, outra camada fita isolante auto fusão, e silicone. Para proteger o circuito, foram utilizadas as luvas bipartidas usinadas em aço, na qual foi utilizado selante de juntas elástico para impermeabilização.

3.2 Campo Experimental da EESC-USP

O perfil do terreno amostrado no Campo Experimental de Fundações da EESC tem em sua camada superficial um solo areno-argiloso

de coloração marrom escura, comprovadamente colapsível, com aproximadamente 6,0 m.

Abaixo desta camada superficial, encontra-se um horizonte de solo residual areno-argiloso variegado, com N_{SPT} variando entre 2 a 20 golpes/30 cm, na qual as hélices das estacas foram instaladas. Dividindo os dois horizontes, encontra-se uma linha de seixos com aproximadamente 0,20 m de espessura. O NA varia sazonalmente entre 8,0 m e 10,0 m de profundidade. A Figura 3 apresenta o perfil geotécnico do campo experimental.

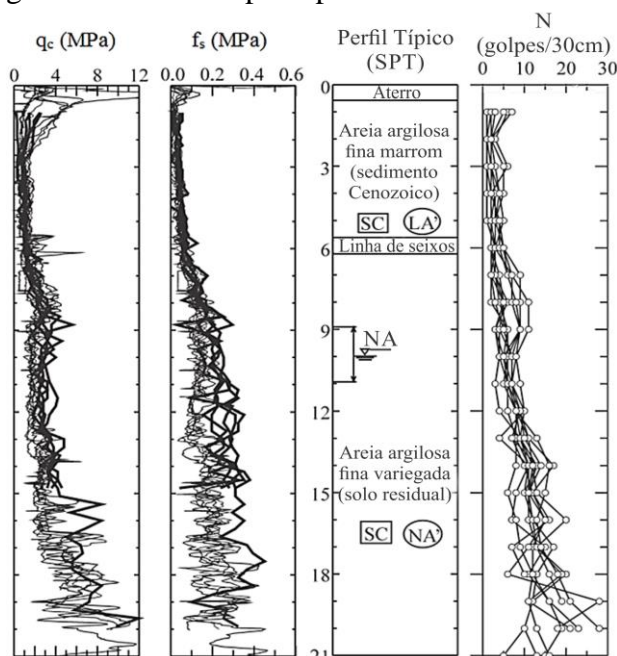


Figura 3. Resultados da investigação do Campo Experimental da EESC-USP (Giacheti *et al.*, 2003).

3.3 Instalação e Provas de Carga

As estacas helicoidais EH1 e EH2 foram instaladas com o uso de um motor hidráulico acoplado ao braço de uma retroescavadeira. O torque de instalação foi medido com um torquímetro colocado entre o motor hidráulico e o topo da haste da estaca helicoidal.

A profundidade das hélices foi de 15,0 m para ambas as estacas, de modo a garantir embutimento em solo saturado, comportamento de ancoragem profunda, e torque ao final da instalação condizente com valores observados na prática.

Por causa da quebra da estrutura do solo

superficial, observou-se um vazio entre a haste e o solo nos 2 m a partir da superfície do terreno na instalação de ambas as estacas. Os valores de torque foram anotados a cada 0,5 m de avanço da instalação. O torque ao final da instalação, aos 15 m de profundidade, foi de 9,0 e 7,8 kN.m, respectivamente para EH1 e EH2. A média do torque na distância correspondente aos últimos 3 diâmetros de hélice (aproximadamente o último metro) foi de 8,2 e 8,1 kN.m, respectivamente para EH1 e EH2.

As provas de carga foram do tipo carregamento rápido, de acordo com o item 3.5.3, subitem a), 3º parágrafo, da norma brasileira NBR 12131 (ABNT, 2006), que se refere aos casos especiais como fundações de torres de linhas de transmissão. As leituras dos deslocamentos da cabeça da estaca foram feitas nos tempos de 30 s, 60 s, 120 s, 240 s e 300 s, após o início de cada incremento de carga mantida, com a utilização de 4 relógios comparadores mecânicos (50 mm de curso e resolução de 0,01 mm). A força de tração, aplicada com macaco hidráulico manual vazado, foi medida com uma célula de carga com capacidade igual a 500 kN e resolução de 0,02 kN.

Antes do ensaio propriamente dito, foi aplicada uma carga de ajuste de 4 kN de tração para eliminar as possíveis folgas nas ligações dos parafusos nas conexões das hastes de extensão. Após esta carga de ajuste, os relógios comparadores, a leitura da célula de carga e da instrumentação foram zerados para o início do ensaio.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 4 apresenta a resposta força-deslocamento das provas de carga com as duas estacas helicoidais. Ambas as estacas exibiram uma resposta força-deslocamento no topo aproximadamente linear, com um deslocamento muito maior no primeiro incremento de carga em relação aos incrementos subsequentes.

A capacidade de carga foi convencionada

como sendo o valor aplicado quando a fundação atinge um deslocamento no topo igual a $10\%D$, ou seja, 30 mm. A capacidade de carga à tração foi de 97,6 kN para EH1 e 89,1 kN para EH2. A capacidade da hélice, considerada neste trabalho como sendo aproximadamente igual à carga medida na seção instrumentada, foi de 60,3 kN para EH1 e 77,2 kN para EH2, sendo correspondente a 62% e 87% da carga aplicada na ruptura, respectivamente.

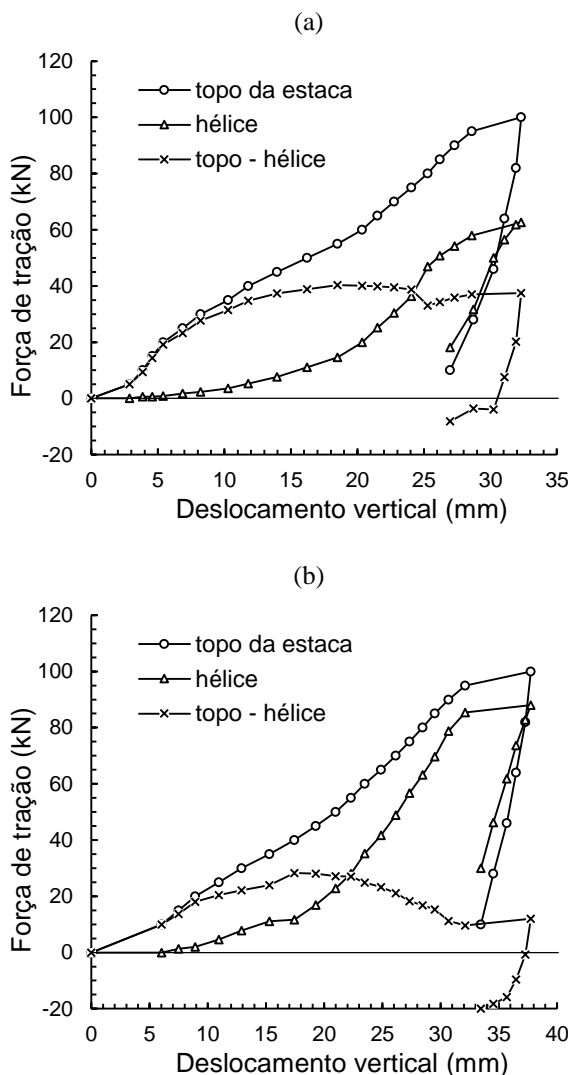


Figura 4. Resposta força-deslocamento para estaca helicoidal (a) EH1 e (b) EH2.

A resistência por atrito lateral, adotada como a diferença entre a carga aplicada e a carga na instrumentação, exibiu um pico de resistência com um deslocamento vertical da ordem de 18 mm, aproximadamente $18\%d$ e $6\%D$.

No descarregamento, observou-se ocorrência de atrito negativo e tensões residuais no sistema solo-hélice (Figura 4), fenômeno causado pelo impedimento da recuperação da deformação elástica do sistema solo-hélice.

4.1 Comparação com métodos de previsão

Foi feita comparação dos resultados das provas de carga com o Método das Capacidades Individuais. Os parâmetros do solo foram extraídos de Machado (1998) e os demais parâmetros para o cálculo foram apresentados no decorrer do presente trabalho. A Figura 5 mostra que os valores estimados pelo Método das Capacidades Individuais superestimou significativamente os resultados. Para a capacidade de carga (Q_u), os valores calculados foram entre 58% e 193% maiores, enquanto que a capacidade da hélice (Q_h) foi superestimada entre 47% e 114% e a resistência lateral superestimada de 11% a até 11 vezes.

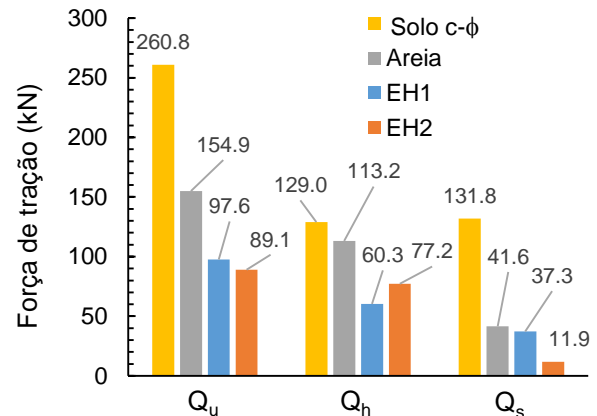


Figura 5. Comparação entre resultados do Método das Capacidades Individuais e das provas de carga.

O fator de correlação com o torque K_t para o torque final de instalação foi $10,8 \text{ m}^{-1}$ e $11,4 \text{ m}^{-1}$, respectivamente para EH1 e EH2. Para a média dos valores de torque no último metro de instalação ($\sim 3D$), o valor de K_t foi, respectivamente, $11,9 \text{ m}^{-1}$ e $11,0 \text{ m}^{-1}$ para EH1 e EH2. Estes valores são aproximadamente 30% menores do que os propostos por Perko (2009). No entanto, são similares ao valor de $K_t = 10,9 \text{ m}^{-1}$ encontrado por Santos

Filho (2014) para estacas helicoidais de 4 hélices com diâmetro de haste $d = 101,6$ mm, instaladas no solo residual de Contagem-MG. Por outro lado, no mesmo estudo de Santos Filho (2014), para a estaca helicoidal com haste da seção guia de diâmetro reduzido ($d = 73,0$ mm) em relação aos demais segmentos de extensão, o valor de K_t foi $15,9 \text{ m}^{-1}$, o que mostra a influência do diâmetro da haste sobre o torque, uma vez que ambas as estacas testadas apresentaram mesma capacidade de carga à tração. Observação semelhante pode ser feita a partir do estudo de Tsuha (2007) realizado no Campo Experimental da EESC-USP, que apresentou valores de K_t de $24,1 \text{ m}^{-1}$ para uma estaca helicoidal com duas hélices de diâmetros 254,0 e 304,8 mm e haste com $d = 73,0$ mm.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um estudo de caso com duas estacas helicoidais de uma hélice instaladas em solo residual. Os resultados mostraram que a estimativa feita por método teórico comumente utilizado na prática conduziu a resultados superestimados, pois os fatores de capacidade de carga (fatores N) não levam em conta a severa perturbação causada pela instalação neste tipo de solo. Além disso, os valores de K_t obtidos no presente estudo são aproximadamente 30% menores que os valores mais comuns encontrados na literatura, mas condizentes com resultados de estudos anteriores de estacas helicoidais em solos residuais.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2006). NBR 12131: Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 8 p.
- Clemence, S.P. *et al.* (1994) Prediction of uplift capacity for helical anchors in sand, proceedings of the 2nd Geotechnical Engineering Conference, Cairo, Vol. 1, pp. 332-343.
- Giacheti, H.L. *et al.* (2003). Cone penetration testing on Brazilian tropical soils, Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE, Cambridge, MA, USA, v. 1, p. 397-402.
- Hoyt, R.M. e Clemence, S.P. (1989). Uplift capacity of helical anchors in soil, proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE, Rio de Janeiro, v. 2, p. 13-18.
- Hubbell, Inc. (2003). Helical screw foundation system design manual for new construction. A. B. Chance Div., Hubbell, Inc., Centralia, http://www.vickars.com/screwpile_manual.
- Machado, S.L. (1998) *Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 361 p.
- Merifield, R.S. *et al.* (2001) Stability of plate anchors in undrained clay. *Geotechnique*, Vol. 51, N. 2, pp. 141-153.
- Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 102, N. 3, p. 195-228.
- Mitsch, M.P. e Clemence, S.P. The uplift capacity of helical anchors in sand, Uplift behavior of anchor foundations in soil, ASCE, Michigan, p. 26-47.
- Mooney, J.S. *et al.* Uplift capacity of helical anchors in clay and silt, Uplift behavior of anchor foundations in soil, ASCE, Michigan, p. 48-72.
- Perko, H.A. (2009). Helical Piles: A Practical Guide to Design and Installation. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, 512 p.
- Santos, T.C. (2013) *Efeito da configuração das hélices na capacidade de carga à tração de estacas helicoidais em solo tropical*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 171 p.
- Santos Filho, J.M.S.M. (2014) *Efeito da instalação de estacas helicoidais em solo tropical*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 121 p.
- Stephenson, R.W. (2010) *Helical foundations and tie backs: State of the Art*, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO, 61 p.
- Tsuha, C.H.C. (2007) *Modelo teórico para controle da capacidade de carga à tração de estacas metálicas helicoidais em solo arenoso*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 275 p.
- Tsuha, C.H.C. *et al.* (2016). Helical piles in unsaturated structured soil: a case study, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 53, N. 1, p. 103-117.