

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/327

## Instrumentação de Fundação por Estaca Metálica Helicoidal Submetida à Tração

Amanda Regina Foggiato Christoni

Doutoranda em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, Brasil, arfchristoni@usp.br

Thaise da Silva Oliveira Morais

Pós-Doutoranda em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, Brasil, tsmorais@sc.usp.br

Oskar Leonardo Laurani López

Mestrando em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, Brasil, o.laurani@usp.br

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

Professora Titular, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, Brasil, chctsuha@sc.usp.br

Rafael de Barros Aranha Piccolo

Engenheiro Civil, Neoenergia, Campinas/SP, Brasil, rafael.piccolo@neoenergia.com

**RESUMO:** As estacas metálicas helicoidais são vantajosas para projetos de fundação de torres de linhas de transmissão pois podem ser facilmente executadas em locais de difícil acesso, sendo capazes de resistir aos esforços tanto de compressão, quanto de tração. Quando solicitada à tração, a zona cilíndrica do solo formado entre as hélices é mobilizada e a capacidade de carga é variável e desconhecida, pois o solo que suporta o carregamento é o solo acima da hélice, perturbado pela instalação. Uma forma de compreender o comportamento desse material durante o carregamento é através da instrumentação. Esse recurso contribui para interpretação correta dos resultados, pois é capaz de detalhar como as cargas são resistidas nas hélices e na haste central separadamente. Neste estudo, uma estaca metálica helicoidal instrumentada, composta por quatro hélices de diâmetros crescentes (254,0 mm - hélice 1, 304,8 mm - hélice 2 e 355,6 mm - hélices 3 e 4), instalada com 14,74 m de comprimento, em um perfil de solo argilo-sitoso a silte-arenoso residual da cidade de Contagem/MG, foi submetida à tração em uma prova de carga estática. O tubo da haste central da estaca possui diâmetro de 101,6 mm, com parede de espessura de 7,1 mm; enquanto a chapa das hélices possui espessura de 12,7 mm. A instrumentação com extensômetros elétricos (“strain gages”) foi realizada em quatro seções, sendo dispostos quatro extensômetros acima de cada hélice, diametralmente opostos entre si ao longo do eixo da estaca. Para prever a capacidade de carga da fundação instrumentada, utilizou-se o método de Kanai (2007), que correlaciona a capacidade de carga individual das hélices diretamente com valores de  $N_{SPT}$ . O resultado previsto se mostrou conservador comparado ao valor da carga de ruptura obtida experimentalmente, considerando-se o critério de ruptura da norma AC 358 (ICCES, 2012). A instrumentação forneceu resultados satisfatórios de transferência de carga, e indicou que a terceira hélice foi responsável por resistir maior carga durante o ensaio, enquanto que a hélice da ponta mobilizou maiores tensões em carregamentos maiores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fundações por estaca helicoidal, Prova de carga à tração instrumentada, Transferência de carga.

**ABSTRACT:** Helical piles are advantageous for transmission tower foundation projects as they can be easily installed in challenging locations, and capable of resisting both compression and tension forces. Under tensile loading, the cylindrical soil zone formed between the helices is mobilized, and the pile capacity is difficult to be estimated due to the disturbance caused by pile installation in the soil above the helices. One way to understand the helix interaction with the disturbed material during loading is through pile instrumentation. This resource, when used, contributes to the correct interpretation of the results, as it is capable of detailing how the loads are resisted by the helices and by the shaft separately. In this study, an instrumented helical pile composed of four helices with increasing diameters (254,0 mm - helix 1, 304,8 mm - helix 2, and 355,6 mm - helices 3 and 4), installed to a depth of 14,74 m, in a clayey-silty to silty-sandy residual soil in Contagem/MG, was subjected to tensile static load test. The central shaft tube has a diameter of 101,6 mm with a wall thickness of 7,1 mm; while the helix plates have a thickness of 12,7 mm. Instrumentation with strain gauges was

conducted in four pile sections, with four strain gauges placed above each helix, diametrically opposed along the pile axis. To predict the uplift capacity, the Kanai method (2007) was applied, correlating the individual bearing capacity of a helix directly with  $N_{SPT}$  values. The predicted uplift capacity was conservative compared to the value obtained experimentally, considering the failure criterion of AC 308 (ICEES, 2012). The instrumentation provided satisfactory results of load transfer, indicating that the third helix is responsible for resisting the highest portion of applied load, while the bottom helix mobilizes higher stresses under higher loads.

**KEYWORDS:** Helical pile foundations, Instrumented tension load test, Load transfer.

## 1 INTRODUÇÃO

As estacas metálicas helicoidais são fundações profundas comumente utilizadas em torres de linhas de transmissão de energia pela sua facilidade de instalação em locais de difícil acesso, não necessitando remoção do solo e concretagem *in loco* (SPAGNOLI E TSUHA, 2020).

Como são instaladas através do torque aplicado por motor hidráulico, é possível controlar a instalação com o uso de torquímetro e utilizá-lo para verificar a sua capacidade de carga na fase de execução. Estas fundações são capazes de resistir à esforços de compressão, quando utilizadas em torres autoportantes e em mastros de torres estaiadas, e elevados esforços de tração, em torres estaiadas, por exemplo.

Por conta dessas vantagens, o uso dessas fundações tem crescido consideravelmente nas últimas décadas, entretanto os estudos desenvolvidos sobre esse tipo não convencional de fundação ainda são insuficientes para proporcionar previsões mais acuradas acerca do desempenho dessas estacas (SILVA E TSUHA, 2020).

No que diz respeito ao desempenho frente aos esforços de tração, dispõem-se de alguns métodos de cálculo como o das capacidades individuais das hélices, que considera que a capacidade de carga é a soma das capacidades individuais levando em conta a ruptura do solo que ocorre acima de cada uma das hélices individualmente somado ao atrito que ocorre ao longo do fuste (PERKO, 2009).

Segundo Santos Filho (2014), no método das capacidades individuais, as hélices de uma estaca são consideradas como um conjunto de sapatas solicitadas à tração, de modo que a superfície de ruptura mobilizada acima de cada hélice não atinge a hélice superior. Portanto, a capacidade de carga à tração pode aumentar com o número de hélices.

Nesses casos, a instrumentação da estaca pode auxiliar a compreender com mais detalhes como ocorre a mobilização dos esforços ao longo da estaca e como se comporta o elemento de fundação na ruptura. Assim, é possível identificar separadamente a carga mobilizada nas hélices e a resistência por atrito lateral na haste central durante o carregamento.

Em estacas helicoidais, a instrumentação é feita com extensômetros elétricos (*strain gages*) que podem ser colados ao longo da haste central. Através da variação da resistência elétrica, esses sensores fornecem dados precisos das deformações nos locais em que estão fixados, sendo possível identificar posteriormente como se dá a transferência de carga na fundação.

Diante desse contexto, este trabalho objetiva analisar o resultado da instrumentação de uma fundação por estaca helicoidal, composta por 4 hélices, submetida à tração em uma prova de carga estática. A estaca foi instalada na cidade de Contagem/MG, em um perfil de solo argilo-sitoso a silte-arenoso residual.

## 2 INSTRUMENTAÇÃO E PROVA DE CARGA

### 2.1 Instrumentação

Considerando-se a seção guia (com hélices soldadas) de 3,50 m de comprimento da estaca helicoidal composta por 4 hélices (H) de diâmetros crescentes (254,0 mm - H1, 304,8 mm - H2 e 355,6 mm - H3 e H4) espaçadas 3 vezes o diâmetro da hélice inferior, os extensômetros foram instalados a uma distância de 13,5 cm m acima de cada hélice, em 4 seções da estaca, como ilustrado na Figura 1. O tubo da haste central da estaca

(seção guia e extensões) possui diâmetro de 101,6 mm, com parede de espessura de 7,1 mm; enquanto a chapa das hélices possui espessura de 12,7 mm.

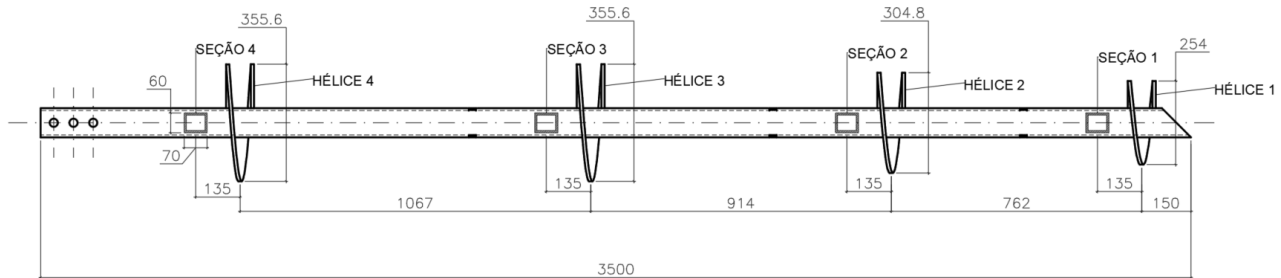


Figura 1. Detalhe da seção guia da estaca com 4 hélices (medidas em mm).

Em cada seção, foram fixados 4 extensômetros elétricos, que foram montados em Ponte de Wheatstone, na configuração de ponte completa. Possuem resistência nominal de 350  $\Omega$ , sendo fabricados e comercializados pela Excel Engenharia de Sensores. As ligações dos circuitos foram feitas utilizando cabos manga 16x26 AWG, blindados com malha de cobre. Os cabos foram passados por dentro de todas as extensões de tubo da estaca, durante a instalação, tomando-se os cuidados para evitar quaisquer danos. Por fim, sobre a caixa de solda da seção instrumentada, foi realizada uma proteção mecânica.

Posteriormente, esta seção guia instrumentada foi levada para calibração, onde foi aplicado um carregamento de compressão da ordem de 200 kN, seguido de descarregamento até zerar a carga, repetindo-se esse processo três vezes. Com os resultados das calibrações de cada seção, foi possível configurar o sistema de aquisição de dados utilizados na prova de carga.

## 2.2 Local de estudo e instalação da estaca

O estudo foi desenvolvido no campo experimental da empresa Vercon Industrial LTDA, localizado na cidade de Contagem, no estado de Minas Gerais, a 15 km da capital Belo Horizonte. O perfil de solo do local é composto por argila siltosa muito mole a média, silte pouco arenoso residual pouco a muito compacto, com valores de  $N_{SPT}$  variando de 2 a 29 golpes/30cm, e nível d'água localizado a 13 m de profundidade, de acordo com a Figura 2. Observou-se a presença de uma camada de pedregulho quartzoso a 15,45 m de profundidade, onde foi finalizada a sondagem.

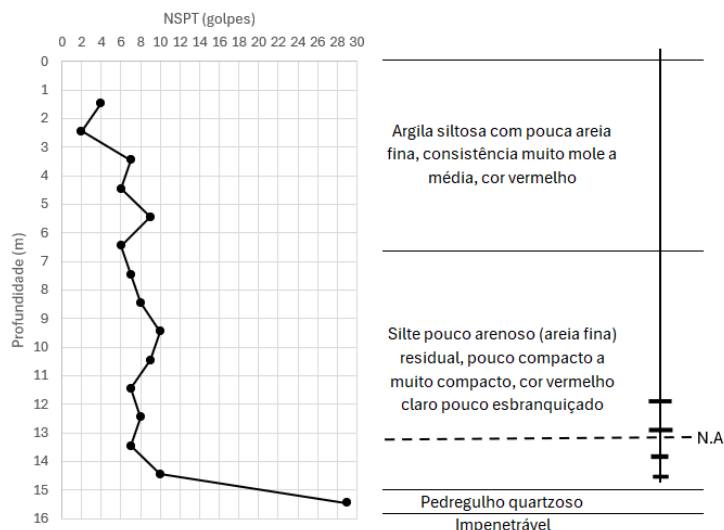


Figura 2. Valores de  $N_{SPT}$  ao longo da profundidade e perfil de solo SP02 do campo experimental de Contagem/MG.

A estaca deste estudo, denominada de EMH04, foi instalada próxima ao furo de sondagem SP02, utilizando-se motor hidráulico acoplado a uma retroescavadeira (Figura 3a). A estaca foi composta por uma seção guia com as 4 hélices e 7 extensões de haste tubular (sem hélices), totalizando 14,74 m de comprimento enterrado e 0,30 m acima do nível do terreno. Importante destacar que o torque mínimo adotado para critério de parada da instalação foi de 14,9 kN.m. Na instalação da estaca EMH04, foi medido o torque de instalação a cada 0,50 m de penetração, observando-se que este aumentou de acordo com a resistência do solo ao longo da profundidade, de acordo com a Figura 3b.

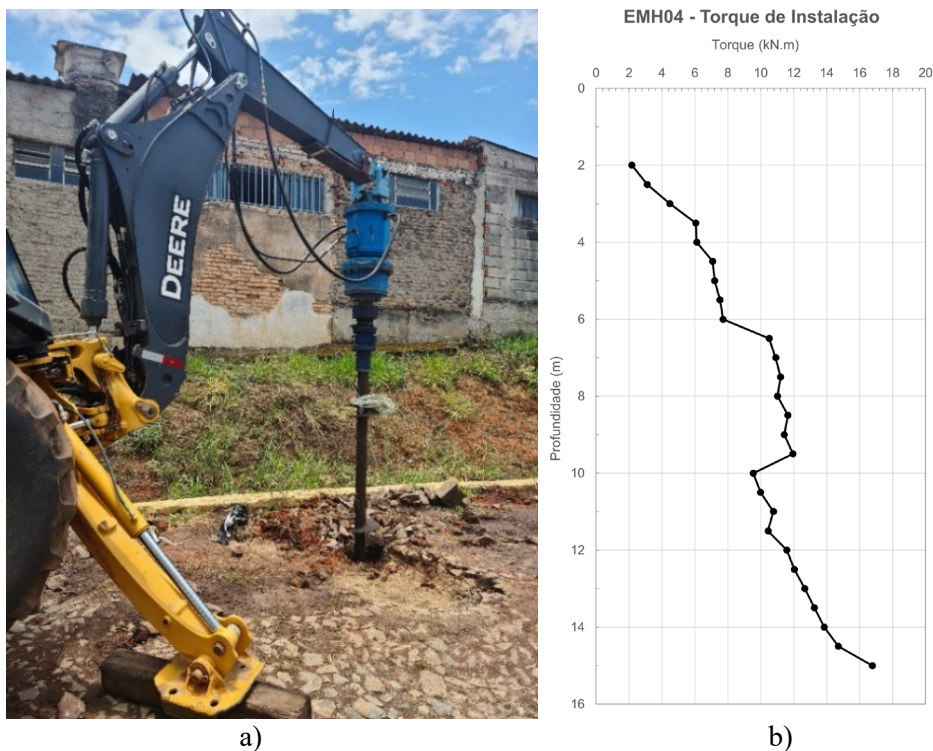


Figura 3. a) Instalação da estaca EMH04; b) Torque de instalação ao longo da profundidade.

### 2.3 Estimativa da capacidade de carga à tração

Para estimativa da capacidade de carga à tração da fundação testada ( $Q_u$ ), utilizou-se o método de Kanai (2007), que considera a capacidade individual das hélices somada a resistência por atrito lateral ao longo da haste central da estaca, correlacionando esses parâmetros com os valores de  $N_{SPT}$  do solo de acordo com a Equação 1.

$$Q_u = \sum q_{wi} \cdot A_{wi} + U \sum L_i \cdot f_i \quad (kN) \quad (1)$$

Onde,  $q_{wi}$  é a capacidade de carga individual de cada hélice, nesse caso, correspondente a  $70 \times N_{SPT}$  para hélice da ponta e  $50 \times N_{SPT}$  para as hélices superiores (kPa);  $A_{wi}$  é a área efetiva da hélice, correspondente a área da hélice subtraída da área da haste ( $m^2$ );  $U$  é perímetro da haste (m);  $L_i$  é comprimento efetivo da haste (m) e  $f_i$  é resistência unitária por atrito lateral da haste, nesse caso, correspondente a  $3 \times N_{SPT}$  médio do fuste para argila (kPa). O valor de  $N_{SPT}$  foi corrigido para  $N_{60}$  no presente artigo, no entanto os autores do método não especificaram a eficiência do ensaio SPT adotada por eles.

### 2.4 Prova de carga estática à tração

A prova de carga realizada na estaca instrumentada EMH04 foi estática à tração, com carregamento rápido de acordo com as diretrizes da NBR 16903 (ABNT, 2020). Cada estágio, tanto de carregamento quanto de descarregamento, teve a duração de 5 minutos, independente da estabilização dos deslocamentos.



As cargas foram aplicadas usando-se um macaco hidráulico, de capacidade 900 kN, conectado a uma bomba elétrica, e verificadas através de uma célula de carga do modelo C6B com força nominal de 2 MN. As leituras de deslocamento foram obtidas através de relógios comparadores de 50 x 0,01 mm.

Para aquisição dos dados da instrumentação, a célula de carga e as seções instrumentadas foram conectadas ao equipamento PMX da marca HBM, capaz de processar alto volume de dados, enviando-os instantaneamente para o computador.

Na Figura 4 tem-se um esquema representativo da prova de carga realizada na estaca EMH04.

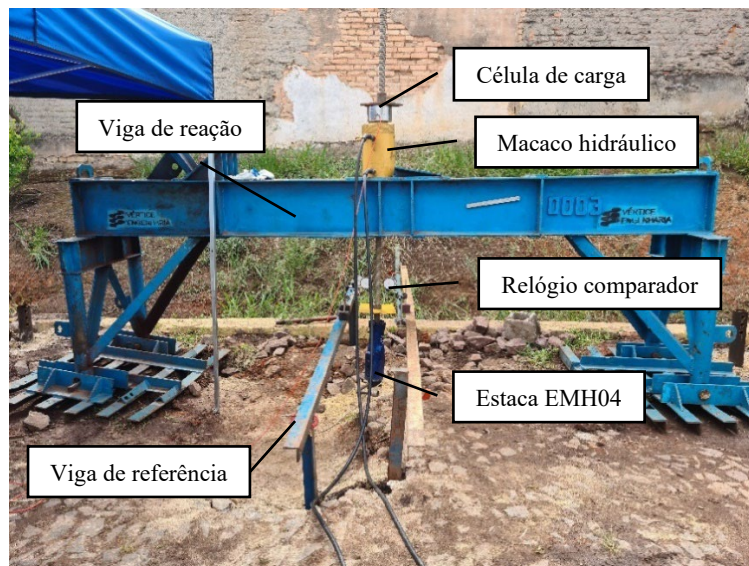


Figura 4. Prova de carga à tração da estaca EMH04.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Prova de carga estática à tração

A prova de carga estática à tração realizada na estaca EMH04 foi feita com 10 estágios de carregamento, no qual a cada incremento aplicou-se 10% da carga máxima prevista de 270 kN. Foram realizados 5 estágios de descarregamento, reduzindo a carga em estágios de 20% da carga máxima. Ao todo foram realizados 2 ciclos de carregamento e descarregamento e a curva carga-deslocamento está representada na Figura 5.

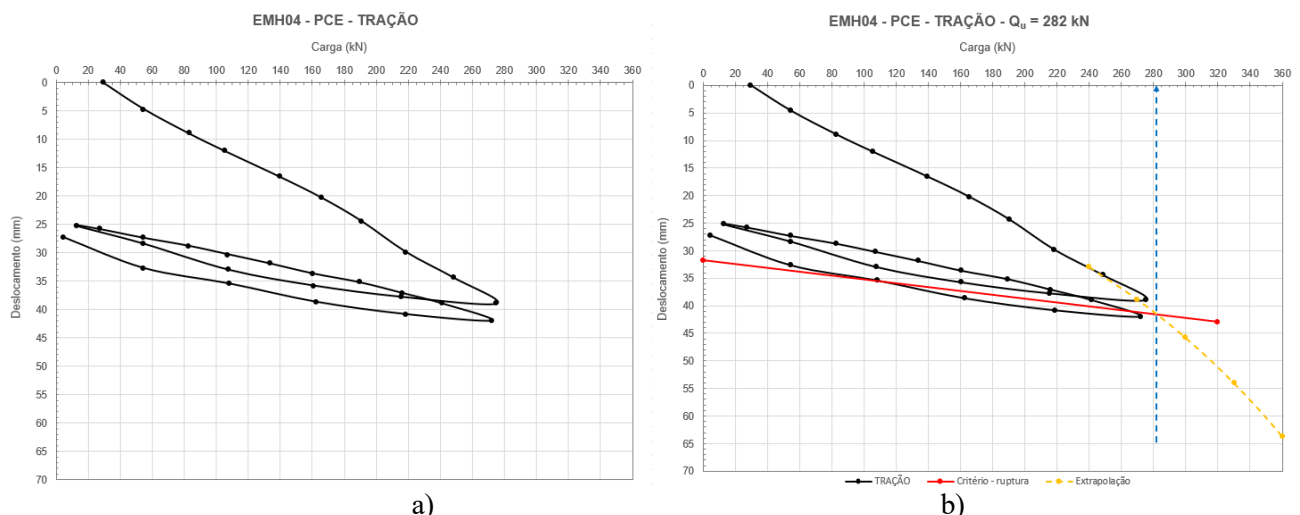


Figura 5. a) Curva carga-deslocamento referente à prova de carga estática à tração da estaca EHM04; b) Curva extrapolada e critério de ruptura da norma AC 358.

Pela curva carga-deslocamento, é possível identificar que não houve ruptura nítida na prova de carga estática à tração. Dessa forma, a carga de ruptura foi obtida através de extrapolação, considerando-se o critério de ruptura descrito na norma AC 358 (ICCES, 2012), que considera a carga de ruptura como sendo a mobilizada para um deslocamento correspondente à 10% do valor do diâmetro médio das hélices, somado ao deslocamento devido à deformação elástica da haste da estaca metálica helicoidal.

Ademais, a capacidade de carga à tração da estaca EMH04 foi estimada pelo método de Kanai (2007) e os respectivos resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Capacidades de carga para a estaca EMH04.

Método	Capacidade de carga a tração (kN)
Carga máxima aplicada na PCE	275,17
Capacidade de carga estimada – Kanai (2007)	249,32
Capacidade de carga pelo critério de ruptura – AC 358	282,00

O valor obtido de capacidade de carga estimada por Kanai (2007) se mostrou ligeiramente conservador diante do valor medido, indicando um subdimensionamento para a estaca metálica helicoidal instalada no solo residual de Contagem/MG. O valor de capacidade de carga obtido pelo critério da norma mostra que a carga de ruptura não foi atingida no ensaio (curva foi extrapolada), sendo maior do que a carga máxima aplicada na prova de carga.

Por fim, com o torque médio final de instalação de 15,1 kN.m, e a carga de ruptura do critério da norma (282 kN), foi possível obter o  $K_T$  de 18,7  $m^{-1}$  para a estaca EHM04.

### 3.2 Instrumentação

Com os dados adquiridos nas instrumentações, obteve-se as cargas atuantes nas seções 1 a 4 (S1 a S4), bem como a carga correspondente a resistência por atrito lateral ao longo da haste da estaca. Na Figura 6, tem-se o diagrama de transferência de carga ao longo da profundidade, correspondentes à 10, 50 e 100% da carga de 270 kN, ou seja, 29,59 kN, 139,52 kN e 275,17 kN, respectivamente.

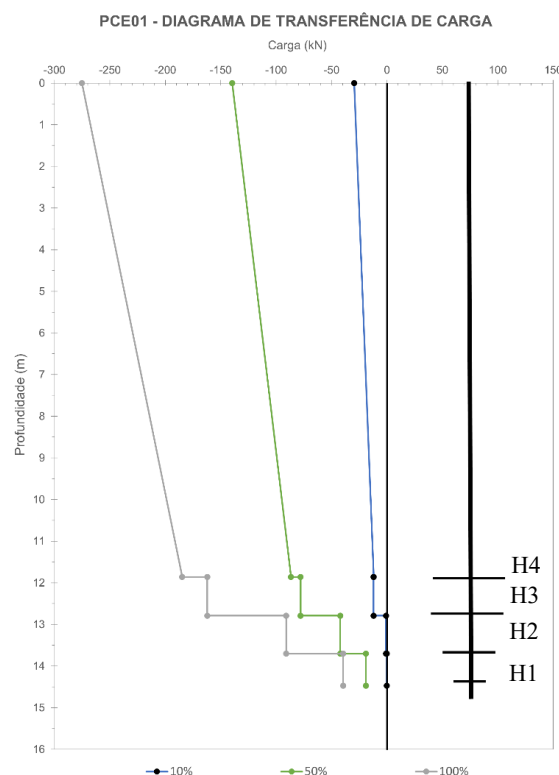


Figura 6. Diagrama de transferência de carga ao longo da estaca.

A transferência de carga apresentou resultados satisfatórios, mobilizando primeiro as hélices superiores e depois as inferiores, como ocorre nas fundações profundas convencionais. Com base nas cargas atuantes nas seções, foi possível obter as cargas atuantes em cada uma das hélices para os mesmos três níveis de carregamento (Tabela 2). Para tal, fez-se a seguinte consideração: hélice 1 (H1) corresponde à carga na seção 1; hélice 2 (H2) corresponde à carga na seção 2 subtraída da seção 1; hélice 3 (H3) corresponde à carga na seção 3 subtraída da seção 2; e hélice 4 (H4) corresponde à carga da seção 4 subtraída da seção 3. O atrito que ocorre na haste, corresponde à carga aplicada subtraída da carga registrada na seção 4. Não foi considerada resistência por atrito nos trechos de haste entre as hélices.

Tabela 2. Cargas atuantes nas hélices e haste da estaca EMH04.

EMH04	Prof. (m)	Consideração	Cargas atuantes (kN)		
			Com 10%	Com 50%	Com 100%
Haste	0 a 11,85	Carga aplicada – S4	17,56	52,93	90,40
H4	11,85	S4 – S3	0,00	8,65	22,64
H3	12,92	S3 – S2	11,24	35,85	71,26
H2	13,83	S2 – S1	0,57	23,06	51,36
H1	14,59	S1	0,22	19,03	39,51

Na Tabela 3 estão representadas as tensões mobilizadas em cada uma das hélices, considerando a relação entre a carga aplicada e a área efetiva das hélices. Para a área da haste, considerou-se o perímetro e comprimento.

Tabela 3. Tensões mobilizadas nas hélices e haste da estaca EMH04.

Hélices	Prof. (m)	Tensões mobilizadas (kPa)		
		Com 10%	Com 50%	Com 100%
Haste	0 a 11,85	4,64	14,00	23,91
H4	11,85	0,00	96,11	251,56
H3	12,92	124,89	398,33	791,78
H2	13,83	9,50	384,33	856,00
H1	14,59	5,50	475,75	987,75

Nas três cargas apresentadas na Tabela 2, relativas a 10, 50 e 100% da carga de tração (270 kN) é possível identificar que a contribuição da hélice 4 (H4) é menos significativa que a contribuição das demais. Nesse caso, a hélice 3 (H3), apresenta maior relevância na resistência da solicitação imposta, principalmente com o aumento de carga aplicada. Provavelmente a menor capacidade da hélice 4 ocorreu porque esta foi feita com mesmo diâmetro da hélice 3, e nesse caso toda a zona de solo mobilizada acima da hélice 4 foi perturbada pela instalação prévia da hélice 3.

Conclusões diversas foram obtidas em outros trabalhos, como por exemplo, Kanai (2007) observou que a maior parte da capacidade de carga foi resistida pela hélice da ponta, em estacas helicoidais multi-hélices instrumentadas, isso porque a ponta das estacas estava em um solo de alta resistência e menos perturbado pela instalação da estaca comparado com o solo acima das hélices superiores (penetrado mais vezes por hélices). Santos Filho (2014) observou que nos deslocamentos iniciais, a carga é suportada pelas hélices da ponta e que nos deslocamentos finais, todas as hélices trabalharam de forma similar, em estacas helicoidais multi-hélices também instrumentadas.

Em termos de otimização de projeto e execução, isso sugere que para essa configuração de estaca metálica helicoidal, inserida no solo residual estudado de Contagem/MG, poderia ser reavaliado o uso da quarta hélice, pois como mostrado na Tabela 3, ela resistiu tensões significativamente menores em comparação as outras hélices.

No que diz respeito às tensões mobilizadas nas hélices apresentadas na Tabela 3, no carregamento de 10% ainda prevaleceu a influência da terceira hélice (H3). Porém, para os maiores carregamentos, a primeira hélice (H1) teve as maiores mobilizações. Isso em decorrência da menor área efetiva para contribuição, tendo em vista que esta hélice possui o menor diâmetro entre as demais e pela menor perturbação no solo acima dessa hélice.

Por fim, a resistência por atrito mobilizada na haste da estaca foi menos significativa comparada a parcela de carga resistida pelas hélices, indicando que a capacidade de carga à tração nesta estaca depende fortemente da contribuição da seção guia, onde se encontram as hélices.

Importante destacar que durante a instalação das estacas, o solo acima das hélices superiores e, no qual se encontra a haste, é perturbado mais vezes que o solo acima da hélice da ponta e isso pode afetar a sua resistência. Na prática, os resultados podem ser diferentes e, por esse motivo, a instrumentação auxilia na interpretação do mecanismo de transferência de carga.

#### 4 CONCLUSÕES

A análise da estaca metálica helicoidal neste estudo, composta por 4 hélices e inserida em solo residual da cidade de Contagem/MG, revelou que para o nível máximo de carga aplicada no ensaio, a terceira hélice suportou maiores cargas do que a hélice da ponta, confirmando que a mobilização da resistência da fundação ocorre do topo para baixo. Por outro lado, para os carregamentos mais elevados, a tensão mobilizada foi maior na hélice da ponta, em razão do solo acima desta ser o menos perturbado durante a instalação.

A quarta hélice pouco contribuiu para a capacidade de carga à tração desta fundação, podendo ser reavaliado o seu uso, na configuração deste estudo. Com relação à resistência por atrito lateral mobilizada na haste da estaca, constatou-se sua pouca influência na capacidade total da fundação.

Em estacas helicoidais, projetadas para suportar elevados esforços de tração, as hélices possuem significativa influência na capacidade de carga. Assim, a realização de instrumentação ao longo da seção guia apresenta-se como uma alternativa viável quando se busca compreender a sua influência e obter a transferência de carga ao longo de uma fundação.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao grupo Neoenergia e ao programa de P&D ANEEL (Projeto PD-07284-0002/2020) pelo financiamento do projeto de pesquisa em andamento e concessão de bolsas de pós-doutorado e doutorado. Ainda, agradecem à empresa Vercon Industrial LTDA, pela disponibilização da área em Contagem/MG para implementação do campo de testes do P&D Tirantes.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo - Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.
- International Code Council Evaluation Service, Inc. (2012). AC 358. *Acceptance criteria for helical pile systems and devices*.
- Kanai, S. (2007) A seismic retrofitting application by means of multi-helix micro-piles. *Proceedings of 23rd U.S. - Japan bridge Engineering Workshop*, Tsukuba, Japan.
- Perko, H. A. (2009) *Helical piles: a practical guide to design and installation*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, USA, 512 p.
- Santos Filho, J. M. S. M. (2014) *Effects of installation of helical piles in tropical soils*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 117 p.
- Silva, D. M. da, Tsuha, C. H. C. (2020) Experimental investigation on the installation and loading performance of model-scale deep helical piles in very dense sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 58 (9), p.1-17.
- Spagnoli, G., Tsuha, C. H. C. (2020) A review on the behavior of helical piles as a potential offshore foundation system. *Marine Georesources & Geotechnology*, 38 (9), p.1013-1036.