

Comparativo entre previsão de carga em estacas hélice contínua por métodos semi-empíricos e resultados de ensaios bidirecionais.

Alysson Santos Resende

Mestre em Engenharia Civil, Arcos – Engenharia de Solos, Belo Horizonte, Brasil, alysson@arcos.eng.br

Nilton Andrade Chaves

Engenheiro Civil, Arcos – Engenharia de Solos, Belo Horizonte, Brasil, nilton.chaves@arcos.eng.br

Edmilson Ney Ferreira de Freitas

Engenheiro Civil, Arcos – Engenharia de Solos, Belo Horizonte, Brasil, edy@arcos.eng.br

Paulo José Rocha de Albuquerque

Engenheiro Civil, Professor Associado FECFAU - UNICAMP, Campinas, Brasil, pjra@unicamp.br

O trabalho tem como objetivo comparar a previsão da capacidade de carga em estacas hélice contínua monitorada calculada por 05 métodos semi-empíricos a partir dos perfis de solo estabelecidos por ensaio SPT, com os resultados obtidos em provas de carga bidirecionais. Aos resultados dos ensaios SPT foram aplicados aos métodos de Décourt-Quaresma (1978), Velloso (1979), Teixeira (1996), Aoki-Velloso (1975) e Alonso (1996). A partir dos valores obtidos, definiu-se o posicionamento das células para realização dos ensaios bidirecionais. Foram analisados os resultados de ensaios que apresentaram deslocamentos similares para fuste e ponta fictícia ou que apresentaram ruptura geotécnica de um dos trechos. Para o ensaio que não apresentou ruptura geotécnica foi realizada a extrapolação do fuste e da ponta fictícia segundo Van Der Veen, modificado por Aoki (1976). A mesma medida foi adotada para os trechos que não apresentaram ruptura nos demais casos. Os resultados dos ensaios bidirecionais foram comparados com as previsões de carga de cada método verificando a acuracidade deles. As comparações permitiram estabelecer quais os métodos mais indicados para estudo do posicionamento da células expansivas em estacas hélice contínua para obtenção do máximo desempenho do ensaio bidirecional.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio bidirecional, estacas hélice contínua, célula expansiva, SPT.

ABSTRACT: The aim of the paper is to compare the prediction of load capacity in CFA piles calculated by 05 semi-empirical methods based on soil profiles established by SPT testing, with the results obtained in bidirectional load tests. At the results of the SPT tests were applied to the methods of Décourt-Quaresam (1978), Velloso (1979), Teixeira (1996), Aoki-Velloso (1975) and Alonso (1996). From the values obtained, the positioning of the cells was defined to carry out the bidirectional tests. The results of tests that presented similar displacements for shaft and fictitious tip or that presented geotechnical rupture of one of the sections were analyzed. For the test that did not present geotechnical rupture, the shaft and fictitious tip were extrapolated according to Van Der Veen, modified by Aoki (1976). The same measure was adopted for the sections that did not present rupture in the other cases. The results of the bidirectional tests were compared with the load predictions of each method, verifying their accuracy. The comparisons made it possible to establish which methods are most suitable for studying the positioning of expansive cells in CFA piles to obtain maximum performance of the bidirectional test.

KEYWORDS: bidirectional load test, CFA piles, Expansive cell, SPT.

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios diretos em campo de capacidade de carga são a melhor forma de analisar o real desempenho das fundações. Métodos teóricos e semi-empíricos são utilizados para elaboração de projetos, porém é unanimidade no meio geotécnico a importância das provas de carga para avaliação do comportamento das fundações quando submetidas a esforços.

As provas de carga com células expansivas, ensaios bidirecionais, são ferramentas para avaliação do comportamento das fundações quando submetidas a esforços assim como os demais ensaios de campo de capacidade de carga: provas de carga estática e ensaio de carregamento dinâmico. O grande diferencial do mesmo é a facilidade de sua preparação, pois o equipamento é introduzido na estaca a ser ensaiada sem a necessidade de preparação de estruturas de reação, blocos de ensaio e outras necessidades demandadas por outros tipos de ensaios.

Em contrapartida ao ensaio convencional, os macacos hidráulicos especiais, células expansivas, são equipamentos de sacrifício, pois são concretados na estaca no momento de sua execução. Segundo a NBR 16903 (ABNT, 2020) A prova de carga estática consiste em aplicar esforços à fundação profunda e registrar os deslocamentos correspondentes. Os esforços aplicados podem ser tração, compressão ou flexocompressão, nas direções vertical, horizontal ou inclinada. A escolha do tipo de prova de carga deve ser feita pelo projetista ou consultor, levando em conta as particularidades do carregamento a que a estaca ou tubulão está submetido na obra. Esse é também o princípio do ensaio bidirecional com células expansivas onde o sistema de reação estável é a própria estaca seguindo o princípio da terceira lei de Newton: para toda ação haverá uma reação correspondente de mesma intensidade, direção, mas com sentido oposto.

As estacas do tipo hélice contínua vêm conquistando muitos adeptos, tanto por parte dos consultores como dos projetistas. Isso se deve ao processo de execução que possui muitas vantagens com relação a outros tipos de fundações como não ser afetado pelo nível do lençol freático, não interferir nas edificações vizinhas por não provocar vibrações e ruídos, grande velocidade na execução, sendo capaz de implicar em redução do cronograma de obra (ALMEIDA NETO, 2002 citado por MASCAGNA COSTA et al., 2021 e por RESENDE et al., 2023).

Pesquisadores, em todo o mundo, tentam correlacionar equações que possuem relações diretas com métodos práticos (provas de carga), que variam principalmente de acordo com o tipo de investigação geotécnica, assim como o solo encontrado em cada região, gerando assim, métodos semi-empíricos de previsão de capacidade de carga. No Brasil, o SPT é a investigação geotécnica mais difundida e realizada, Militisky (1986) aborda o assunto dizendo que: “a engenharia de fundações correntes no Brasil pode ser descrita como a geotecnia do SPT”. Assim os calculistas de fundações têm a preocupação de estabelecer métodos de cálculo da capacidade de carga de estacas utilizando os resultados das sondagens à percussão (MANTUANO, 2013).

O trabalho tem como objetivo comparar a previsão da capacidade de carga em estacas hélice contínua monitorada calculada por 05 métodos semi-empíricos a partir dos perfis de solo estabelecidos por ensaio SPT, com os resultados obtidos em provas de carga bidirecionais.

2 METODOLOGIA

2.1 Análises de sondagens SPT

As estacas ensaiadas foram executadas em terreno em situado na região da Praia do Futuro, município de Fortaleza, caracterizada por um empilhamento estratigráfico que compreende dois domínios geológicos: unidade basal e planície costeira.

As sondagens mais próximas de cada estaca ensaiada estão representadas nas figuras 01 e 02.

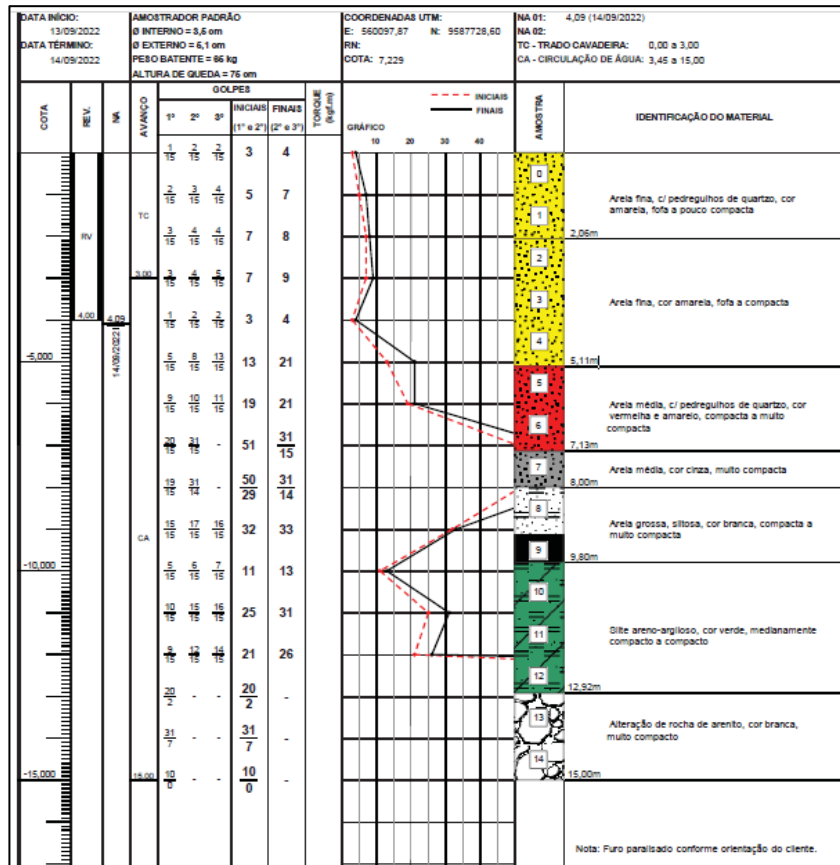


Figura 1. Sondagem dos casos 01 e 02.

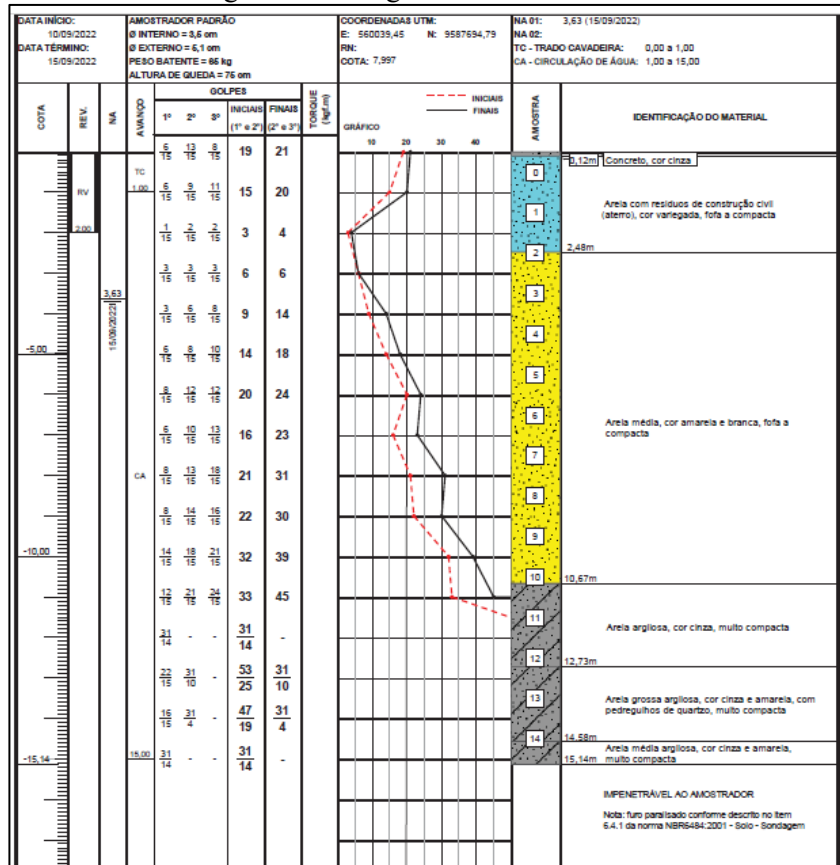


Figura 2. Sondagem dos casos 03 e 04.

Os resultados dos ensaios SPT foram aplicados aos métodos de Décourt-Quaresma (1978), Velloso (1979), Teixeira (1996), Aoki-Velloso (1975) e Alonso (1996) para verificar qual seria o resultado previsto de atrito lateral e de resistência da ponta fictícia. Em seguida, foram executadas as provas de carga bidirecionais com o objetivo de comparar a previsão e o resultado real.

As características gerais dos quatro casos estudados apresentaram variabilidade quanto aos seus diâmetros e comprimentos das estacas, o posicionamento das células foi o mesmo em relação à ponta das estacas uma vez que foi utilizada a mesma sondagem de referência para os casos 01 e 02 e para os casos 03 e 04. Na Tabela 1 são apresentadas tais propriedades de cada caso.

Tabela 1. Características gerais para cada caso analisado

Caso	Estaca	L (m)	T _{inf} (m) ^[1]	Ø (m)	Q _{trabalho} (kN)	Q _{ensaio} (kN)
01	Hélice contínua	10,80	2,80	0,50	1000,0	2000,0
02	Hélice contínua	11,00	1,00	0,60	1450,0	2900,0
03	Hélice contínua	10,80	2,80	0,50	1000,0	2000,0
04	Hélice contínua	11,00	1,00	0,60	1450,0	2900,0

^[1] Comprimento do segmento inferior, distância a partir da ponta referente ao ponto de instalação da célula

Sendo:

Q_{trabalho} = Carga de trabalho da estaca

Q_{ensaio} = Carga prevista para ensaio da estaca, duas vezes a carga de trabalho conforme NBR 6122 (ABNT, 2019).

2.2 Prova de carga bidirecional

A prova de carga bidirecional com células expansivas hidrodinâmicas consiste basicamente na instalação das células de carga, previamente aferidas, dentro do fuste da estaca, engastadas na armação. Segundo Silva (1983), a aplicação de carga numa célula colocada em estaca, solicita a parte superior do fuste com força que reage contra a parte inferior, juntamente com a base. Este princípio elementar de ação e reação é mantido em equilíbrio, na medida em que a solicitação aumenta, até observar-se que uma dada pressão no manômetro da bomba dispara um dos deflectômetros. Isto indica a ruptura do fuste ou base do elemento teste e permite observar que, durante o deslocamento observado, a pressão no manômetro se mantém constante.

Para a realização do ensaio aguarda-se a cura do concreto até se atingir a resistência mínima suficiente para a realização do ensaio, normalmente superior a 14 dias. Os deslocamentos da ponta são medidos através de hastes metálicas, solidarizadas às bases das células, previamente instaladas no fuste da estaca. O deslocamento do fuste é medido através do movimento ascendente da parte superior da estaca. Os extensômetros utilizados para medição dos deslocamentos apresentam leitura direta com precisão de 0,01mm (CASTRO E RESENDE, 2015).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 2 são apresentados os valores encontrados para a carga máxima total aplicada e os deslocamentos máximo e residuais tanto para a ponta fictícia quanto para o fuste dos quatro casos. Em seguida, na Figura 3 são apresentadas as curvas carga-deslocamento obtidas dos ensaios analisados, onde os valores de deslocamentos positivos são referentes ao trecho superior da estaca (fuste) e os negativos relacionados ao segmento inferior (ponta fictícia).

Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos

Caso	Ø (m)	Carga máxima aplicada (kN)	Deslocamentos máximos (mm)		Deslocamentos Residuais (mm)	
			Ponta fictícia	Fuste	Ponta fictícia	Fuste
1	0,50	2085,72	-13,71	8,15	-10,13	5,61
2	0,60	1669,80	-129,74	6,35	-126,82	6,03
3	0,50	1604,40	-17,57	116,34	-14,12	115,47
4	0,60	2323,20	-57,24	78,89	-49,70	75,11

A previsibilidade de valores de carga de ruptura para ponta fictícia e fuste segundo os 05 métodos semi-empíricos aplicados aos resultados de SPT e os resultados de carga aplicada para cada trecho obtidos nos ensaios bidirecionais estão indicados na Tabela 3. Na coluna observações está indicada se houve ou não ruptura na carga aplicada.

Os trechos que não apresentaram ruptura foram submetidos a análise de Van Der Veen modificado por Aoki (1976) com o objetivo de estabelecer a carga prevista de ruptura. Os valores obtidos pelo teste e extrapolados de acordo com essa análise estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 3. Resumo dos resultados obtidos

Caso	Carga (kN)	Decourt- Quaresma	Velloso	Teixeira	Aoki- Velloso	Alonso	Ensaio	Observação
01	$Q_{L\text{ rup}}$	490	750	700	720	770	1043	Sem ruptura
	$Q_{P\text{ rup}}$	940	1660	2210	2650	2350	1043	
02	$Q_{L\text{ rup}}$	1160	1670	1400	1420	1510	835	Ruptura ponta
	$Q_{P\text{ rup}}$	680	1560	1690	2070	2950	835	
03	$Q_{L\text{ rup}}$	720	850	860	730	940	802	Ruptura fuste
	$Q_{P\text{ rup}}$	1110	1860	2270	3030	2710	802	
04	$Q_{L\text{ rup}}$	1280	1570	1560	1400	1690	1162	Ruptura fuste
	$Q_{P\text{ rup}}$	1650	2320	3120	4460	3980	1162	

Sendo:

$Q_{L\text{ rup}}$ = Carga de ruptura prevista para atrito lateral do segmento acima da célula, fuste.

$Q_{P\text{ rup}}$ = Carga de ruptura prevista para a ponta fictícia (atrito lateral do segmento inferior mais resistência de ponta da estaca).

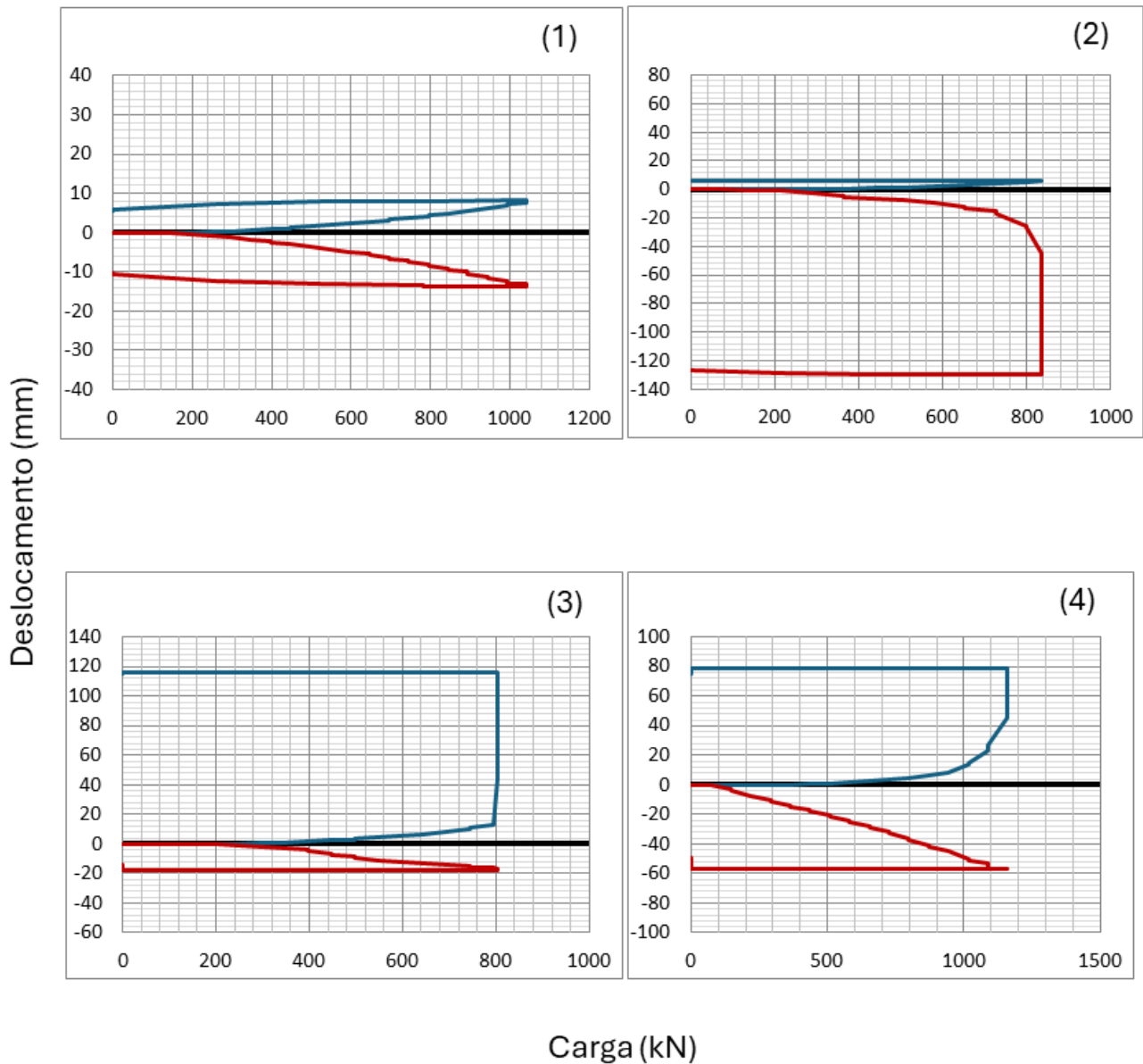


Figura 3. Curvas carga-deslocamento: (1) Caso 01, (2) Caso 02, (3) Caso 03, (4) Caso 04.

Tabela 4. % dos resultados estimados de ruptura em relação a ruptura real ou extrapolada

Caso	Carga (kN)	Decourt-Quaresma	Velloso	Teixeira	Aoki-Velloso	Alonso	Ruptura real ou extrapolada [1]
1	$Q_{L\text{ rup}}$	42%	65%	61%	62%	67%	1157
	$Q_{P\text{ rup}}$	86%	151%	201%	242%	214%	1097
2	$Q_{L\text{ rup}}$	134%	192%	161%	164%	174%	868
	$Q_{P\text{ rup}}$	81%	187%	202%	248%	353%	835
3	$Q_{L\text{ rup}}$	90%	106%	107%	91%	117%	802

4	$Q_{P_{rup}}$	105%	177%	216%	288%	257%	1053
	$Q_{L_{rup}}$	110%	135%	134%	120%	145%	1162
	$Q_{P_{rup}}$	47%	67%	90%	128%	115%	3475
	Média	87%	135%	147%	168%	180%	
	Desv.pad	31%	51%	58%	82%	92%	
	Média L	94%	125%	116%	109%	126%	
	Média P	80%	145%	177%	226%	235%	

[1] Valores em negrito correspondem a ruptura extrapolada.

O caso 01 foi o único que não apresentou ruptura geotécnica de nenhum dos trechos. Foi aplicada uma carga de 1043 kN tanto para ponta fictícia quanto para atrito lateral do fuste com deslocamentos de 13,7 e 8,5 mm respectivamente. Os dados das curvas carga x deslocamentos foram submetidos a extrapolação segundo Van Der Veen modificado por Aoki (1976) e o resultado de ruptura para cada trecho foi de 1097 kN e 1157 kN.

O caso 02 quando a carga aplicada chegou a 835 kN, a ponta fictícia apresentou deslocamento excessivo com curva característica de ruptura geotécnica e o fuste com deslocamento aproximadamente de 6,0 mm. Os valores da curva do fuste foram submetidos a extrapolação apresentando carga de ruptura estimada em 868 kN.

Para os casos 03 e 04 houve ruptura geotécnica do trecho de fuste da estaca. Como ambas estacas foram executadas próximas, com o mesmo perfil de solo, os resultados foram condizentes com a expectativa prevista por todos os métodos semi-empíricos, principalmente no caso 03 com acuricidade entre 10 e 17%. No caso 03 a ruptura do fuste ocorreu com 802 kN e os métodos previam entre 720 e 940 kN. A extrapolação da ponta fictícia indicou uma ruptura de 1053 kN. No caso 04, a ruptura ocorreu com 1162 kN, nesse ponto, a ponta havia deslocado quase 50 mm. A extrapolação indicou uma ruptura em 3475 kN.

Ao se comparar os resultados previstos de ruptura pelos métodos semi-empíricos estudados, percebe-se que o método de Decourt-Quaresma para os casos estudados apresentou melhor acuricidade com os valores em média 87% inferiores aos reais, 94% para fuste e 80% para ponta fictícia e um desvio padrão de 31%. Entre todos os métodos foi o que se aproximou mais dos valores reais, 13% enquanto os demais apresentaram índices com diferença acima de 35%.

4 CONCLUSÃO

No presente trabalho foram analisadas estacas hélice contínua monitoradas executadas em terreno arenoso e submetidas a provas de carga bidirecionais com células expansivas com o objetivo de comparar os resultados dos ensaios com a previsão de carga de ruptura de fuste e ponta fictícia dos métodos semi-empíricos a partir da aplicação dos resultados de ensaios SPT. A análise das curvas carga- recalque e dos resultados permitiu identificar que os métodos semi-empíricos indicaram valores 43% maiores que os obtidos nas provas de carga em média para os casos em estudo. O método de Décourt-Quaresma (1978) mostrou maior acuricidade em todos os casos com valores de ruptura previstos 13% abaixo dos obtidos em média e pode ser considerado como o mais adequado para a previsibilidade de resultados de capacidade de carga para as estacas hélice contínua em terrenos arenosos com as características apresentadas no trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. R. (1996) Estacas hélice contínua com monitoração eletrônica: previsão da capacidade de carga através do ensaio SPT-T. In: 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE, São Paulo. Anais... [s.n.]. v. 2, pp. 141-151.
- Aoki, N. (1976). Considerações sobre a capacidade de carga de estacas isoladas. Notas de Aula, Universidade Gama Filho.

- Aoki, N., Velloso, D. D. A. (1975) An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: 5^o Pan-American Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires. Proceedings... ISSMGE. v. 1, p. 367-376. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro.
- Castro, M.S., Resende, A.S. (2015) Estudo de caso de prova de carga com células expansivas - ensaio bidirecional em estação na cidade de São Paulo. In: 8^o Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE, São Paulo. Anais... [s.n.].
- Décourt, L., Quaresma, A. R. (1978) Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In: 6^o Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações – COBRAMSEF, Rio de Janeiro. Anais... ABMS. v. 6, p. 45-53.
- Mantuano, Raphael Martins (2013) Comparação entre os métodos de dimensionamento e influência do processo executivo no comportamento de estacas hélice – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica.
- Mascagna Costa, W., Quaresma, J. E., & Florian, F. (2021). VIABILIDADE DA HÉLICE CONTÍNUA NA CONSTRUÇÃO CIVIL. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218, 2(10), e210807. <https://doi.org/10.47820/recima21.v2i10.807>
- Militsky, J. (1986). Relato do estado atual de conhecimento: fundações. In. COBRAMSEF, 8., 1986, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, v. 7.
- Resende, A.S.; Barbosa, Y; Chaves, N.A. e Albuquerque, P.J.R. (2022) AVALIACAO DE DESEMPENHO DE ESTACAS ESCAVADAS EM ENSAIOS BIDIRECIONAIS – ANALISE DE RESULTADOS. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/avaliacao-de-desempenho-de-estacas-escavadas-em-ensaios-bidirecionais-analise-de?lang=pt-br>> Acesso em: 26 jul. 2023
- Resende, A.S.; Chaves, N.A.; Freitas, E.N.F e Albuquerque, P.J.R. (2023) ANÁLISE DA REDUÇÃO DO ATRITO LATERAL EM ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA EXECUTADAS EM TERRENOS EM CORTE A PARTIR DO ENSAIO BIDIRECIONAL – ESTUDO DE CASO. In: ANAIS DO SEFE 10, 2023, São Paulo. Anais eletrônicos... São Paulo. Disponível em: <<https://sefe10.com.br/evento/sefe10/trabalhosaprovados/naintegra/1258>> Acesso em: 05 jul. 2024.
- Silva, P. E. C. A. F. (1983) Célula expansiva hidrodinâmica: Uma nova maneira de executar provas de carga, ARCOS, Belo Horizonte, Brasil.
- Teixeira, A. H. (1996) Projetos e execução de fundações. In: 3^o Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE, São Paulo. Anais... [s.n.]. v. 3, pp. 33-50.
- Van der veen, C. Bearing capacity of a pile. In: International conference soil mechanics foundation engineering, 3., 1953, Zurich. Proceedings. Zurich, 1953. v. 2
- Velloso, P. P. C. (1981) Estacas em solo: dados para a estimativa do comprimento. Ciclo de Palestras sobre Estacas Escavadas, Clube de Engenharia, Rio de Janeiro.