

Avaliação de Métodos para Cálculo de Capacidade de Carga em Estacas na Cidade de Natal/RN

Mateus Ferreira Venceslau de Lima

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil,
mfvlteus@gmail.com

Arthur Araujo da Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil,
arthur.araujo1@escolar.ifrn.edu.br

Rubens Diego Fernandes Alves

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil,
Rubens.alves@ifrn.edu.br

Ricardo Nascimento Flores Severo

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil,
ricardo.severo@ifrn.edu.br

Arthur Gomes Dantas de Araújo

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, Brasil, arthur.araujo@ufersa.edu.br

RESUMO: Este artigo realiza uma análise comparativa entre os métodos de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996), juntamente com as extrapolações da curva carga x recalque pelo método de Van der Veen (1953) modificado por Aoki (1976), em conjunto com o método da NBR 6122 (2022). O estudo, baseado em provas de carga e ensaios do tipo SPT de diversas obras em Natal-RN, destaca as particularidades e discute a eficácia e aplicabilidade de cada método em diferentes tipos de solo. Para essa análise foram estudadas estacas do tipo escavada a céu aberto e hélice contínua, com profundidades variando de 8 a 15 metros e diâmetro de 250 a 600 milímetros. Os resultados revelam que o método de Teixeira (1996) se destacou como o mais efetivo, especialmente em solos arenosos e areno-argilosos, demonstrando também bom desempenho em estacas tipo hélice contínua. Os métodos de Aoki-Veloso e Décourt-Quaresma também mostraram boa efetividade em solos arenosos e areno-argilosos, com o método Aoki-Veloso apresentando melhor precisão em solos mistos.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, Capacidade de Carga, Carga de Ruptura, Prova de Carga, SPT, Métodos Semiempíricos.

ABSTRACT: This article performs a comparative analysis among the methods of Aoki and Velloso (1975), Décourt and Quaresma (1978), and Teixeira (1996), along with the extrapolations of the load-settlement curve by the method of Van der Veen (1953) modified by Aoki (1976), in conjunction with the NBR 6122 (2022) method. The study, based on load tests and SPT (Standard Penetration Test) assays from various projects in Natal-RN, highlights the particularities and discusses the effectiveness and applicability of each method in different soil types. For this analysis, open pit and continuous helix type piles were studied, with depths varying from 8 to 15 meters and diameters from 250 to 600 millimeters. The results reveal that the Teixeira method (1996) stood out as the most effective, especially in sandy and silty sand soils, also demonstrating good performance in continuous flight auger piles. The Aoki-Veloso and Décourt-Quaresma methods also showed good effectiveness in sandy and silty sand soils, with the Aoki-Veloso method presenting better accuracy in mixed soils.

KEYWORDS: Foundations, Load Capacity, Failure Load, Load Test, SPT, Semiempirical Methods.

1 1 INTRODUÇÃO

O estudo da capacidade de carga em estacas profundas é essencial na segurança e estabilidade estrutural do empreendimento como um todo em qualquer obra de engenharia civil. Nesse contexto os métodos semiempíricos são utilizados na estimativa da capacidade de carga em estacas profundas e tubulões, sendo baseados nos resultados do ensaio de sondagem a percussão (SPT) e no tipo de solo que permeia a fundação.

A confirmação da capacidade de carga das estacas em obra é feita através do ensaio de prova de carga estática normatizados pela NBR 16903 - Solo — Prova de carga estática em fundação profunda (2020) com o objetivo de conhecer o comportamento da fundação em diferentes níveis de carga crescentes até a ruptura do sistema, visando avaliar a segurança da apresentada pela fundação em seu estado último ou de ruptura e a estimativa de recalques para as respectivas cargas aplicadas (Aoki, 1997).

Este artigo aborda uma comparação entre os métodos de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996), avaliando-os juntamente com as extrapolações da curva carga x recalque pelo método de Van der Veen (1953) modificado por Aoki (1976) aliado ao método da NBR 6122 (2022), destacando as particularidades aplicadas em cada método e discutindo a eficácia e aplicabilidade de cada um em diferentes tipos de solo. Pela natureza e dimensão do trabalho, embora existam outros excelentes métodos, optou-se por trabalhar somente com três métodos citados para estimativas de carga. O estudo teve como base provas de carga e ensaios do tipo SPT provenientes de diferentes obras realizadas no município de Natal-RN. Neste estudo não foram avaliadas as previsões de recalque

Os resultados apresentados podem fornecer percepções valiosas para profissionais da engenharia civil, auxiliando na seleção do método mais adequado para estimativa de capacidade de carga de estacas nos contextos geotécnicos apresentados na Região Metropolitana da Cidade do Natal.

2 METODOLOGIA

2.1 Estudo de caso

Para realização deste estudo foram analisadas um total de 10 (dez) provas de carga estáticas provenientes de 9 (nove) obras diferentes, obtidas nos anos de 2012, 2013 e 2018. As provas de carga e sondagens do tipo SPT que foram utilizados para realização dos cálculos estão citados nas referências bibliográficas, onde é apresentado o banco de dados da empresa executora dos ensaios. As obras de 01 a 08 estão distribuídas na cidade de Natal, com as obras de 01 a 04 localizadas especificamente no campus da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e as demais distribuídas pela cidade. A obra 08 apresenta duas provas de cargas por se tratar de estacas de diâmetros diferentes na mesma torre. A prova de carga estática da obra 09 (nove) foi realizada em Parnamirim, como observado na **Figura 1**.

A metodologia consistiu na avaliação de dados dos ensaios tipo SPT provenientes dos locais onde foram realizadas as provas de carga estática, sendo possível caracterizar a composição e resistência do solo. Os ensaios tiveram profundidades variando entre 9,0 e 29,0 metros, com a grande maioria finalizados em média por volta dos 18,0 metros.

De acordo com os ensaios do tipo SPT, os solos da região das obras localizadas na UFRN (obras de 01 a 04) são compostos predominantemente por areias finas em suas primeiras camadas, variando a areias siltosas e argilosas conforme o aumento da profundidade, chegando a apresentar argila em camadas mais profundas com um aumento constante de resistência. As obras 05 e 08 possuem areias finas em suas camadas superficiais de solo seguídas, por volta dos 7,0 metros, de areia argilosa nas camadas intermediárias e nas camadas mais profundas, argila com algum índice de pedregulhos de quartzo e alta presença de nódulos de óxidos de ferro. A obra 6 apresentou areias majoritariamente siltosas nas camadas iniciais, argila arenosa por volta dos 11,0 metros nas suas camadas intermediárias e argila com pedregulhos de quartzo e nódulos de óxidos de ferro na camada de maior profundidade. A obra 7 possui areia siltosa em sua camada mais superficial, um solo misto de areia silto-argilosa na sua camada intermediária e profunda, essa última com a presença de pedregulhos.

A obra 09 apresenta suas camadas de forma homogênea, possuindo uma fina camada de areia na superfície, seguida por areia argilosa e aos 14,0 metros uma grande camada de areia argilosa avermelhada e com pedregulhos.



Figura 1. Localização das obras

As provas de carga realizadas foram do tipo PCE (Prova de Carga Estática com Carregamento Lento) e seguiram a NBR 12131 (2006), norma que tratava da execução de provas de carga em estacas vigente na época e que foi substituída posteriormente pela NBR 16903 (2020).

As estacas ensaiadas foram do tipo hélice contínua e escavada a céu aberto com profundidades variando de 8 a 15 metros e diâmetro de 250 a 600 milímetros. Na **Tabela 1** estão descritas as características geométricas das fundações em estacas das obras estudadas.

Tabela 1. Características das estacas ensaiadas

Dados	Nome da estaca	Tipo	L (m)	D (mm)
Obra 01	E01	Escavada	8	300
Obra 02	E02	Escavada	10	300
Obra 03	E03	Escavada	8	300
Obra 04	E04	Escavada	11	250
Obra 05	E05	Hélice contínua	14	500
Obra 06	E06	Hélice contínua	14	600
Obra 07	E07	Escavada	14	400
Obra 08	E08A	Escavada	15	400

	E08B	Escavada	15	500
Obra 09	E09	Escavada	15	300

2.1.1 Métodos de Estimativa de Capacidade de Carga

Neste artigo foram utilizados os métodos de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996) com o intuito de realizar o estudo comparativo da estimativa de capacidade de carga em estacas de cada método.

De acordo com Cintra et al. (2013) as fórmulas teóricas nem sempre fornecem resultados adequados para previsão da capacidade de carga em estacas, por isso utilizam-se os métodos semiempíricos que são baseados em correlações empíricas com resultados de ensaios in situ e ajustados com provas de carga. A utilização de métodos semiempíricos para a previsão da capacidade de carga em fundações é de suma importância para uma maior confiabilidade no dimensionamento e otimização dos custos na execução.

Cintra e Aoki (2010) apontam limitações nos métodos de Décourt e Quaresma (1978) e de Teixeira (1996) em relação aos valores de NSPT. No método de Décourt e Quaresma, os valores de NSPT devem estar entre 3 e 50 para serem aplicáveis. Já no método de Teixeira, os valores de NSPT devem estar entre 4 e 40. Esses intervalos garantem a precisão e a aplicabilidade dos métodos em estudos geotécnicos.

A segunda modificação trata-se da utilização de valores na tabela dos coeficientes α e β . Esses coeficientes não são originalmente previstos pelo método para estacas do tipo hélice contínua, então nesse caso, foram adotados valores referentes as estacas do tipo escavada. Também foram adaptados valores de α conforme a interpolação linear realizada por Ferreira, Delalibera e Da Silva (2014) para solos mistos que também não eram previstos pelo método. Os valores adotados podem ser visualizados na **Tabela 2** e **Tabela 3**.

Tabela 2. Valores de α adaptados para o método Teixeira (1996)

Solo ($4 < N_{SPT} < 40$)	Pré-moldadas e perfil metálico	Franki	Escavadas a céu aberto	Hélice contínua	Raiz
Areia com pedregulhos	440	380	310	310	290
Areia	400	340	270	270	260
Areia siltosa	360	300	240	240	220
Areia silto-argilosa	330	270	220	220	205
Areia Argilosa	300	240	200	200	190
Areia argilo-siltosa	330	270	220	220	205
Silte	160	120	110	110	110
Silte arenoso	260	210	160	160	160
Silte areno-siltosa	210	165	135	135	135
Silte argiloso	160	120	110	110	110
Silte argilo-arenoso	210	165	135	135	135
Argila	110	100	100	100	100
Argila arenosa	210	160	130	130	160
Argila areno-siltosa	160	130	115	115	130
Argila siltosa	110	100	100	100	100
Argila silto-arenosa	160	130	115	115	130

Tabela 3. Valores de β adaptados para o método de Teixeira

Tipo de Solo	β
Pré-moldadas	4
Perfil metálico	4
Franki	5
Escavadas a céu aberto	4

Hélice contínua	4
Raiz	6

2.1.2 Cálculo da Carga de Ruptura e Extrapolação da Prova de Carga Estática

O critério de identificação da carga de ruptura utilizado foi o método da NBR 6122 (2022), porém, em alguns casos, as estacas estudadas não apresentaram uma ruptura nítida caracterizada pela verticalização da curva carga x recalque antes do último estágio de carregamento, desse modo, se fez necessário o uso de métodos para extrapolação da curva carga x recalque, sendo utilizado o de Van der Veen (1953) modificado por Aoki (1976).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na **Tabela 4** e na **Figura 2** estão apresentados os respectivos resultados das estimativas de carga de ruptura pelos métodos de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996), bem como as estimativas das cargas de ruptura obtidas do método NBR 6122 (2022).

Tabela 4. Estimativas de capacidade de carga e carga de ruptura

Dados	Nome da estaca	D (mm)	L (m)	Aoki-Velloso (kN)	Décourt e Quaresma (kN)	Teixeira (kN)	NBR 6122 (kN)
Obra 01	E01	300	8	477	322	479	460
Obra 02	E02	300	10	684	695	800	700
Obra 03	E03	300	8	776	714	913	503
Obra 04	E04	250	11	702	581	941	474
Obra 05	E05	500	14	5349	3384	4170	4435
Obra 06	E06	600	14	4314	2376	3408	3225
Obra 07	E07	400	14	1103	1377	1610	980
Obra 08	E08A	400	15	1394	1439	1639	1460
	E08B	500	15	1947	2049	2252	2240
Obra 09	E09	300	15	685	679	810	1180

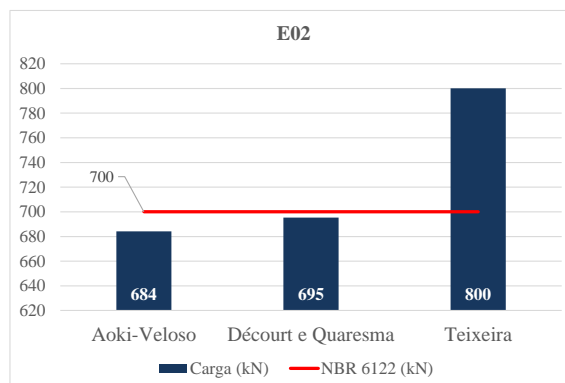
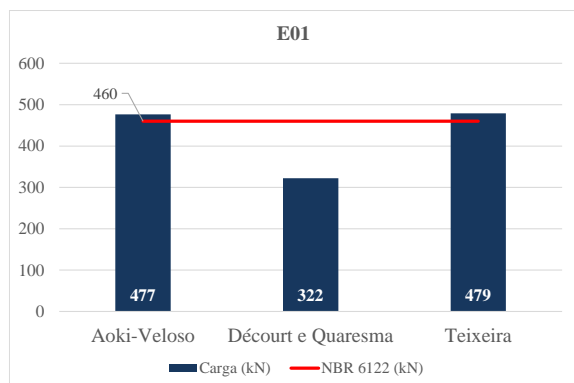




Figura 2. Estimativas de carga de ruptura das estacas E01 a E09

Na **Tabela 5**, está descrita a relação entre a profundidade executada da estaca e as características dos seus respectivos solos.

Tabela 5. Relação profundidade da estaca e característica do solo

Nome da estaca	L (m)	Camada de solo		
E01	8	Areia (0 a 12,45 m)		
E02	10	Areia argilosa (0 a 13,80 m)	Argila arenosa (13,80 a 18,60 m)	Silte arenoso (18,60 a 20,15 m)
E03	8	Areia silto-argilosa (0 a 8m)		
E04	11	Areia (0 a 12,52 m)	Areia argilo-siltosa (12,52 a 18,60 m)	Areia argilosa (18,60 a 21,55 m) Argila com areia (21,55 a 29 m)
E05	14	Areia (0 a 5,80 m)	Areia argilosa (5,80 a 14,60 m)	Areia argilosa com óxido de ferro (14,60 a 17,30 m)
E06	14	Areia siltosa (0 a 10,40 m)	Argila arenosa com pedregulhos de quartzo (10,40 a 14,70 m)	Areia argilosa com muitos pedregulhos de quartzo (14,70 a 16 m)
E07	14	Areia siltosa (0 a 5,20 m)	Areia silto-argilosa (5,20 a 6,90 m)	Areia argilo-siltosa (6,90 a 20 m)
E10A/ E10B	15	Areia (0 a 1,50 m)	Areia argilosa (1,50 a 11,80 m)	Areia argilosa com óxido de ferro e pedregulhos de quartzo (11,80 a 21 m)
E09	15	Areia (0 a 6,60)	Areia argilosa (6,60 a 11,70 m)	Areia argilosa com pedregulhos (11,70 a 25,30 m)

Na **Tabela 6** estão descritos os cálculos de desvio padrão entre a capacidade de carga calculada por cada método e as respectivas cargas de ruptura calculadas pelo método da NBR 6122.

Tabela 6. Desvio padrão entre $Q_{ult-método}$ e $Q_{NBR6122}$

Dados	Nome da estaca	L (m)	Aoki-Veloso	Décourt e Quaresma	Teixeira
Obra 01	E01	8	8,3	70,7	9,5
Obra 02	E02	10	7,9	2,3	50,1
Obra 03	E03	8	136,4	105,3	205,0
Obra 04	E04	11	114,1	52,9	236,1
Obra 05	E05	14	456,8	525,7	78,3
Obra 06	E06	14	544,5	383,6	317,6
Obra 07	E07	14	61,5	198,6	315,1
Obra 08	E08A	15	32,8	12,2	89,3
	E08B	15	146,4	95,5	5,9
Obra 09	E09	15	247,4	250,3	185,0
Soma total:			1756,046	1735,154	1317,376

Analisando a **Tabela 6**, observa-se que o método com os valores mais próximos da ruptura foi o de Teixeira, seguido por Aoki-Veloso e logo após o de Décourt-Quaresma. As estacas que apresentaram um valor de capacidade de carga mais próximas da carga de ruptura foram E01, E02, E08A e E08B.

Relacionando as **tabelas 5 e 6**, podemos observar o método de Teixeira se apresentou no geral como o mais efetivo, principalmente quando a estaca esteve assentada em solos arenosos, areno-argilosos, obtendo uma baixa efetividade em solos mistos na presença de siltes. Também demonstrou o melhor desempenho das estacas tipo hélice contínua.

Os métodos de Aoki-Veloso e Décourt-Quaresma também demonstraram boa efetividade em solos arenosos e areno argilosos, entretanto, em solos bastante mistos como no caso da estaca E07, o método Aoki-Veloso demonstrou uma melhor precisão quando comparado aos outros. Isso pode ser explicado pela abrangência de tipos de solos específicos atendidos pelo método.

Neste artigo optou-se por não fazer um estudo, em termos de recalque, entre a estimativa e os registrados pela prova de carga. Entretanto, essa análise será considerada e estudada em trabalhos futuros.

4 CONCLUSÃO

No geral, os métodos de Aoki-Veloso, Décourt-Quaresma e Teixeira demonstraram boa aplicabilidade e efetividade na estimativa de capacidade de carga, principalmente em solos arenosos e argilosos quando comparados aos valores de carga de ruptura provenientes das provas de carga estática (PCE).

O método de Teixeira demonstrou ser mais preciso quando comparado aos outros métodos principalmente em solos arenosos, areno-argilosos, porém, sua precisão bastante afetada pela variabilidade em solos mistos com presença de siltes. Nesse tipo de solo os métodos perdem um pouco da eficácia, com o método de Aoki-Veloso podendo ser o mais adequado nesses casos, devido ao fato da sua abrangência de tipos de solos específicos atendidos pelo método.

Para trabalhos futuros serão feitas análises entre a estimativa de recalque calculada e os recalques provenientes da prova de carga, estudando essa relação com os tipos de solos e estimativas de carga. Além disso, como algumas estacas atingiram solos característicos dos depósitos sedimentares da Formação Barreiras, também será objeto de estudo a relação entre esses depósitos com os resultados das estimativas de carga das estacas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aoki, N. E Velloso, D. A. (1975) *Aproximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles*. Proceedings of the 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, vol. 1.
- Aoki, N. (1976). *Considerações sobre a capacidade de carga de estacas isoladas*. Notas de Aula, Universidade Gama Filho.
- Aoki, N. (1997). *Determinação da capacidade de carga última de estaca cravada em prova de carga dinâmica de energia crescente*. Tese de Doutorado, EESC/USP, São Carlos, 111p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2006). 12131: *Estacas – Prova de carga estática – Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020). 16903: *Solo – Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). 6122: *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Banco de Dados da GeoQuality Geotecnia Ltda (2013): *Relatórios Técnicos de Prova de Carga*. Natal/RN.
- Cintra, J.C.A., Aoki, N. (2010) *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Cintra, J. C. A., Aoki, N., Tsuha, C. de H., Giacheti, H. L. (2013). *Fundações: Ensaio estáticos e dinâmicos*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Décourt, L.; Quaresma, A. R. (1978) Capacidade de Carga de Estacas a partir de Valores de SPT. In: *Anais do 6º COBRAMSEG*, Rio de Janeiro, vol.1, p. 45-53.
- Ferreira, T. R.; Delalibera, R. G. e Silva, W. A. da. (2014) *Rotina computacional para a previsão da capacidade de cargas em estacas*. REEC, Goiás, v. 8, n. 3, p. 38-50.
- Teixeira, A. H. (1996) Projeto e Execução de Fundações. In: SEFE 3, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABEF/ABMS. v. 1, p. 33-50.

*XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
Geotécnica*

X Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas

X Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens

24 a 27 de setembro de 2024 – Balneário Camboriú/SC



Van Der Veen, C. (1953) *Bearing capacity of a pile*. In: International conference soil mechanics foundation engineering, 3., Zurich. Proceedings... Zurich, 1953. v. 2.