

Análise Comparativa de Capacidade de Carga em Estacas Hélice Contínua entre Métodos Semi-Empíricos e Prova de Carga Estática em Macapá-AP

Michel Cardoso Rodrigues

Engenheiro Civil, Universidade Federal do Amapá, Macapá, Brasil, michelrodriguesec@gmail.com

Luis Henrique Rambo

Professor, Universidade Federal do Amapá, Macapá, Brasil, rambogeotecnia@gmail.com

Cledinei Santana Amanajás

Engenheiro Civil, Universidade Federal do Amapá, Macapá, Brasil, cledineiamanajas@gmail.com

Tiago de Jesus Souza

Engenheiro Civil, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo, Brasil, tiagojs@ita.br

RESUMO: Vários pesquisadores brasileiros propuseram métodos visando relacionar a determinação da capacidade de carga de estacas com índice de resistência à penetração do ensaio SPT (NSPT). Dentre eles, vale ressaltar os métodos clássicos de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978), Alonso (1996) e Antunes e Cabral (1996). O presente artigo visa comparar o cálculo de capacidade de carga em estacas do tipo Hélice Contínua executadas na cidade de Macapá (Amapá) através de diferentes metodologias de uso corrente na engenharia nacional e comparar com os dados de 15 provas de carga estática realizadas em estacas hélice contínua. Nenhuma prova de carga alcançou a ruptura, tendo sido feita a extrapolação pelo método Van Der Veen (1953) onde identificou-se condições para extrapolação. Observou-se que os métodos de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Antunes e Cabral (1996) além de produzirem resultados próximos entre si, principalmente nas estacas de 0,3 m de diâmetro, foram conservadores comparados com as provas de carga. O método Alonso (1996) foi o que mais se aproximou da carga máxima de ensaio ou da extrapolação das provas de carga em todos os casos, tendo em alguns ensaio produzido resultados acima dos ensaios, entretanto, respeitando o fator de segurança para estacas ensaiadas com provas de carga. Ficou comprovado que o ensaio de prova de carga estática, se feito durante o desenvolvimento do projeto geotécnico, resultaria em economia para a obra.

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

ABSTRACT: Several Brazilian researchers have proposed methods aimed at relating the determination of the load capacity of piles with the index of resistance to penetration of the SPT test (NSPT). Among them, it is worth mentioning the classic methods of Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978), Alonso (1996) and Antunes and Cabral (1996). The present article aims to compare the calculation of load capacity in continuous flight piles carried out in the city of Macapá (Amapá) using different methodologies currently used in national engineering and to compare with data from 15 static load tests carried out on continuous flight piles in the city of Macapá-AP. No one load test reached the break, and the extrapolation was done by the Van Der Veen method (1953), where conditions for extrapolation were identified. It was observed that the methods of Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) and Antunes and Cabral (1996), in addition to producing results that are close to each other, mainly in the 0,3 m diameter piles, were conservative compared to the tests load capacity. The method of Alonso (1996) was the one that came closest to the maximum test load or the extrapolation of load tests in all cases, with some tests producing results above the tests, however, respecting the safety factor for piles tested with load tests. It was proven that the static load test, if done during the development of the geotechnical project, would result in economy for the construction.

KEYWORDS: Continuous Flight, Load Capacity Test, Load Capacity, Macapá, SPT.

1 Introdução

A prática de fundações profundas no Estado do Amapá ainda está bastante restrita ao uso de Estacas Pré-Moldadas e Escavadas do tipo Broca. Entretanto, estes tipos de estacas vem apresentando muitas limitações como: Profundidade de execução, execução em nível d'água aflorado e cravações em áreas residenciais. Com o crescimento do Estado e do porte das obras na Capital, tem-se optado por fundações em estacas Hélice Contínua por apresentar vantagens como: Elevada produtividade, não produzir vibrações e exequível em perfurações submersas (Berberian, 2015).

No Brasil, há uma predominância na realização dos ensaios in situ para obras de fundações, sendo os ensaios de laboratório pouco utilizados, devido ao custo dos mesmos, que muitas vezes é visto como um gasto desnecessário. Apesar de o Brasil também possuir excelentes normas, falta a compreensão de que um maior investimento nessas investigações garante maior segurança ao projetista para escolher a solução mais viável ao problema, bem como a escolha do método semi-empírico para determinado tipo de solo. Com base nisto, este trabalho tem por objetivo verificar a eficiência de métodos empregados no Brasil, especialmente para a região do Macapá que partem de resultados de ensaios à percussão (SPT), para determinar a capacidade de carga axial em estacas do tipo hélice contínua.

Após a determinação das cargas, foi realizada uma análise comparativa entre os métodos de capacidade de carga propostos, comparando os resultados com os obtidos a partir das provas de carga estáticas, e assim verificando a eficiência dos métodos para as estacas do local estudado.

2 Métodos Para Cálculo de Capacidade de Carga

2.1 Aoki-Velloso (1975)

O método de Aoki-Velloso (1975) foi desenvolvido inicialmente para correlações com o ensaio CPT (Cone Penetration Test) e posteriormente foi adaptado para o resultados do ensaio SPT devido ao seu uso mais recorrente. A capacidade de carga por atrito lateral e ponta da estaca é dada pela seguinte expressão:

$$R = \frac{K \cdot N_p}{F_1} \cdot A_p + \frac{U}{F_2} \sum_{i=1}^n (\alpha \cdot K \cdot N_{L_i} \cdot \Delta L) \quad (1)$$

Sendo K e α coeficiente relativos ao solo, F_1 e F_2 coeficientes relativos ao tipo de estaca, N_p o valor de N_{spt} na cota de apoio da estaca, A_p é a área da ponta, U é o perímetro da seção, N_L valor médio de N_{spt} em uma camada de espessura ΔL .

2.2 Décourt-Quaresma (1978)

O método desenvolvido por Luciano Décourt e Arthur Quaresma foi desenvolvido com bases nos resultados do ensaio do SPT, sendo a Capacidade de Carga dada por:

$$R = \alpha \cdot C \cdot N_p \cdot A_p + \beta \cdot 10 \cdot \left(\frac{N_L}{3} + 1 \right) \cdot U \quad (2)$$

Onde α e β são coeficientes em função do tipo de estaca e solo, C é um coeficiente do solo, N_p é a média do N_{spt} no nível da ponta da estaca com o imediatamente anterior e imediatamente posterior, A_p é a área da ponta, N_L é a média dos valores de N_{spt} ao longo do fuste, sendo este com limite superior de $N_L = 50$ e U é o perímetro do fuste.

2.3 Alonso (1996)

O método de Alonso (1996) foi desenvolvido através de sondagens SPT-T (Sondagem à percussão com medida de torque a cada metro de ensaio), sendo proposto especificamente para a Bacia Sedimentar de São Paulo, Formação Guabirubeta e para solo da cidade de Serra-ES. A Capacidade de Carga é dada por:

$$R = \sum \left(U \cdot \Delta L \cdot \alpha \cdot \frac{100 \cdot T_{\max}}{0,41 \cdot h(\text{SPT}-T) - 0,032} \right) + A_p \cdot \beta \cdot \left(\frac{T_{\min 1} + T_{\min 2}}{2} \right) \quad (3)$$

Onde U é o perímetro da estaca, ΔL é o comprimento onde considera-se o atrito lateral unitário constante, α é um coeficiente de correção, $T_{\max}$ é o torque máximo, $h(\text{spt}-t)$ é a penetração total do amostrador, A_p é a área da ponta, β é um coeficiente dado em função do tipo de solo, $T_{\min 1}$ é a média dos valores de torque mínimo num intervalo entre a ponta até 8 vezes o diâmetro acima da ponta, e $T_{\min 2}$ é a média dos valores de torque mínimo no trecho da ponta da estaca até 3 vezes o diâmetro abaixo da mesma.

2.4 Antunes e Cabral (1996)

O método de Antunes e Cabral (1996) foi desenvolvido através de análise de provas de carga estática em estacas hélice contínua, sendo aplicado exclusivamente para este tipo de estaca, sendo a capacidade de carga R estimada por:

$$R = \beta'_2 \cdot N_p \cdot A_p + U \cdot \sum (\beta'_1 \cdot N) \cdot \Delta L \quad (4)$$

Sendo β'_1 e β'_2 coeficientes em função do tipo de solo, N_p é o valor de N_{spt} no nível da ponta, A_p é a área da ponta, U é o perímetro do fuste, N é o índice de resistência à penetração e ΔL é a espessura da camada de solo. Deve-se levar em consideração que o produto $\beta'_2 \cdot N_p \leq 40 \text{ kgf/m}^2$.

3 Prova de Carga Estática

A prova de carga estática em estacas é regulamentada pela NBR 12131 (ABNT, 2006) e consiste no carregamento com incrementos progressivos de carga no topo da estaca, medindo simultaneamente os respectivos recalques. A NBR 12131 (ABNT, 2006) propõe quatro tipos de carregamento, são eles: carregamento lento, rápido, misto e cíclico. Porém, no Brasil, o carregamento lento é o mais tradicional. O resultado obtido da prova de carga estática é a curva carga x recalque. Velloso e Lopes (2012) afirmam que a prova de carga estática tem como finalidade verificar o comportamento previsto em projeto quanto a capacidade de carga e recalques, como também definir a carga de serviço em situações onde não se consegue realizar uma previsão de comportamento.

Uma das formas de avaliar a aplicação de métodos semi-empíricos é a realização de Provas de Carga Estáticas, a qual tem a finalidade de realizar uma verificação de desempenho da estaca, podendo ser obtido desse ensaio a capacidade de carga da fundação e os deslocamentos para cada nível de carregamento.

Segundo Hachich et. al. (1998) o ensaio de Prova de Carga estática é o que mais aproxima a estaca das condições as quais esta será solicitada pela estrutura, constituindo-se num importante mecanismo para a compreensão real do comportamento de uma estaca submetida a um carregamento em meio físico.

Quando uma prova de carga não atinge a ruptura, podem ser utilizados métodos baseados em uma equação matemática, que se ajustam ao trecho da curva carga recalque obtida até o fim do ensaio, em um processo conhecido como extrapolação (Velloso e Lopes, 2010).

Um dos métodos mais utilizados para extrapolação é o de Van Der Veen (1953). No método, o formato da curva carga recalque é exponencial e a ruptura é caracterizada como física, logo, em situações onde não houver ruptura física ou curva com tendência exponencial, supõem-se que o método não fornecerá resultados satisfatórios.

3.1 Van Der Veen (1953)

O método Van Der Veen (1953) constitui-se em uma equação exponencial a qual determina em uma curva assintótica, a carga de ruptura da estaca, apresentada na equação à seguir:

$$Q = Q_{ult} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot \rho}) \quad (5)$$

Sendo Q_{ult} a carga de ruptura, Q carga aplicada na estaca em um estágio, ρ é o deslocamento registrado no respectivo estágio e α é o coeficiente de forma da curva.

4 Estudo de Caso

Para o desenvolvimento deste artigo, foram utilizados dados de sondagens SPT e de Provas de Carga Estática de carregamento lento de 15 estacas Hélice Contínua de uma obra de médio porte, localizada na zona sul da cidade de Macapá-AP. De posse dessas informações, serão feitas as previsões de capacidade de carga, utilizando dados da sondagem mais próxima à respectiva estaca e posteriores comparações com os resultados das provas de carga.

Após análise das PCE, concluiu-se que nenhuma atingiu a ruptura, sendo identificadas condições propícias para a extrapolação em apenas uma prova de carga, pois nas demais o ensaio não foi suficiente para evidenciar o formato da curva carga recalque, devido aos pequenos valores de deslocamentos registrados. As provas de carga estática foram realizadas com estágios de carregamento de 10% da carga máxima definida para o ensaio.

Devido a grande quantidade de provas de carga impossibilitadas de extrapolação, os resultados oriundos de previsões semi-empíricas serão comparados com a carga máxima de ensaio e somente comparados com a extrapolação no caso em que foi possível extrapolar a curva carga x recalque.

Para as previsões de capacidade de carga, foram utilizados os resultados de 7 sondagens SPT, as quais indicaram haver uma camada inicial de Silte Arenoso (variando entre 0 e 7,0 m) e após esta, Argila Siltosa até o limite das sondagens, sendo este de até 14,0 m de profundidade. A tabela 1 indica, para cada sondagem, os valores de N_{spt} .

Tabela 1. Valores de N_{spt} de cada sondagem de acordo com a profundidade. Elaborado pelo autor (2019).

Profundidade (m)	SPT 1	SPT 2	SPT 3	SPT 4	SPT 5	SPT 6	SPT 7
1	6	2	4	3	2	2	2
2	8	7	7	6	5	4	5
3	10	15	18	20	24	10	11
4	21	12	20	18	26	20	18
5	18	15	19	22	28	23	20
6	20	20	21	23	27	28	30
7	22	26	22	23	30	30	34
8	24	29	26	27	32	32	32
9	30	31	30	31	32	33	35
10	32	32	35	32	35	35	37
11	33	34	33	34	35	42	42
12	43	36	38	42	38	44	44
13	45	39	40	43			
14		42	42	44			

A tabela 2 apresenta algumas características das Estacas Ensaaiadas como diâmetro, comprimento, Carga máxima PCE (Q_{teste}).

Tabela 2. Informações gerais das estacas ensaiadas. Elaborado pelo autor (2019).

PCE	Diâmetro (m)	Q_{teste} (tf)	L (m)
-----	-----------------	------------------	-------

P01	0,3	103,00	9,00
P02	0,3	103,00	9,00
P03	0,3	103,00	9,00
P04	0,3	103,00	9,00
P05	0,3	103,00	9,00
P06	0,3	103,00	9,00
P07	0,5	230,00	11,00
P08	0,4	170,00	11,00
P09	0,4	170,00	11,00
P10	0,4	170,00	11,00
P11	0,4	170,00	11,00
P12	0,5	230,00	11,00
P13	0,5	230,00	11,00
P14	0,5	230,00	11,00
P15	0,3	103,00	9,00

A tabela 3 exibe os valores registrados para os recalques máximos e residual de cada prova de carga.

Tabela 3. Valores de recalques totais e residuais das provas de carga. Elaborado pelo autor (2019).

PCE	$p_{\text{máximo}}$ (mm)	p_{residual} (mm)
P01	4,01	1,72
P02	6,06	3,51
P03	8,15	6,2
P04	5,98	3,85
P05	7,22	4,22
P06	4,04	1,88
P07	6,47	4,94
P08	9,64	6,36
P09	8,33	5,19
P10	9,13	6,21
P11	23,53	19,02
P12	8,8	6,41
P13	11,05	7,79
P14	10,85	7,41
P15	4,74	3,04

As Provas de Carga Estática registraram no geral baixos valores de deslocamento, principalmente nas estacas de 0,3 m de diâmetro, razão pela qual opou-se por extrapolar apenas a PCE P11, tendo este ensaio registrado o maior deslocamento total, com a curva carga x recalque apresentando tendencia ao formato exponencial.

5 Resultados

Através dos dados obtidos das sondagens à percussão, foram realizadas as previsões de capacidade de carga pelos métodos de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978), Alonso (1996) e Antunes & Cabral (1996). Os resultados estão expressos na tabela 4, em tonelada-força, relacionados de acordo com a sondagem mais próxima, utilizada nas previsões semi-empíricas. Todos os parâmetros semi-empíricos obedecem ao proposto pelos respectivos autores, devendo-se levar em conta que as previsões por Alonso (1996) utilizaram os parâmetros da Bacia Sedimentar de São Paulo.

Tabela 4. Resultados das previsões por métodos semi-empíricos. Elaborado pelo autor (2019).

PCE	Sondagem	Aoki-Velloso (1975)	Décourt-Quaresma (1978)	Alonso (1996)	Antunes e Cabral (1996)	Qteste ou Extrapolação (*)
P01	SPT 1	66	66,5	85,4	67,4	103,0
P02	SPT 1	66	66,5	85,4	67,4	103,0
P03	SPT 1	66	66,5	85,4	67,4	103,0
P04	SPT 1	66	66,5	85,4	67,4	103,0
P05	SPT 1	66	66,5	85,4	67,4	103,0
P06	SPT 1	66	66,5	85,4	67,4	103,0
P07	SPT 1	177,4	163,2	219,9	173,6	230,0
P08	SPT 3	129	129,1	171,5	127,8	170,0
P09	SPT 3	129	129,1	171,5	127,8	170,0
P10	SPT 6	138,5	141	186,8	137,4	170,0
P11	SPT 2	121,5	123,7	163,5	119,5	170,0*
P12	SPT 4	183,9	170,2	231,2	180,7	230,0
P13	SPT 4	183,9	170,2	231,2	180,7	230,0
P14	SPT 5	195,9	187,3	255,8	194,8	230,0
P15	SPT 7	71,9	77	100,7	69,4	103,0

A seguir, os resultados são apresentados graficamente, agrupados de acordo com o diâmetro das estacas.

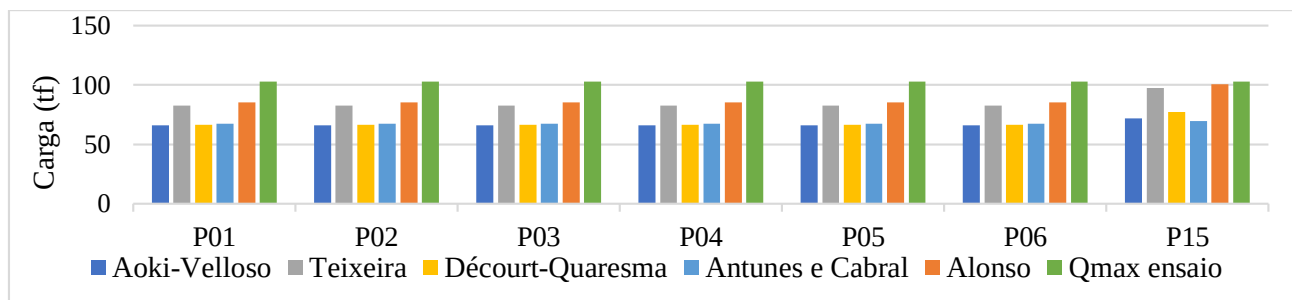


Figura 1. Resultados Capacidade de Carga estacas de 0,3 m de diâmetro. Elaborado pelo autor (2019).

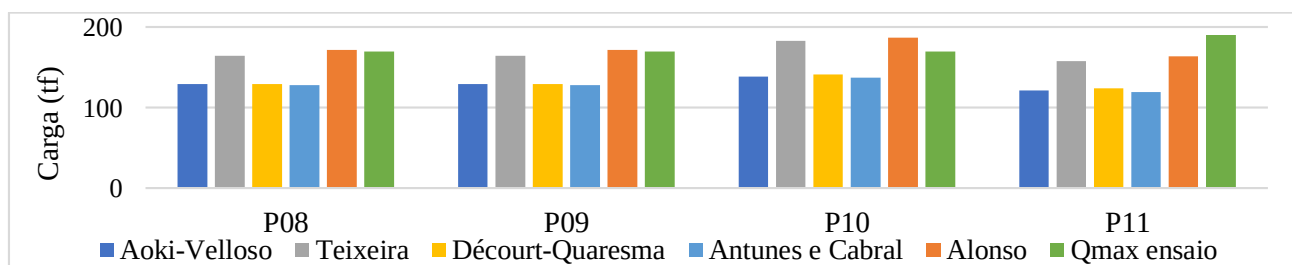


Figura 2. Resultados Capacidade de Carga estacas de 0,4 m de diâmetro. Elaborado pelo autor (2019).

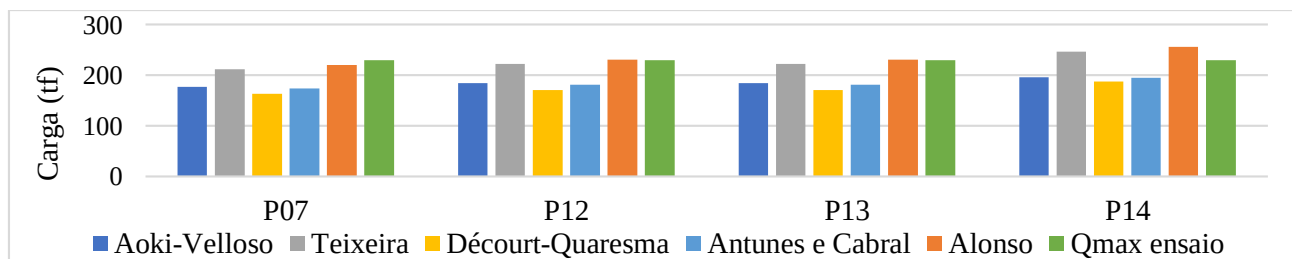


Figura 3. Resultados Capacidade de Carga estacas de 0,5 m de diâmetro. Elaborado pelo autor (2019).

De maneira geral, percebe-se elevada proximidade entre os valores fornecidos por Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Antunes e Cabral (1996), principalmente para as estacas de menor diâmetro, tendo o método Alonso (1996) resultado nos maiores valores.

Com os resultados obtidos, é possível então realizar as comparações entre previsões semi-empíricas com a carga máxima da prova de carga ou com a extrapolação. Tais comparações são feitas através da diferença percentual entre os valores, expressa na tabela 5.

Tabela 5. Diferenças percentuais entre métodos Semi-Empíricos e Prova de Carga Estática. Elaborado pelo autor (2019).

PCE	Aoki-Velloso (1975)	Décourt-Quaresma (1978)	Alonso (1996)	Antunes e Cabral (1996)
Diferença percentual %				
P01	-35,90%	-35,40%	-17,10%	-34,60%
P02	-35,90%	-35,40%	-17,10%	-34,60%
P03	-35,90%	-35,40%	-17,10%	-34,60%
P04	-35,90%	-35,40%	-17,10%	-34,60%
P05	-35,90%	-35,40%	-17,10%	-34,60%
P06	-35,90%	-35,40%	-17,10%	-34,60%
P07	-22,90%	-29,00%	-4,40%	-24,50%
P08	-24,10%	-24,10%	0,90%	-24,80%
P09	-24,10%	-24,10%	0,90%	-24,80%
P10	-18,50%	-17,10%	9,90%	-19,20%
P11	-36,1%*	-34,9%*	-13,9%*	-37,1%*
P12	-20,00%	-26,00%	0,50%	-21,40%
P13	-20,00%	-26,00%	0,50%	-21,40%
P14	-14,80%	-18,60%	11,20%	-15,30%
P15	-30,20%	-25,20%	-2,20%	-32,60%

* Valores relativos à extrapolação.

Os dados da tabela 5 permitem inferir que o método Alonso (1996) forneceu menor variação percentual em relação aos outros métodos em todos os casos, notados alguns casos com variação percentual menor que 5% para mais ou para menor, como nos casos da PCE P07, P08, P09, P12, P13 E P15. Observa-se também alguns casos onde o método Alonso (1996) forneceu resultado acima da prova de carga, como em P08, P09, P12, P13 e P14, entretanto, ainda dentro do limite proposto pela ABNT (1996), respeitando fator de segurança mínimo de 1,6 para estacas ensaiadas com prova de carga, considerando as previsões semi-empíricas como capacidade de carga.

6 Conclusões

Diante de todas as análises feitas e dados apreciados, é possível inferir que os métodos de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Antunes e Cabral (1996) demonstraram-se conservadores neste estudo de caso, comparados com as Provas de Carga Estáticas, enquanto o método Alonso (1996) forneceu valores mais próximos da prova de carga.

Os métodos semi-empíricos avaliados, durante seu desenvolvimento, tiveram como parâmetro de comparações provas de cargas realizadas em diversas regiões diferentes do país. Estudos recentes apontam para uma tendência de regionalização dos parâmetros semi-empíricos de métodos como Aoki-Velloso (1975), o que sugere que as diferenças entre previsões semi-empíricas e Prova de Carga Estática são devidos as

diferenças regionais nos dados que embasaram tais métodos semi-empíricos. Não se tinha conhecimento da existência anterior de ensaio de Prova de Carga no estado do Amapá, portanto, acredita-se que esse estudo irá contribuir para o entendimento inicial da fundação na região de Macapá.

De forma geral, os métodos utilizados neste estudo de caso forneceram valores satisfatórios do ponto de vista da segurança, respeitando as preconizações apresentadas pela ABNT (1996) e ABNT (2019).

Propõem-se a avaliação de capacidade de carga por outros métodos semi-empíricos para fins de comparações com as provas de carga, além da proposição de fatores semi-empíricos baseados nas provas de carga.

Pode-se dizer que o artigo contribui para consulta técnica das previsões da capacidade de carga de fundações profundas, uma vez que não há trabalhos publicados nessa temática na cidade de Macapá.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao engenheiro Andeir Almeida Arruda por fornecerem os dados que possibilitaram a realização deste artigo, e os engenheiros Alexandre Duarte Gusmão e Urbano Rodrigues Alonso, pelas sugestões e comentários para a elaboração deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U.R. Estacas hélice contínua com monitoramento eletrônico – previsão da capacidade de carga através do ensaio SPT-T. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 3. , São Paulo. *Anais...* São Paulo, vol. 2, pp. 141-151.
- Antunes, W.R., Cabral, D.A. (1996). Capacidade de carga de estacas hélice contínua. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 3. , São Paulo. *Anais...* vol. 2, pp. 105-110.
- Aoki, N.; Velloso, D. A. (1975). An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: Congresso panamericano de mecanica de suelos y cimentaciones, 5., 1975, Buenos Aires. *Anais...* Buenos Aires: Sociedad Argentina de Mécanica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones, p.367-376.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131. *Estacas- Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.
- Berberian, D. (2015). *Engenharia de Fundações*. 2. ed. Brasília: Infraso – Technical Series.
- Cintra, J. C. A. et al. (2013). *Fundações: Ensaios Estáticos e Dinâmicos*. 1. ed. São Paulo: Oficina dos Textos.
- Cintra, J. C. A.; Aoki, N. (2010). *Fundações por estacas: Projeto Geotécnico*. São Paulo: Oficina dos Textos.
- Décourt, L.; Quaresma, A. R. (1978). Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solo e Engenharia de Fundações, 6., Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 1978. v.1, p.45 – 53.
- Hachich, W. et al. (1998). *Fundações Teoria e Prática*. 2. ed. São Paulo: PINI.
- Van Der Veen, C. (1953). Bearing capacity of a pile. In: Internacional conference soil mechanics foundation engineering, 3 , Zurich. *Proceedings...* Zurich, v. 2, p. 84-90.
- Velloso, D. de A.; Lopes, F. de R. (2010). *Fundações: Critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. São Paulo: Oficina dos Textos.