

Capacidade de Carga de Estacas Hélice Contínua Curtas Apoiadas em Rocha: Análise de Provas de Carga Estáticas Instrumentadas

Celso Nogueira Corrêa

Engenheiro Civil, ZF & Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, celso@zfsolos.com.br

Frederico Fernando Falconi

Engenheiro Civil, ZF & Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, fred@zfsolos.com.br

Willian Santos Sousa

Engenheiro Civil, ZF & Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, willian@zfsolos.com.br

RESUMO: Neste trabalho, apresenta-se um estudo de caso onde é analisado o desempenho e comportamento de estacas hélice contínua curtas apoiadas em rocha granítica, por meio de provas de carga estáticas instrumentadas, realizadas em subsolo da Zona Norte da cidade de São Paulo – SP. O estudo avalia os resultados de duas provas de carga estáticas instrumentadas, executadas em estacas de diâmetros 0,60 m, com comprimentos de 5,70 m e 6,60 m. Para caracterizar o subsolo local foram realizadas três sondagens à percussão de simples reconhecimento (SPT) e cinco sondagens mistas (SM). Embora seja consenso no meio geotécnico que a deficiência executiva dessa solução impeça que a parcela de ponta seja totalmente utilizada, os resultados indicaram parcelas de ponta significativas e deslocamentos de pequena magnitude, tanto para carga admissível das estacas quanto para duas vezes essa carga, conforme preconizado pela ABNT NBR 6122:2022 para provas de carga estáticas executadas exclusivamente para verificação de desempenho.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas Hélice Contínua, Prova de Carga Estática, Capacidade de Carga.

ABSTRACT: This work, a case study is presented where the performance and behavior of continuous flight auger piles supported on granitic rock are analyzed through instrumented static load tests, carried out in the subsoil of the North Zone of the city of São Paulo – SP. The study evaluates the results of two instrumented static load tests, performed on piles with diameters of 0.60 m, with lengths of 5.70 m and 6.60 m. To characterize the local basement three percussion polls of simple recognition (SPT) and five mixed polls (SM) were performed. Although it is a consensus in the geotechnical area that the executive deficiency of this solution prevents the tip portion from being fully used, the results indicated significant tip portions and small magnitude displacements, both for the allowable piles load and for twice this load, as recommended by ABNT NBR 6122:2022 for static load tests performed exclusively for performance verification.

KEYWORDS: Continuous Flight Auger Piles, Static Load Test, Load Capacity.

1 INTRODUÇÃO

Estacas do tipo hélice contínua monitorada são amplamente utilizadas como solução de fundação, principalmente em empreendimentos imobiliários, pois apresentam vantagens como: rapidez de execução, aplicação em diferentes tipos de solos, processo de execução com baixa vibração e ruído, execução monitorada eletronicamente, além de custo atrativo, decorrente da disponibilidade de uma ampla variedade de equipamentos no mercado. Portanto, é relevante para a comunidade geotécnica, projetistas, consultores, executores e acadêmicos, entender o desempenho e o comportamento dessa solução.

De acordo com Albuquerque (2001), a melhor maneira de se avaliar o desempenho de uma fundação isolada é por meio de prova de carga estática, pois se refere a um ensaio *in loco* com verdadeira grandeza de carga, realizado no terreno onde as fundações serão executadas e com medidas diretas de deslocamentos.

Niyama, Aoki e Chamecki (2019) afirmam que a prova de carga estática está entre os ensaios de campo mais importantes na Engenharia de Fundações, sendo inicialmente empregado no Brasil em 1928, nos estudos das fundações do Edifício Martinelli em São Paulo – SP.

Para entender a transferência de carga da estaca ao longo da profundidade e separar as parcelas de atrito lateral e ponta, métodos matemáticos são aplicados à curva carga x deslocamento indicando com precisão razoável essas parcelas, porém mais recentemente com o avanço da tecnologia a utilização da técnica de instrumentação, tornou essa separação mais precisa. No Brasil, a técnica mais comum consiste na utilização de extensômetros elétricos de resistência, *strain gages*. Esses são instalados diretamente na armadura da estaca ou em barras de aço preparadas antes da execução da estaca, inseridas na armadura. Alternativamente, podem ser instalados após a concretagem através de um tubo guia deixado para esse fim (Albuquerque, 2001).

Diante disso, neste caso, para obter além das medidas convencionais de deslocamentos no topo das estacas, foram instalados *strain gages* ao longo do fuste das mesmas, posicionados em três níveis diferentes. Isso possibilitou a obtenção das deformações específicas das estacas sob os esforços de compressão resultantes do carregamento estático em seu topo. Dessa forma, com a estimativa do módulo de elasticidade do elemento estudado foi possível determinar as cargas ao longo de sua profundidade.

2 PERFIL GEOTÉCNICO LOCAL

As provas de carga estáticas instrumentadas em profundidade, foram realizadas em estacas integrantes da fundação de um empreendimento residencial situado no bairro e distrito da Freguesia do Ó, Zona Norte de São Paulo – SP. O empreendimento, distribuído em uma área aproximada de 3.450,00 m², é constituído por duas torres, contendo térreo, três sobressolos, 22 pavimentos e um barrilete.

Foram realizadas três sondagens à percussão de simples reconhecimento (SPT) e cinco sondagens mistas (SM). De maneira geral, o subsolo compreende uma camada superficial de aterro com presença de entulho, seguida de aproximadamente 3,00 m de argila silto arenosa mole com presença de matéria orgânica, de $N_{SPT} = 5$, sobreposta a camada de solo residual, caracterizado como silte areno argiloso com fragmentos de rocha de $N_{SPT} \geq 60$, sobre formação de rocha granítica sã, com índice de qualidade (RQD) de aproximadamente 98%, e nível do lençol freático a 4,00 m de profundidade, conforme Figura 1.

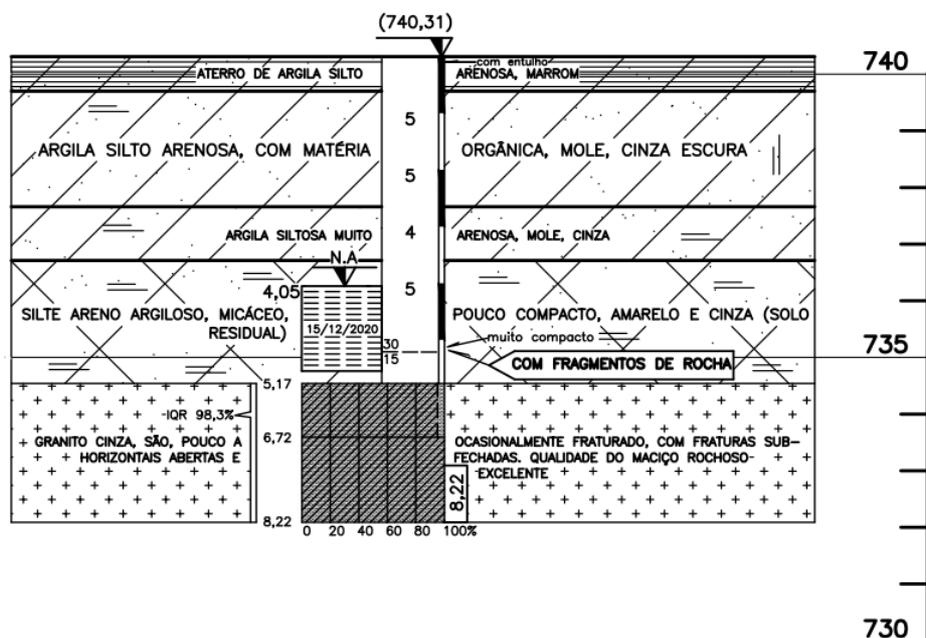


Figura 1. Sondagem representativa.

3 PROVAS DE CARGA ESTÁTICAS

Foram realizadas duas provas de carga estáticas à compressão em estacas do tipo hélice contínua. Estas estacas, denominadas de ETI 1 e ETI 2, possuem diâmetros de 0,60 m e comprimentos de 5,70 m e 6,60 m, respectivamente. A armadura longitudinal é do tipo aço CA-50, composta por seis barras de 16 mm de diâmetro, com 6,00 m de comprimento, sendo 0,60 m de arranque, estribos de 8 mm de diâmetro a cada 0,20 m e 12,50 mm a cada 1,00 m. O concreto utilizado nas estacas pertence à classe C30, bombeável, com slump entre 220 mm e 260 mm e consumo mínimo de cimento 350 kg/m³.

Para o ensaio adotou-se carregamento lento, conforme as diretrizes estabelecidas pela norma Brasileira ABNT NBR 16903:2020 (Solo – Prova de carga estática em fundação profunda).

3.1 Descrição da Instrumentação

Os *strain gages* quando perfeitamente fixados a uma superfície, sofrem variação de resistência elétrica quando esta superfície se deforma ao ser submetida a um determinado carregamento, tal variação pode ser correlacionada com a deformação específica dessa superfície. Após o sinal elétrico ser captado pela caixa de leitura, o mesmo é convertido em valores de deformação específica.

No centro das armações, nas profundidades em que se pretendia conhecer a transferência de carga das estacas para o solo, foram fixados pequenos segmentos de barras de aço CA-50 de 16 mm de diâmetro, com 0,40 m de comprimento. Esses segmentos de barras foram posicionados nas profundidades, 0,40 m (seção de referência), 4,50 m e 5,50 m, para estaca ETI 1 e 0,40 m (seção de referência), 5,40 m e 6,40 m para estaca ETI 2, e, equipados com *strain gages* especiais para aço, de 350 Ω da Excel sensores, colados com cola Tekbond 793 e montados na configuração de ponte de Wheatstone completa.

Segundo Albuquerque (2001), a ponte de Wheatstone é o circuito mais utilizado com *strain gages*. O autor também menciona que a configuração conhecida como “ponte completa”, permite a eliminação dos efeitos de temperatura e deformações resultantes da flexão devido à excentricidades que venham a existir durante a realização do carregamento, resultando apenas nas deformações causadas pelo esforço axial.

Para garantir a confiabilidade dos dados obtidos nos ensaios, os *strain gages* foram protegidos a fim de se evitar danos causados pela umidade e choques mecânicos. Isso foi feito utilizando-se uma resina especial de silicone, borracha de silicone e resina para isolamento elétrico, Scotchcast da 3M. Ver Figura 2.



Figura 2. A) Fixação do segmento de barra com *strain gages*. B) Segmento de barra fixado.

Após a confecção das armações, cada conjunto foi inserido dentro da escavação da estaca ao término de suas respectivas concretagens, conforme Figura 3.



Figura 3. A) Armações prontas. B) Armação posicionada no centro da escavação.

3.2 Descrição das Provas de Carga Estáticas

Os sistemas de reação das provas de carga foram compostos por um conjunto de três vigas metálicas, ancoradas no terreno por quatro estacas do tipo raiz, com diâmetro de 0,40 m em solo e 0,30 m embutidos em rocha. A armação longitudinal das estacas de reação era composta por uma barra de aço especial DYWIDAG GW 36 PLUS ST 690/790, centralizada. O cilindro hidráulico, identificado com número de série 3827/13, e uma célula de carga LIDER, modelo CC600T, foram posicionados entre as vigas metálicas e o bloco de coroamento das estacas ensaiadas. As cargas aplicadas foram monitoradas por meio de um indicador da marca LIDER, modelo LD 1050.

Os deslocamentos verticais das estacas ETI 1 e ETI 2 durante os ensaios foram medidos simultaneamente por quatro deflectômetros da marca MITUTOYO, com precisão de leitura de 0,01 mm. Esses deflectômetros foram posicionados no bloco de coroamento das estacas ensaiadas, diametralmente opostos. Todos os dispositivos de medição, assim como o sistema de carregamento, foram devidamente protegidos contra as intempéries. A Figura 4 ilustra o esquema descrito.

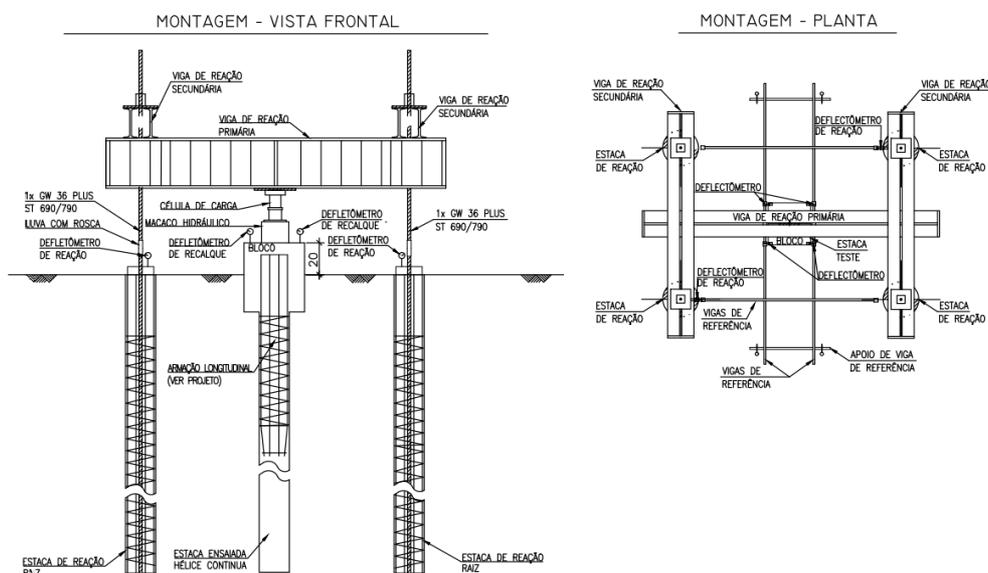


Figura 4. Vista frontal e planta do esquema de montagem (TRIO Fundações LTDA, 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados das Provas de Carga Estáticas

As provas de carga lentas nas estacas ETI 1 e ETI 2 foram executadas em 10 estágios de 200 kN, até atingir a carga máxima de 2.000 kN. Todos os estágios de carregamento estabilizaram em até 30 minutos, exceto no quinto estágio para ETI 1 e nono estágio para ETI 2, onde houve estabilização após 60 minutos. As cargas máximas dos ensaios foram mantidas por 12 horas após a estabilização dos deslocamentos e o início do descarregamento, realizado em quatro estágios de 500 kN mantidos por 15 minutos cada. Após o descarregamento total das estacas foi feita uma leitura e após 30 minutos a última leitura.

Os resultados das provas de carga estáticas podem ser observados na Figura 5, onde estão presentes as curvas carga x deslocamento obtidas no topo das estacas ETI 1 e ETI 2.

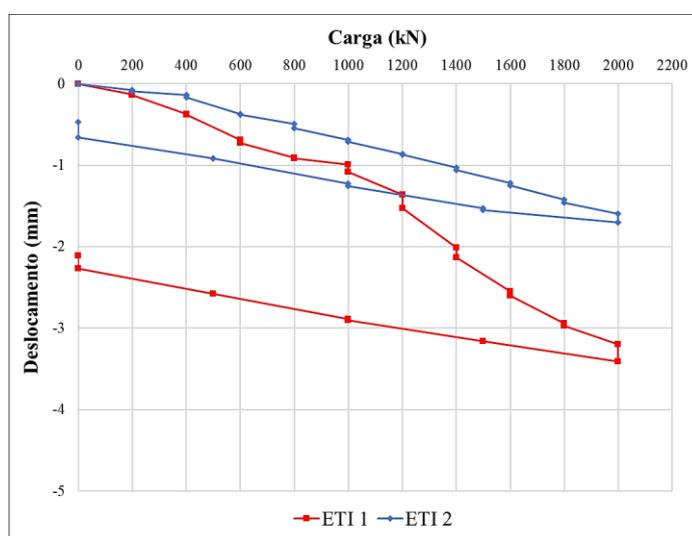


Figura 5. Curvas carga x deslocamento.

Nota-se que na prova de carga ETI 1 o recalque máximo para a carga máxima de ensaio, foi de 3,41 mm, 0,57 % do diâmetro nominal da estaca e recalque residual de 2,11 mm. A prova de carga estática ETI 2 atingiu recalque máximo de 1,70 mm, para a mesma carga máxima da ETI 1, equivalente a 0,28 % do diâmetro nominal da estaca e recalque residual de 0,47 mm. Em ambas as provas de carga a curva carga x deslocamento não caracterizou ruptura nítida na interface solo-estaca até a carga máxima do ensaio, de 2.000 kN.

Na tabela 1 apresenta-se o diâmetro, carga admissível, carga máxima de ensaio, deslocamento máximo obtido ao fim do carregamento e deslocamento residual ao fim do descarregamento, como também, o deslocamento atingido na carga admissível de cada um dos ensaios.

Tabela 1. Características dos ensaios.

Prova de Carga Estática	Ø (cm)	Q _{admissível} (kN)	Q _{ensaio} (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Deslocamento residual (mm)	Deslocamento Q _{admissível} (mm)
ETI 1	60	800	2.000	3,41	2,11	0,91
ETI 2	60	800	2.000	1,70	0,47	0,55

4.2 Resultados das Transferências de Carga

Usualmente o módulo de elasticidade é determinado pela Lei de Hooke, através do gráfico de carga x deformação. Isso é feito utilizando a seção de referência próxima ao topo da estaca, com escavação prévia ao redor da mesma para evitar interferência da parcela de atrito lateral. Com o conhecimento da estimativa do

módulo de elasticidade (E), deformação específica medida (ϵ) e área (A), é possível determinar a carga (F) nos próximos níveis.

Em geral, o módulo de elasticidade é de difícil determinação, enquanto o das estacas metálicas é bem definido, o módulo das estacas moldadas *in loco* é composto de aço e concreto, geralmente proporcional às suas respectivas áreas e módulos. Fellenius (2023) afirma que o módulo de elasticidade do concreto varia consideravelmente ao longo da prova de carga estática, em função da deformação. Fellenius (1989), propõe a utilização do módulo secante (E_s) derivado do módulo tangente (E_T), obtido através do ajuste linear do gráfico do módulo tangente x deformação. O método é detalhado a seguir.

A equação da reta do módulo tangente é dada por:

$$E_T = \Delta\sigma / \Delta\epsilon = A \cdot \epsilon + B \quad (1)$$

Que ao ser integrada, obtém-se:

$$\sigma = A / 2 \cdot \epsilon^2 + B\epsilon \quad (2)$$

Entretanto:

$$\sigma = E_s \cdot \epsilon \quad (3)$$

Combinando as equações 2 e 3, temos:

$$E_s = 0,50 \cdot A \cdot \epsilon + B \quad (4)$$

Onde:

$\Delta\sigma$ = variação de tensão de um incremento de carga para o outro;

$\Delta\epsilon$ = variação de deformação específica de um incremento de carga para o outro;

ϵ = deformação específica medida;

σ = tensão;

A = inclinação da reta do módulo tangente;

B = intercepto da reta do módulo tangente no eixo y.

Devido a um acidente de obra, os cabos da seção de referência das duas provas de carga estáticas romperam, restando apenas dois níveis de *strain gages* por estaca. Tal fato favoreceu a utilização do método de Fellenius (1989) e impossibilitou a aplicação da Lei de Hooke, além do método proposto por Fellenius (1989) ser aplicável também aos registros de deformações afetados pela parcela de atrito lateral. Apresenta-se a seguir os gráficos do módulo tangente vs deformação específica das duas provas de carga estáticas.

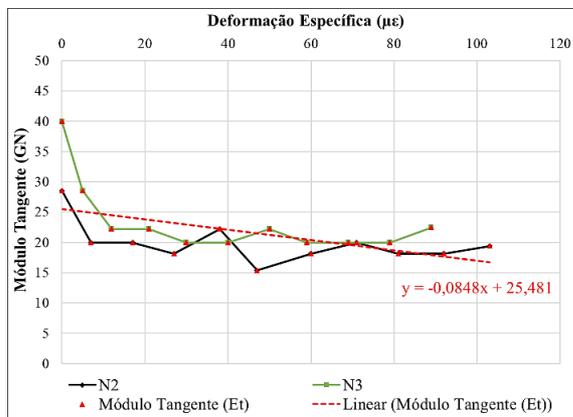


Figura 6. Gráfico do módulo tangente – ETI 1.

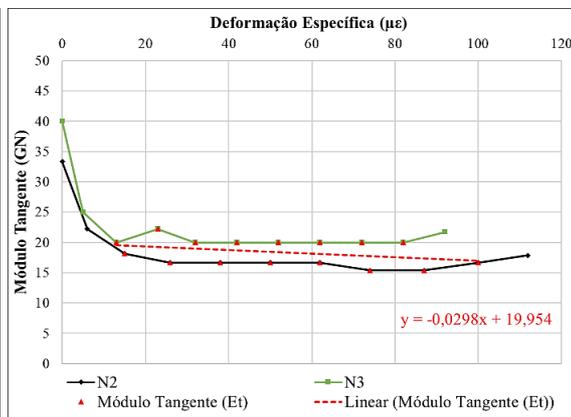


Figura 7. Gráfico do módulo tangente – ETI 2.

A Figura 8, apresenta o gráfico de transferência de carga em profundidade da estaca ETI 1. Com base nos valores obtidos e análise gráfica, observa-se que aproximadamente 96 %, da carga máxima aplicada durante o ensaio, foi resistida pela parcela de ponta da estaca. As parcelas de atrito lateral e ponta foram respectivamente, 80 kN e 1.920 kN.

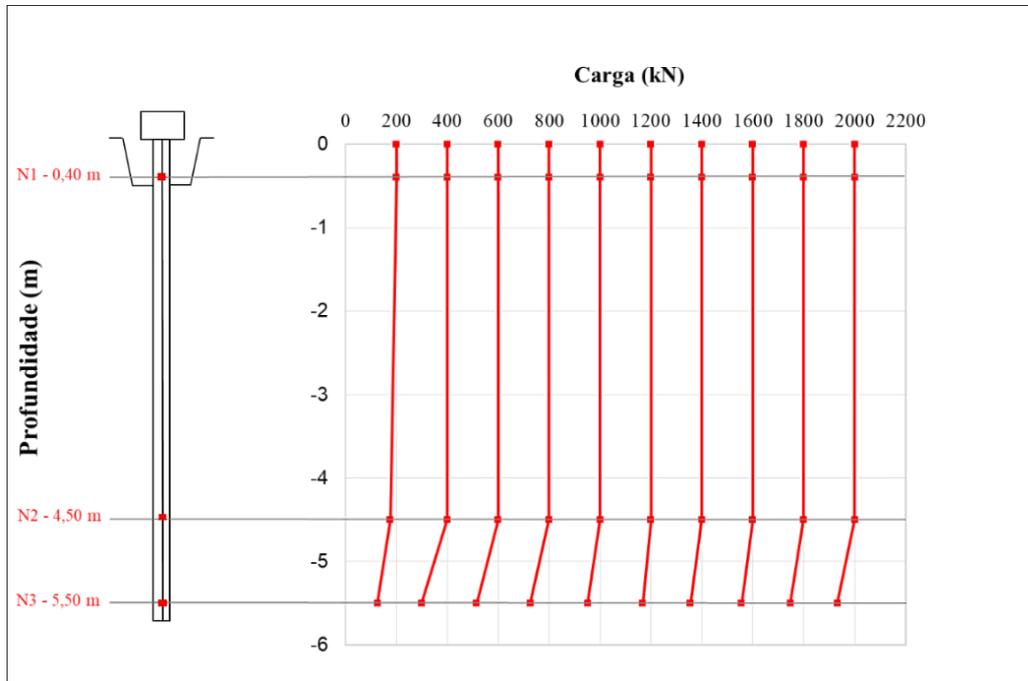


Figura 8. Transferência de carga em profundidade – ETI 1.

Para a estaca ETI 2, pode-se observar na Figura 9 o gráfico de transferência de carga em profundidade. Analisando-se os valores e com base no gráfico, constatou-se que também a maior parte da carga máxima aplicada durante o ensaio também foi absorvida parcela de ponta, da ordem de 85%. Com parcela de atrito lateral e ponta de 290 kN e 1.710 kN, respectivamente.

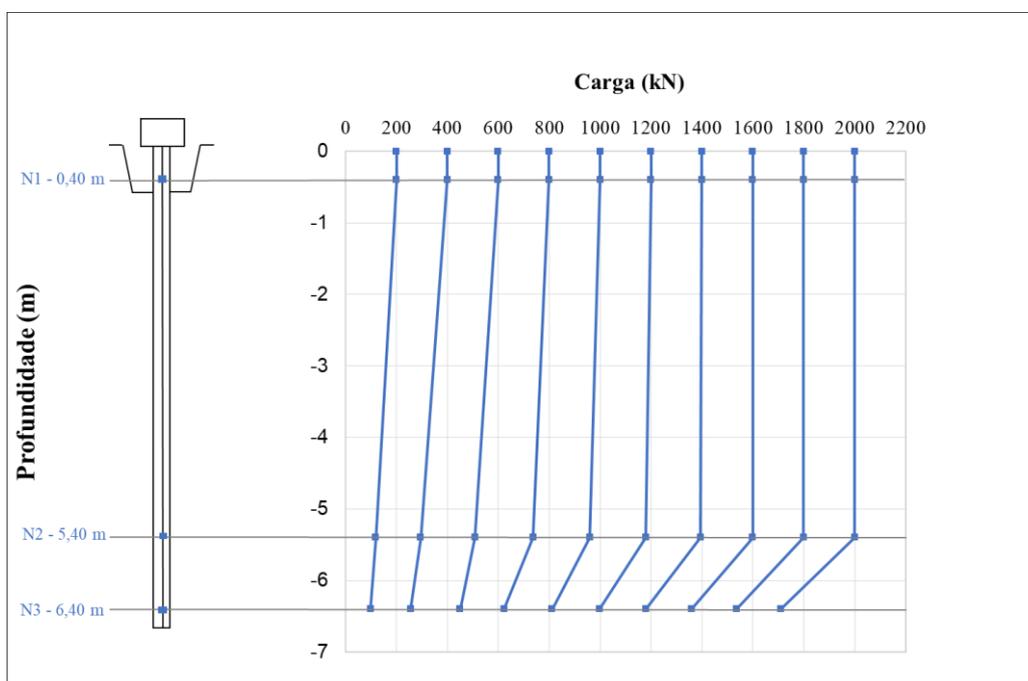


Figura 9. Transferência de carga em profundidade – ETI 2.

5 CONCLUSÕES

No meio geotécnico, há um consenso, especialmente após as discussões na comissão de revisão da ABNT NBR 6122, que culminaram na versão emitida em 2019, de que as estacas hélice contínua apresentam uma deficiência executiva que impede que a parcela de ponta seja totalmente utilizada. Esse fato se agrava quando se trata de estacas curtas ($L < 8,00$ m) em perfis geotécnicos onde o solo de baixa resistência está sobreposto ao topo rochoso e o nível do lençol freático é elevado.

Apesar das recomendações da norma quanto ao momento da concretagem, que orienta o operador a erguer o trado somente após o concreto estar na tubulação, a mesma norma recomenda que a parcela de ruptura da estaca na ponta seja limitada à parcela de ruptura de atrito lateral. Por trás dessa restrição está o fato de que, sendo o fator de segurança a ruptura (FS) igual a dois, a carga admissível da estaca será resistida majoritariamente pela parcela de ruptura de atrito lateral, já que a mobilização do atrito se dá com pequenos deslocamentos, enquanto a parcela de ruptura na ponta é suficiente para atingir o fator de segurança.

Embora pareça que a restrição à parcela de ruptura da estaca na ponta diminua sua importância, na verdade, sem ela, as estacas não teriam um fator de segurança adequado. Este trabalho busca demonstrar que, apesar das recomendações da norma, em perfis geotécnicos semelhantes a esse, é viável utilizar as estacas hélice contínua como estacas com resistência majoritariamente pela parcela de ponta.

AGRADECEMOS

Aos amigos engenheiros geotécnicos, Paulo José Rocha de Albuquerque, Luiz Felipe Goulart Fiscina e Yuri Barbosa pela colaboração na instalação da instrumentação e interpretação dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, P.J.R. (2001) Estacas escavadas, hélice contínua e ômega: estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio, através de provas de carga instrumentadas em profundidade. Tese de Doutorado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo / USP, 60 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo – Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro
- Fellenius, B. H. (2023) *Basics of Foundation Design*. Disponível em: <<https://www.Fellenius.net/>>. Acesso em: 23 mai. 2024.
- Fellenius, B. H. (1989) Tangent modulus of piles determined from strain data. In: Foundation Congress. The American Society of Civil Engineers, ASCE, Geotechnical Engineering Division, Proceedings... F. H. Kulhawy Editor, v. 1, p. 500-510.
- Milititsky, J. (1991) Provas de carga estática. In: 2º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 2, 1991, São Paulo.
- Mucheti, A. S.; Albuquerque, P. J. R.; Rodrigues, T. G. (2018) Desempenho de estacas tipo hélice contínua monitorada na cidade de Santo André – SP. In: 19 Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 19, Salvador.
- Niyama, S.; Aoki, N.; Chamecki, P. R. (2019) Verificação de Desempenho. In: *Fundações Teoria e Prática*. São Paulo: Editora Oficina de Textos, p. 771-797.
- TRIO Fundações LTDA (2022) Relatório: 141/2022. 2022, São Paulo.