

## Comportamento de Estaca Helicoidal Instrumentada Submetida a Carregamento Cíclico de Tração em Solo Arenoso

Manoel Leandro Araujo e Farias  
UFRN, Natal/RN, Brasil, mlafe.engcivil@gmail.com

Yuri Daniel Jatobá Costa  
UFRN, Natal/RN, Brasil, ydjcosta@ct.ufrn.br

Felipy Lima de Queiroz  
UFRN, Natal/RN, Brasil, felipy57@hotmail.com

João Paulo da Silva Costa  
UFRN, Natal/RN, Brasil, joapaulodsc@gmail.com

**RESUMO:** Estaca helicoidal é definida como um conjunto de hélices dispostas ao longo de um eixo central (fuste) que é instalado no solo por meio de torque para suportar cargas de compressão, tração e lateral. Elas apresentam vantagens em relação a outros tipos de fundações, como alta produtividade e possibilidade de serem carregadas logo após a instalação. Neste trabalho, é avaliado o comportamento a esforço de tração de uma estaca helicoidal instrumentada e submetida a carregamento cíclico em solo arenoso. A estaca utilizada possuía três hélices e foi instrumentada com extensômetros elétricos de resistência. Foram realizadas duas provas de carga à tração com carregamentos cíclicos quase-estáticos aplicados em cinco etapas. Em um dos ensaios, foram aplicadas amplitudes cíclicas crescentes com as etapas, enquanto que no outro teste as amplitudes foram mantidas constantes. Os resultados revelaram uma maior parcela de contribuição da hélice de ponta em relação às hélices superiores. Além disso, constatou-se que a forma de carregamento cíclico empregada nos testes interferiu no desempenho da estaca.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estaca helicoidal, Estaca instrumentada, Prova de carga à tração, Carregamento quase-estático, Areia.

**ABSTRACT:** Helical piles are defined as a set of bearing plates arranged along a central axis (shaft) installed in the ground by a driving torque. Helical piles are able to withstand compression, tensile and lateral loading, and present many advantages over other types of foundations, such as high productivity and the possibility of being loaded right after installation. In this paper, the pullout behavior of an instrumented helical pile subjected to cyclic loading in a sandy soil deposit is evaluated. The constructed pile had three bearing plates and was instrumented with electrical resistance strain gauges for measuring the pullout axial load. Two load tests were performed with quasi-static cyclic loads applied in five distinct phases. One of the tests was performed with cyclic amplitudes with increasing loading phases. In the other test, the amplitude was the same for all phases. The results revealed a larger proportional contribution of the lower helix, as compared to the other two upper helices. Also, the cyclic loading path was found to play an influence on the pile performance.

**KEYWORDS:** Helical pile, Instrumented pile, Pullout load test, Quasi-static loading, Sand.

## 1 Introdução

Estaca helicoidal é definida como uma ou um conjunto de hélices organizadas ao longo de um eixo central, denominado de fuste, que é girado no solo para suportar carregamentos. Podem ser projetadas para resistir cargas à compressão, à tração e lateral e apresentam vantagens como rapidez de instalação, mínimo barulho e vibração, simples controle de qualidade e eficiência ambiental. São relativamente leves e de fácil transporte, o que promove um bom custo-benefício e as tornam competitivas no mercado.

Os primeiros usos registrados de uma estaca helicoidal foram há mais de 150 anos, onde serviam para ancorar embarcações e melhorar a maneira como as estruturas eram executadas em solos com baixa capacidade de suporte. As estacas eram feitas de madeira ou de ferro, com seção cilíndrica ou, em alguns casos, octogonal. Entretanto, atualmente existem diversas situações em que as estacas helicoidais são empregadas, tais como dutos enterrados e tirantes (MERIFIELD, 2011). Vale salientar que ainda são utilizadas como reforço de fundações e grampeamento de solo (STEPHENSON, 2003).

No Brasil, o uso de estacas helicoidais teve início em 1998, principalmente para resistir esforços de tração em obras de torres de linha de transmissão de energia elétrica e de telecomunicação (TSUHA, 2007). Desde então, o uso desse tipo de fundação vem crescendo na Engenharia Geotécnica mais tradicional.

Apesar de seu crescente uso, as pesquisas e as literaturas técnicas sobre estacas helicoidais ainda são limitadas, principalmente no que se refere a dados provindos de ensaio de campo e instrumentação. Além do mais, a compreensão do comportamento desse tipo de fundação, com ênfase no desempenho cíclico, ainda apresenta várias lacunas. Diante disso, o presente trabalho tem como principal objetivo analisar o comportamento de estacas helicoidais instrumentadas em seções ao longo do fuste, submetidas a ensaios com cargas cíclicas, e instaladas em um depósito de areia pura.

## 2 Referencial teórico

As estacas helicoidais são geralmente empregadas para resistir cargas de tração em estruturas como torres de comunicações, turbinas eólicas, dutos enterrados e estruturas offshore. Esses carregamentos, normalmente cíclicos, podem influenciar no comportamento e provocar ruptura por degradação da capacidade de carga desse tipo de fundação.

Ensaio realizado por Chan e Hanna (1980) mostraram que o comportamento à carga cíclica em estacas instaladas em areia é afetado pelo número e frequência de ciclos, pela carga média ( $Q_{média}$ ) e pela amplitude cíclica ( $Q_{cíclica}$ ).

De acordo com Andersen *et al.* (2013) a carga cíclica pode ser simétrica, quando a carga média é nula, mas frequentemente é unidirecional — amplitude menor que a carga média — ou bidirecional — amplitude maior que a carga média. Jardine e Standing (2012) mostraram que o ciclo sob condições unidirecionais e bidirecionais possuem características bastante diferentes. Segundo eles, o último apresenta níveis de carga cíclicos normalizados mais elevados e promovem perdas cíclicas mais severas, enquanto o primeiro apresenta um estilo de degradação menos simétrico e mais progressivo.

Além disso, os ciclos podem ser considerados quase-estáticos ou dinâmicos. No primeiro, os ciclos são aplicados com uma baixa frequência de carga, onde as forças de inércia não são consideradas ou são desprezíveis, já no segundo, a frequência de carregamento é maior e as forças de inércia relevantes (WICHTMANN, 2005). O ciclismo de baixo nível pode ter efeitos benéficos sobre a capacidade de carga da estaca, podendo as estacas se auto recuperar com o tempo após perdas modestas da capacidade cíclica. Jardine e Standing (2012) citam ganhos de até 20% na capacidade de carga após a aplicação de carga cíclica estável em estacas. Por sua vez, o carregamento cíclico de alto nível pode ter um impacto muito significativo na capacidade do fuste.

Gavin, Doherty e Tolooyan (2014) instrumentaram e realizaram ensaios de capacidade de carga à tração em uma estaca helicoidal simples (única hélice) fundada em areia densa. A estaca foi instrumentada com extensômetros elétricos (*strain gages*) que permitiram avaliar a distribuição da carga ao longo da estaca. Os resultados revelaram que as hélices são responsáveis pela maior parte da resistência axial, sendo esse resultado também encontrado por Santos Filho (2014), Schiavon (2016) e Queiroz (2018), esse último verificando uma contribuição das hélices para a resistência global superior a 90%.

Carvalho (2007) demonstrou que a primeira hélice e o fuste resistem às cargas aplicadas inicialmente, com o passar dos estágios de carregamento se inicia a contribuição da segunda hélice e nos estágios finais, próximos da ruptura, a hélice inferior apresenta maior resistência.

Sakr (2009) e Tsuha *et al.* (2012) instrumentaram e mostraram que a maior parte da capacidade carga em estacas helicoidais é resistida pela hélice da ponta.

Queiroz (2018) verificou que nos deslocamentos iniciais a contribuição de resistência do fuste superior chega a 42% do total da carga, porém nos deslocamentos finais essa contribuição decresce para cerca de 4%. Isso ocorre, segundo Santos Filho (2014), devido uma melhoria nas propriedades do solo o que faz as hélices trabalharem de forma similar nos deslocamentos finais.

Carvalho (2007) ainda cita que o fuste pode sofrer flexões dependendo de que parte da hélice está resistindo mais a carga e, por fim, menciona que a estaca sofre um esforço de torção contrário ao da instalação, o que provoca flexões ao longo do seu fuste.

Gavin, Doherty e Tolooiyan (2014) encontraram uma considerável contribuição na capacidade de carga à tração nos deslocamentos iniciais, contudo com o aumento nos deslocamentos essa parcela de colaboração sofreu um decréscimo significativo. Li *et al.* (2018) observaram que essa ineficácia do fuste da estaca na capacidade de carga pode ser causada por planos ou fendas de tração de que se formam à medida que as estacas se movem para cima.

### 3 Materiais e métodos

#### 3.1 Protótipo

Foram instrumentadas, com extensômetros coláveis de resistência elétrica (*strain gages*), para medições de cargas axiais, três seções ao longo da estaca adotando-se a nomenclatura de Seção 1 ( $S_1$ ) a Seção 2 ( $S_2$ ) e Seção 3 ( $S_3$ ). A Figura 1 esquematiza, com valores em milímetros, a posição de cada seção instrumentada e as dimensões da estaca helicoidal.

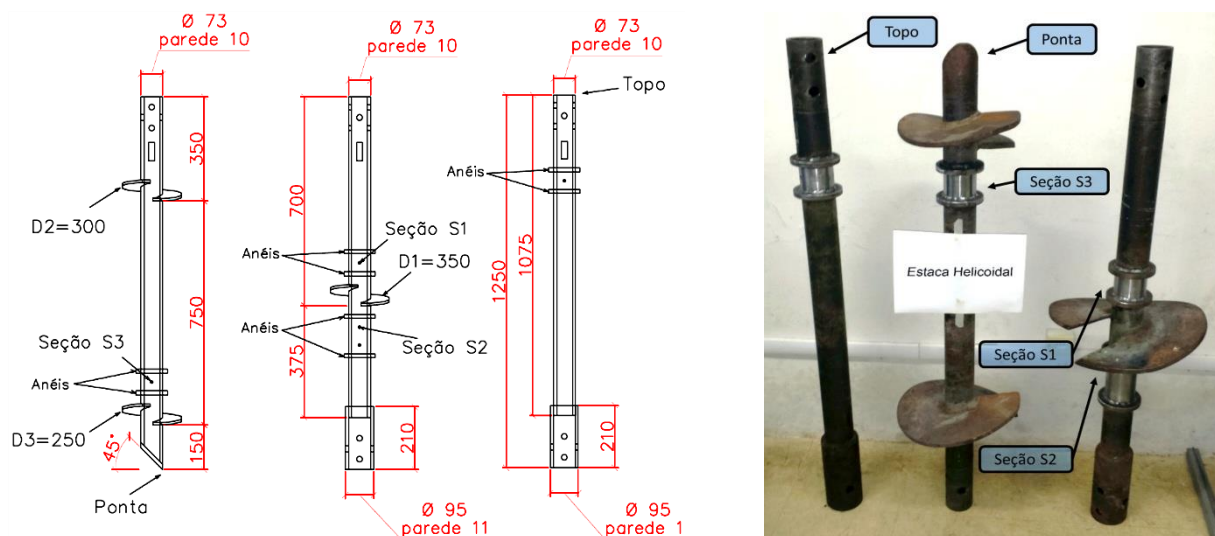


Figura 1. Estaca helicoidal e localização das seções instrumentadas, Queiroz (2018)

#### 3.2 Área experimental

Os ensaios foram realizados em um terreno no Campus Universitário Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Natal-RN (coordenadas UTM 255829.00 m E; 93544649.48 m S). A Figura 2 mostra onde foram instaladas as estacas helicoidais no terreno.

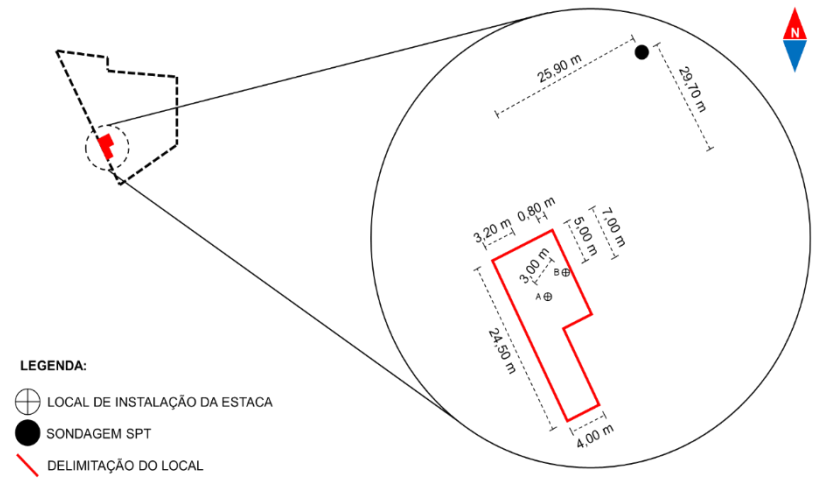


Figura 2. Posição da sondagem e as localizações onde foram instaladas as estacas

Geomorfologicamente, a cidade de Natal enquadra-se na faixa conhecida como litoral nordestino ou das Barreiras, que é caracterizado pela presença de depósitos da Formação Barreiras, rochas praias e recifes (SILVEIRA, 1964).

Em relação aos parâmetros geotécnicos, constatou que o solo, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), é classificado como areia mal graduada, contendo 27% de areia fina, 72% de areia média, 1% de areia grossa. Além disso, o solo apresentou coeficiente de uniformidade de 1,96, coeficiente de curvatura de 0,99 e massa específica dos sólidos de 2,63 g/cm<sup>3</sup>. Ensaios de cisalhamento direto em duas amostras de solo que forneceram ângulo de atrito interno efetivo de 32,3° e 35,9° para densidades relativas de 34% e 71%, respectivamente (COSTA, 2017).

No programa de investigação foram realizadas, ao lado do campo experimental, treze sondagens a percussão de simples reconhecimento com SPT de acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2001). As sondagens foram executadas em locais próximos obtendo, assim, perfis SPT semelhantes. A Figura 3 apresenta o resultado obtido na sondagem SP02 que foi considerado representativo para o solo do campo experimental. Não foi identificado o lençol freático.

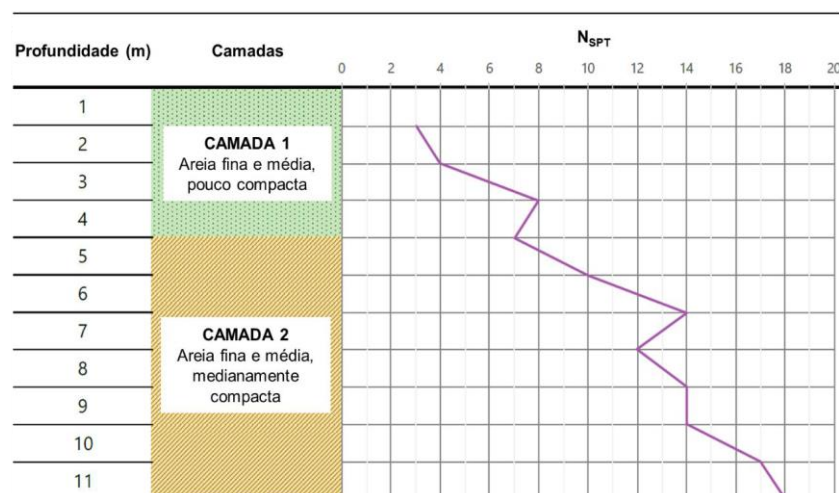


Figura 3. Perfil do solo obtido do furo SP02, Costa (2017)

### 3.3 Profundidade de instalação

Com a conexão alinhada, reta e rígida entre a estaca helicoidal e o motor, a inserção no solo se deu através da aplicação de torque (ou força de rotação) no topo da estaca. As estacas foram inseridas no solo até uma profundidade de 2,57 m e 2,77 m nas posições A e B, respectivamente.

Após o processo de instalação, a profundidade atingida pelas hélices  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$ , que são respectivamente as hélices do topo, meio e ponta, são apresentadas na Tabela 1. Já a Tabela 2 mostra a profundidade de cada seção instrumentada (S) após a instalação.

Tabela 1. Profundidade das hélices após a instalação

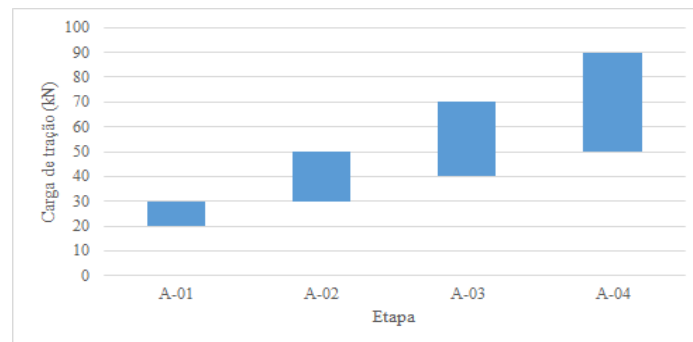
Localização	$H_1$ (m)	$H_2$ (m)	$H_3$ (m)
A	0,84	1,60	2,35
B	1,04	1,80	2,55

Tabela 2. Profundidade das seções instrumentadas após a instalação

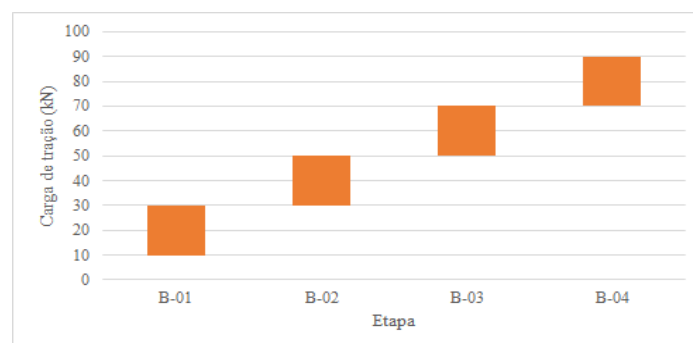
Localização	$S_1$ (m)	$S_2$ (m)	$S_3$ (m)
A	0,77	0,98	2,28
B	0,97	1,18	2,48

### 3.4 Execução dos ensaios

Foram realizados dois ensaios com carga cíclica quase-estática, denominados ensaios A e B, sendo cada ensaio foi dividido em quatro etapas (01, 02, 03, 04). Cada etapa durou uma hora, sendo aplicados 60 ciclos, com um minuto cada, de carga e descarga. Em cada ciclo, a carga aplicada oscilou entre os valores mínimo e máximo, entretanto foram utilizados incrementos de carregamento em condições diferentes. Como apresentado na Figura 4, no Ensaio A foram aplicados incrementos de carregamento e amplitude cíclica crescentes e no Ensaio B esses incrementos e a amplitude cíclica foram mantidos constantes.



(a)



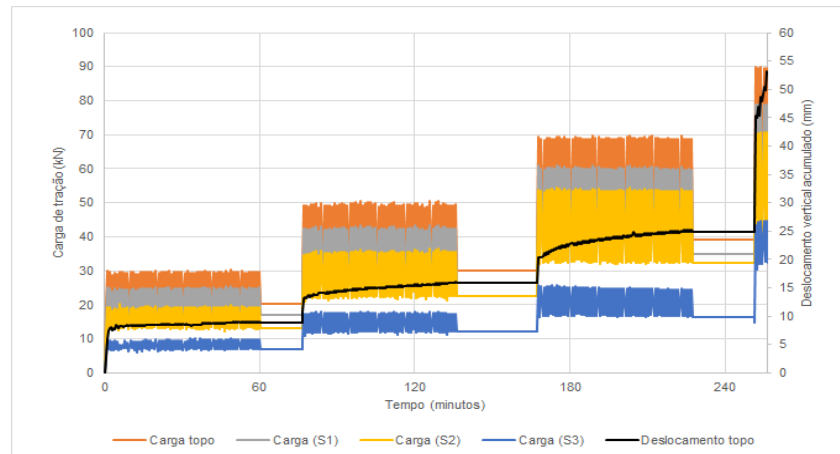
(b)

Figura 4. Evolução das cargas aplicadas em cada etapa: Ensaio A (a) e Ensaio B (b)

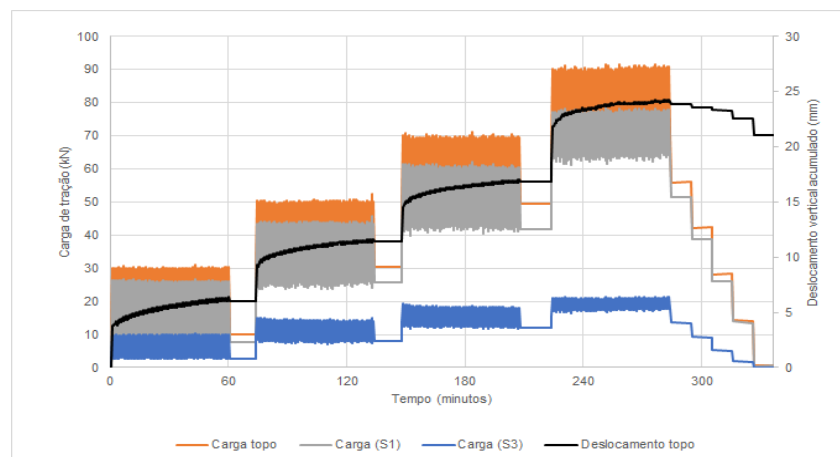
## 4 Resultados e discussões

### 4.1 Ensaio com carga cíclica quase-estática

Na Figura 5 é mostrado o comportamento da carga e do deslocamento ao longo do tempo, em cada ensaio. Como mencionado anteriormente, no Ensaio A foram aplicados incrementos crescentes de carregamento e no Ensaio B esses foram mantidos constantes.



(a)



(b)

Figura 5. Resultados do ensaio com carga cíclica quase-estática: Ensaio A (a) e Ensaio B (b)

No Ensaio A foi constatada a ruptura do sistema solo-estaca na última etapa do ensaio, não acontecendo o mesmo no Ensaio B. Também que no Ensaio B, devido um problema no sensor durante a instalação da estaca, não foram obtidos dados de instrumentação na seção  $S_2$ .

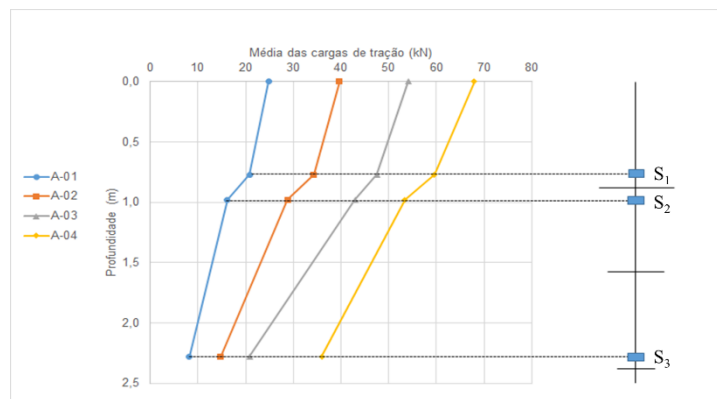
Na Tabela 3 são mostrados valores de carga mínima e máxima, carga média e amplitude cíclica obtidos durante o ensaio.

Tabela 3. Cargas em cada etapa dos ensaios A e B

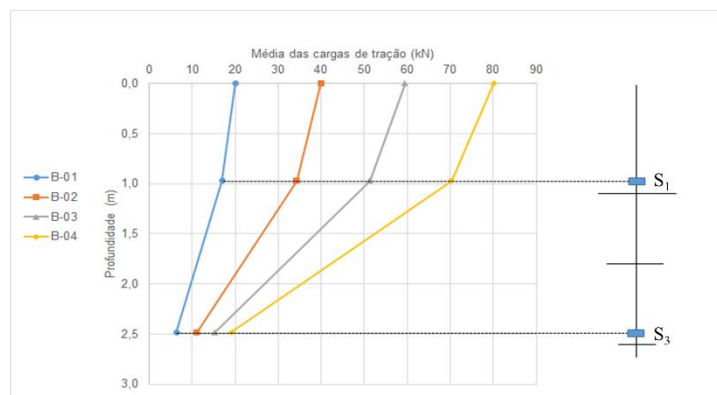
Seção	Etapa	$Q_{\min}$ (kN)		$Q_{\max}$ (kN)		$Q_{\text{média}}$ (kN)		$Q_{\text{cíclica}}$ (kN)	
		Ensaio A	Ensaio B	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio A	Ensaio B	Ensaio A	Ensaio B
Topo da estaca	01	18,68	9,77	30,51	31,04	24,60	20,40	5,91	10,64
	02	28,42	28,57	50,57	52,60	39,50	40,58	11,08	12,02
	03	38,60	47,98	69,87	71,05	54,24	59,52	15,64	11,53
	04	49,19	68,08	89,91	91,55	69,55	79,82	20,36	11,74
Seção S <sub>1</sub>	01	15,76	7,26	25,63	26,72	20,69	16,99	4,93	9,73
	02	24,73	23,56	43,49	45,83	34,11	34,70	9,38	11,14
	03	33,74	39,67	60,93	62,10	47,33	50,88	13,59	11,21
	04	41,46	57,85	78,87	78,44	60,17	68,14	18,70	10,30
Seção S <sub>2</sub>	01	12,13	-	20,13	-	16,13	-	4,00	-
	02	19,18	-	36,50	-	27,84	-	8,66	-
	03	28,61	-	54,48	-	41,54	-	12,93	-
	04	34,16	-	70,85	-	52,51	-	18,34	-
Seção S <sub>3</sub>	01	5,69	2,59	10,17	10,28	7,93	6,43	2,24	3,84
	02	9,80	7,15	18,01	14,98	13,90	11,07	4,11	3,92
	03	14,24	11,71	25,73	19,36	19,99	15,53	5,75	3,82
	04	14,66	15,63	44,76	21,46	29,71	18,55	15,05	2,92

## 4.2 Transferência de carga

Os diagramas de transferência de carga são apresentados na Figura 6.



(a)



(b)

Figura 6. Diagrama de transferência de cargas: Ensaio A (a) e Ensaio B (b)

Com os dados, se observa que, obviamente, as cargas diminuem com o aumento da profundidade da instrumentação. Partindo para a contribuição de resistência provenientes do fuste e das hélices, os valores médios obtidos nos Ensaio A e B são apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente (os valores em parênteses representam a parcela de carga em percentual).

Tabela 4. Parcelas de contribuição de resistências no Ensaio A

Etapa	Total <sup>1</sup> (kN)	F <sub>1</sub> <sup>2</sup> (kN)	H <sub>1</sub> <sup>3</sup> (kN)	H <sub>2</sub> +F <sub>2</sub> <sup>4</sup> (kN)	H <sub>1</sub> +H <sub>2</sub> +F <sub>2</sub>	H <sub>3</sub> <sup>5</sup> (kN)
A-01	25	4 (16)	5 (20)	8 (32)	13 (52)	8 (32)
A-02	40	5 (12)	6 (15)	14 (35)	20 (50)	15 (37)
A-03	54	7 (13)	5 (9)	22 (40)	27 (50)	21 (39)
A-04	68	8 (12)	6 (8)	17 (25)	23 (33)	36 (53)

Tabela 5. Parcelas de contribuição de resistências no Ensaio B

Etapa	Total <sup>1</sup> (kN)	F <sub>1</sub> <sup>2</sup> (kN)	H <sub>1</sub> +H <sub>2</sub> +F <sub>3</sub> <sup>6</sup> (kN)	H <sub>3</sub> <sup>5</sup> (kN)
B-01	20	3 (15)	11 (55)	6 (30)
B-02	40	6 (15)	23 (57)	11 (27)
B-03	59	8 (13)	36 (61)	15 (25)
B-04	80	10 (12)	51 (63)	19 (24)

Com a instrumentação, constatou-se que contribuição de resistência do fuste superior ficou em torno de 15% da carga total na primeira etapa das provas de carga, porém com o passar das ciclos esse valor apresentou redução.

No Ensaio A, as contribuições percentuais na carga resistida pelo elemento de fundação em todas as etapas de carregamentos oriundas das hélices da ponta (H<sub>3</sub>) foi sempre maior que a das hélices de topo (H<sub>1</sub>) e intermediária (H<sub>2</sub>). Além disso, as contribuições percentuais de H<sub>1</sub> e H<sub>2</sub> diminuíram e a de H<sub>3</sub> aumentou com as etapas. Se avaliado o desempenho do conjunto (H<sub>1</sub> + H<sub>2</sub> + F<sub>2</sub>) deste ensaio, nota-se da mesma forma uma redução da contribuição percentual das hélices superiores em contraposição ao aumento da contribuição percentual da hélice inferior (H<sub>3</sub>). Um fator que deve ter colaborado para a mobilização maior da parcela de carga na hélice inferior (H<sub>3</sub>) é o aumento da resistência do solo com a profundidade, como mostra a Figura 3 e a menor perturbação do solo da região da hélice de ponta, durante a instalação da estaca. No Ensaio B, apesar de não ser possível separar a carga das hélices H<sub>1</sub> e H<sub>2</sub>, é possível deduzir que, da mesma forma que em A, a hélice inferior H<sub>3</sub> mobilizou proporcionalmente mais carga que H<sub>1</sub> e H<sub>2</sub> ao longo das etapas.

Porém enquanto que no Ensaio A o percentual de carga na hélice de ponta H<sub>3</sub> aumentou e no conjunto superior (H<sub>1</sub> + H<sub>2</sub> + F<sub>2</sub>) reduziu nas etapas de carregamento, o Ensaio B apresentou aumento da contribuição percentual do conjunto superior (H<sub>1</sub> + H<sub>2</sub> + F<sub>3</sub>) concomitantemente com a redução da contribuição percentual de H<sub>3</sub> (assume-se nesta comparação que as parcelas de fuste F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub> sejam pequenas e iguais entre si). Neste aspecto, tal diferença entre os resultados de A e B pode ser atribuída à forma de carregamento distinto que foi empregada nos dois testes. Apesar de ambos os ensaios terem atingido as mesmas cargas máximas em cada etapa de carregamento, as amplitudes das etapas foram diferentes. No Ensaio A, foram utilizadas amplitudes cíclicas crescentes e no Ensaio B, as amplitudes de carga foram constantes. Ademais, houve sobreposição de carregamentos entre as três últimas etapas do Ensaio A, aumentando-se a rigidez do sistema. Por outro lado, no Ensaio B as amplitudes cíclicas foram constantes e menores que em A. Em última

<sup>1</sup>Carga total aplicada na cabeça da estaca, medida pela célula de carga.

<sup>2</sup>Carga resistida por atrito lateral no fuste acima da hélice de topo, dada pela subtração da carga total pela carga na seção S<sub>1</sub>.

<sup>3</sup>Carga correspondente a hélice H<sub>1</sub>. Determinada subtraindo-se a carga na seção S<sub>1</sub> pela carga na seção S<sub>2</sub> (Somente para o Ensaio A).

<sup>4</sup>Carga resistida pela hélice H<sub>2</sub> mais o fuste compreendido entre as seções S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub>. Determinada pela subtração da carga na seção S<sub>2</sub> pela carga da seção S<sub>3</sub> (Somente para o Ensaio A).

<sup>5</sup>Carga na hélice de ponta, H<sub>3</sub>, obtida na seção S<sub>3</sub>.

<sup>6</sup>Carga resistida pela hélice H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> e o fuste compreendido entre as seções S<sub>1</sub> e S<sub>3</sub>. Determinada pela subtração da carga na seção S<sub>1</sub> e S<sub>3</sub> (Somente para o Ensaio B).



instância, a forma de carregamento aplicada em A levou o sistema à ruptura, causando uma substancial transferência da carga das hélices superiores para a hélice de ponta ( $H_3$ ).

## 5 Conclusões

O presente trabalho apresentou uma análise do comportamento de uma estaca helicoidal instrumentada submetidas a cargas cíclicas e instalada em um depósito de areia pura. A estaca, de três hélices, foi instrumentada em três seções ao longo do fuste e foram realizadas duas provas de carga cíclica quase-estática à tração. Nas provas de carga, foram aplicados carregamentos cíclicos em cinco etapas distintas. Nos dois ensaios, a carga máxima atingida em cada etapa foi a mesma, porém, em um dos ensaios a amplitude cíclica foi aumentada ao longo das etapas, ao passo que no outro teste, a amplitude cíclica foi mantida constante.

Com a instrumentação, constatou-se que contribuição de resistência do fuste superior ficou em torno de 15% da carga total na primeira etapa das provas de carga, porém com o passar dos ciclos esse valor apresentou redução. A parcela de contribuição da hélice de ponta foi maior que as parcelas de contribuição das hélices superiores, devido ao aumento da resistência do solo com a profundidade e à menor perturbação de instalação sofrida pelo solo nesta região.

A forma de carregamento cíclico empregada nos testes interferiu no desempenho da estaca. Um carregamento de cinco etapas com amplitudes cíclicas crescentes levou ao aumento da parcela de carga mobilizada na hélice de ponta e à redução da parcela mobilizada nas hélices superiores. Por outro lado, um carregamento de cinco etapas com amplitudes cíclicas constantes resultou em um comportamento oposto. Na última etapa de carregamentos cíclicos, a carga mobilizada na hélice de ponta no ensaio com amplitudes crescentes foi de 53%, enquanto que no ensaio com amplitudes constantes, a mesma atingiu 24%.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido à esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). NBR 6484. *Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Andersen K. A.; Puech A. A.; Jardine R. J. (2013) *Cyclic resistant geotechnical design and parameter selection for offshore engineering and other applications*. Paris, TC-209 Workshop, “Design for cyclic loading: piles and other foundations”, Publisher: Presses des Ponts, p. 9-44.
- Carvalho, I. P. G. (2007) *Estudo teórico-experimental da capacidade de carga à tração e compressão de estacas metálicas helicoidais*. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 179 p.
- Chan, S.; Hanna, T. H. (1980) Repeated loading on single piles in sand. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 106 (2), p. 171-188.
- Costa, J. P. da S. (2017) *Uplift behaviour of helical piles in sand subjected to cyclic loading*. Master’s Thesis – Department of Civil Engineering, Centre of Technology, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, RN, 126 p.
- Gavin, K.; Doherty, P.; Tolooiyan, A. (2014) Field investigation of the axial resistance of helical piles in dense sand. *Canadian Geotechnical Journal*, Canadian Science Publishing, v. 51, n. 11, p. 1343-1354.
- Jardine, R. J.; Standing, J. R. (2012) Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand. *Soils And Foundations*, Elsevier BV, v. 52, n. 4, p. 723-736.

- Li, W.; Zhang, D. J. Y.; Segoo, D. C.; Deng, L. (2018) Field Testing of Axial Performance of Large-Diameter Helical Piles at Two Soil Sites. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 144, n. 3, p. 060170211-060170215.
- Merifield, R. S. (2011) Ultimate Uplift Capacity of multiplate Helical Type Anchors in Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 137, n. 7, p. 704-716.
- Queiroz, F. L. (2018) *Avaliação de instalação e desempenho em terreno arenoso de uma estaca helicoidal instrumentada*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 86 p.
- Sakr, M. (2009) Performance of helical piles in oil sand. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 46 (9), p. 1046-1061.
- Santos Filho, J. M. S. M. (2014) *Efeito da instalação de estacas helicoidais em solo tropical*. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 117 p.
- Schiavon, J. A. (2016) *Behavior of helical anchors subjected to cyclic loading*. Doctoral Thesis under joint supervision between the University of São Paulo and Nantes Angers and Le Mans University, São Carlos, SP, 300 p.
- Silveira, J. D. (1964) *Morfologia do litoral*. In: Azevedo A. (ed.) *Brasil: A terra e o homem*. São Paulo, Editora Nacional, p. 253-305.
- Stephenson, R. W. (2003) *Design and Installation of Torque Anchors for Tiebacks and Foundations*. Missouri University of Science and Technology, Rolla, 45 p.
- Tsuha, C. H. C. (2007) *Modelo teórico para controle da capacidade de carga a tração de estacas metálicas helicoidais em solo arenoso*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 253 p.
- Tsuha, C. H. C.; Aoki, N.; Rault, G.; Thorel, L.; Garnier, J. (2012) Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 49 (9), p. 1102-1114.
- Wichtmann, T. (2005) *Explicit accumulation model for non-cohesive soils under cyclic loading*. PhD thesis, Ruhr University Bochum, Bochum, 288 p.