

Avaliação estatística de métodos semiempíricos de capacidade de carga aplicados a estacas raiz em Fortaleza/CE

Enyas Araujo Carvalho

Engenheiro civil, Unichristus, Fortaleza, Brasil, enyascarvalho@hotmail.com

Fernando Feitosa Monteiro

Professor, Unichristus, Fortaleza, Brasil, fernando.monteiro@unichristus.edu.br

Caio Augusto de Macedo

Engenheiro civil, Unichristus, Fortaleza, Brasil, caiomacedo679@gmail.com

Alfran Sampaio Moura

Professor Associado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, alfransampaio@ufc.br

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Professor Associado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br

RESUMO: O uso crescente de estacas do tipo raiz como solução de fundação no Brasil tem gerado a necessidade de avaliar a eficiência das metodologias de dimensionamento utilizadas para a análise do estado limite último dessas fundações. Nesse contexto, o presente estudo busca realizar uma análise estatística dos resultados obtidos pelos principais métodos semiempíricos de previsão de capacidade de carga em estacas raiz com diferentes diâmetros, a partir de resultados de prova de carga obtidos em obras na cidade de Fortaleza. O artigo compara os métodos de dimensionamento propostos por Lizzi (1982), Salioni (1985), Cabral (1986), Brasfond (1991), Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978) com os resultados de oito provas de carga estática realizadas em estacas do tipo raiz com diâmetros entre 0,20 e 0,41 m e comprimentos entre 8 e 16 m. Com base na proposta de Orr e Cherubini (2003), que sugere o uso do índice estatístico RD (Ranking Distance), foi possível avaliar a eficácia das metodologias semiempíricas de capacidade de carga. Os métodos de Brasfond (1991), Cabral (1986) e Aoki e Velloso (1975) apresentaram maior concordância.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca raiz, prova de carga estática, capacidade de carga.

ABSTRACT: The increasing use of root piles as a foundation solution in Brazil has generated the need to assess the efficiency of bearing capacity estimation methodologies used for these foundations. In this context, the present study aims to perform a statistical analysis of the results obtained by the main semi-empirical methods for predicting load capacity in root piles with different diameters, based on load test results obtained in construction projects in the city of Fortaleza. The article compares the bearing capacity estimation methodologies proposed by Lizzi (1982), Salioni (1985), Cabral (1986), Brasfond (1991), Aoki and Velloso (1975), and Décourt and Quaresma (1978) with the results of eight static load tests conducted on root piles with diameters ranging from 0.20 to 0.41 m and lengths between 8 and 16 m. Based on the proposal of Orr and Cherubini (2003), which suggests the use of the statistical index RD (Ranking Distance), it was possible to evaluate the effectiveness of semi-empirical load capacity methodologies. The Brasfond (1991), Cabral (1986), Aoki and Velloso (1975) methods showed greater agreement.

KEYWORDS: Root pile, Static load test, pile bearing capacity.

1 INTRODUÇÃO

A construção de edificações é habitualmente subdividida em fases distintas, cada uma abordando atividades específicas, sendo estas essenciais para a conclusão da obra. Ao longo do processo construtivo, essas fases mantêm comunicação entre si, exercendo influência recíproca nos projetos, como evidenciado pela interação entre as etapas de superestrutura e infraestrutura. Estas fases seguem uma lógica colaborativa, direcionada para a transmissão e distribuição eficiente das cargas da edificação para o solo. Entretanto, nas fases iniciais do projeto, as abordagens para as fundações podem variar, dependendo de fatores como a localização do imóvel e os resultados dos ensaios de SPT (Standard Penetration Test). Uma das abordagens comuns para projetos de fundação é a utilização de estacas, que podem ser categorizadas com base em diferentes critérios, incluindo o material de composição e o método executivo. Essa categorização pode abranger aspectos como a substituição do solo ou a sua movimentação (ALBUQUERQUE E GARCIA, 2020). No contexto dos métodos executivos envolvendo estacas de substituição de solo, destaca-se a utilização de estacas do tipo raiz, uma prática amplamente difundida em Fortaleza. Estas estacas representam soluções que oferecem uma considerável capacidade de carga, influenciada principalmente pela resistência lateral gerada pelo solo.

Os valores de capacidade de carga são comumente estimados através de métodos semiempíricos nas etapas iniciais do projeto de fundação, sendo usualmente verificados a partir dos métodos de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978), Lizzi (1982), Salioni (1985), Cabral (1986) e Brasfond (1991). Esses métodos são baseados em conceitos estáticos, resultados de ensaios do tipo SPT e de provas de carga. Consequentemente, torna-se uma questão de destaque entre os profissionais da geotecnia durante a avaliação da capacidade de carga das estacas, pois diversos métodos podem produzir resultados discrepantes, muitas vezes distanciados da capacidade real da estaca. Uma abordagem para analisar a eficácia desses métodos é o Ranking Distance, um método estatístico que compara os valores estimados com os obtidos em provas de carga, para determinar quais metodologias são mais eficazes para o solo específico do local. Este estudo visa analisar a eficácia de metodologias semiempíricas para estimar a capacidade de carga de estacas do tipo raiz, considerando as condições específicas do solo em Fortaleza a partir do *Ranking Distance* (RD). Portanto, esta pesquisa pode resultar em melhorias na precisão dos projetos e dimensionamentos que empregam esse tipo de fundação na cidade, promovendo projetos mais precisos e econômicos, levando em consideração as condições geotécnicas locais.

2 RANKING DISTANCE (RD)

Orr e Cherubini (2003) propuseram o índice estatístico RD (Ranking Distance), que avalia tanto a acurácia, por meio da média, quanto à precisão, por meio do desvio padrão da relação (valores calculados/medidos) de grandezas quaisquer. A acurácia de um método de cálculo pode estar associada à tendência central do conjunto de dados. Portanto, a média ou a mediana truncada dos dados podem ser usadas para fornecer um indicador de acurácia. A precisão, ou seja, a quantidade de dispersão, das previsões de um método de cálculo pode ser avaliada por meio de uma medida da dispersão do conjunto de dados examinado. Portanto, o desvio padrão (s) ou a amplitude interquartil podem ser usados com sucesso para indicar a precisão. A precisão refere-se à proximidade entre os resultados obtidos em múltiplas medições ou previsões repetidas, ou seja, a quantidade de dispersão nos dados. Quanto menor a dispersão, maior é a precisão. A acurácia, por sua vez, está relacionada à proximidade dos resultados em relação ao valor verdadeiro ou objetivo. Ou seja, a acurácia mede os quão corretos ou próximos dos resultados desejados são. Enquanto a precisão avalia a consistência dos resultados, a acurácia avalia a exatidão em relação ao valor verdadeiro ou objetivo. É possível ter resultados precisos (pouca dispersão) mas não acurados (distantes do valor verdadeiro) e vice-versa.

$$RD = \sqrt{\left[1 - \left(\mu(Q_{\text{calculado}}/Q_{\text{medido}})\right)\right]^2 + \left[\left(s(Q_{\text{calculado}}/Q_{\text{medido}})\right)\right]^2} \quad (1)$$

Onde $\mu(Q_{\text{calculado}}/Q_{\text{medido}})$ representa a média e $s(Q_{\text{calculado}}/Q_{\text{medido}})$ o desvio padrão dos valores das razões $(Q_{\text{calculado}}/Q_{\text{medido}})$. Quando a razão $(Q_{\text{calculado}}/Q_{\text{medido}})$ apresenta um valor equivalente a unidade e o desvio padrão é igual a zero, observa-se então a condição ótima.

3 ESTUDO DE CASO

Para este estudo, foram compilados dados apresentados por Moura *et al.* (2011) e Monteiro (2016). Os dados foram selecionados com base na disponibilidade de obras que empregaram estacas do tipo raiz e subsequentemente foram submetidas a provas de carga estática situadas na cidade de Fortaleza. A Figura 1 ilustra a localização de cinco obras que contribuiriam com dados de oito estacas distribuídas entre elas. Conforme detalhado na Tabela 1, as obras 1 e 2 estão situadas no bairro Guararapes, onde a obra 1 forneceu dados de uma estaca, enquanto a obra 2 contribuiu com dados de duas estacas. A obra 3, localizada no bairro Castelão, contribuiu com dados de três estacas, as quais apresentavam diâmetro inferior às das demais obras. Nas obras 4 e 5, foram obtidos dados de uma estaca cada, localizadas nos bairros Praia do Futuro e Meireles, respectivamente.

Tabela 1. Características geométricas e executivas das estacas.

Dados	Obra 1		Obra 2		Obra 3		Obra 4	Obra 5
	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3	Estaca 4	Estaca 5	Estaca 6	Estaca 7	Estaca 8
L(m)	12,00	16,00	12,00	8,45	8,45	8,45	8,00	8,00
D(mm)	350	410	410	160	200	250	350	410
Pressão de Injeção (kPa)	300	300	300	300	300	300	300	300

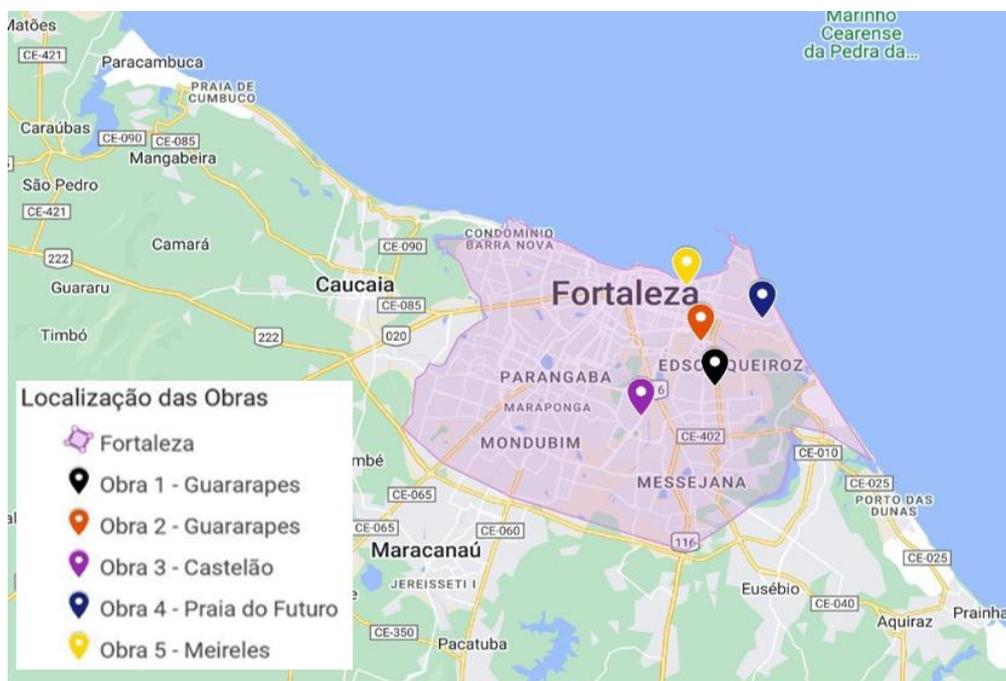
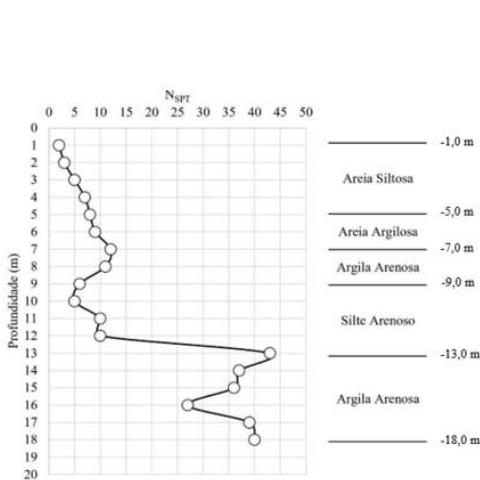
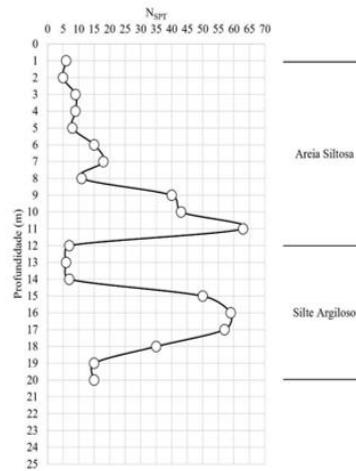


Figura 1. Localização das obras do estudo.

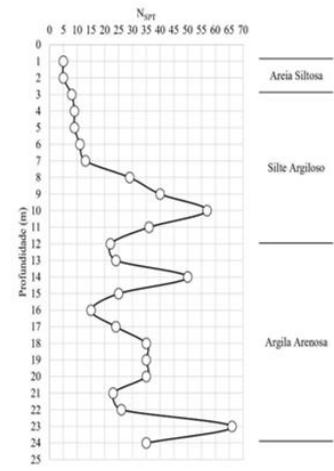
As Figuras 2, 3 e 4 apresentam os perfis estratigráficos das obras analisadas, bem como os valores de índice de resistência a penetração no ensaio SPT (N_{SPT}) ao longo da profundidade. Ao passo que as Figuras 5 e 6 apresentam as curvas carga *versus* recalque das estacas avaliadas neste trabalho. Na Tabela 2 são apresentados os valores de recalque máximo e carga máxima submetida nas estacas das provas de carga apresentadas na Figura 5 e 6, além da inclusão dos valores obtidos após a extrapolação das curvas, a partir do método de Décourt (1996). Os ensaios do tipo SPT foram realizados conforme preconizado pela ABNT (2001), enquanto as provas de carga estáticas foram conduzidas segundo as diretrizes da ABNT (2006).



(A) Obra 1 – estaca 1

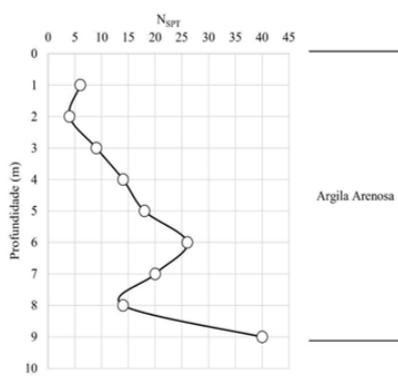


(B) Obra 2 – estaca 2

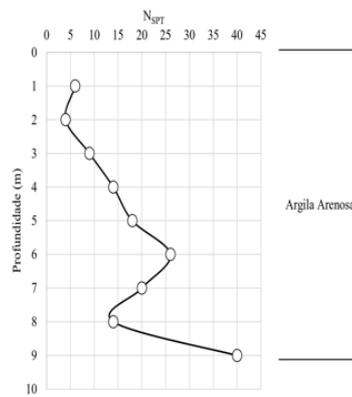


(C) Obra 2 – estaca 3

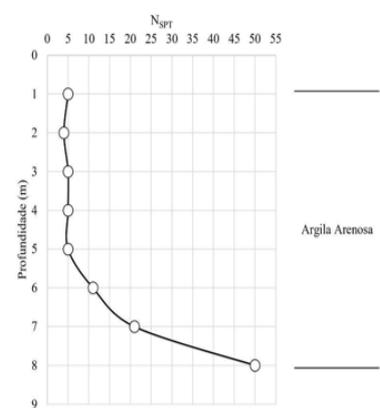
Figura 2. Perfil estratigráfico: (a) obra 1 – estaca 1, (b) obra 2 – estaca 2, (c) obra 2 – estaca 3.



(A) Obra 3 – estaca 4

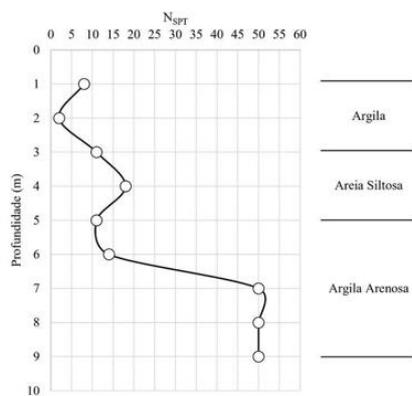


(B) Obra 3 – estaca 5

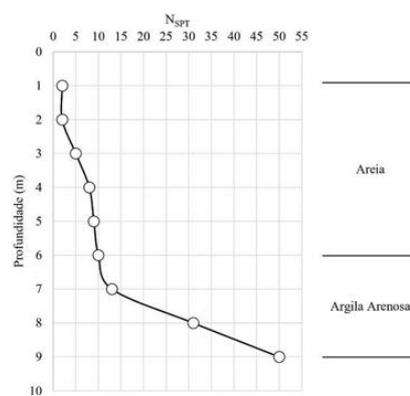


(C) Obra 3 – estaca 6

Figura 3. Perfil estratigráfico: (a) obra 3 – estaca 4, (b) obra 3 – estaca 5, (c) obra 3 – estaca 6.



(A) Obra 4 – estaca 7



(B) Obra 5 – estaca 8

Figura 4. Perfil estratigráfico: (a) obra 4 – estaca 7, (b) obra 5 – estaca 8.

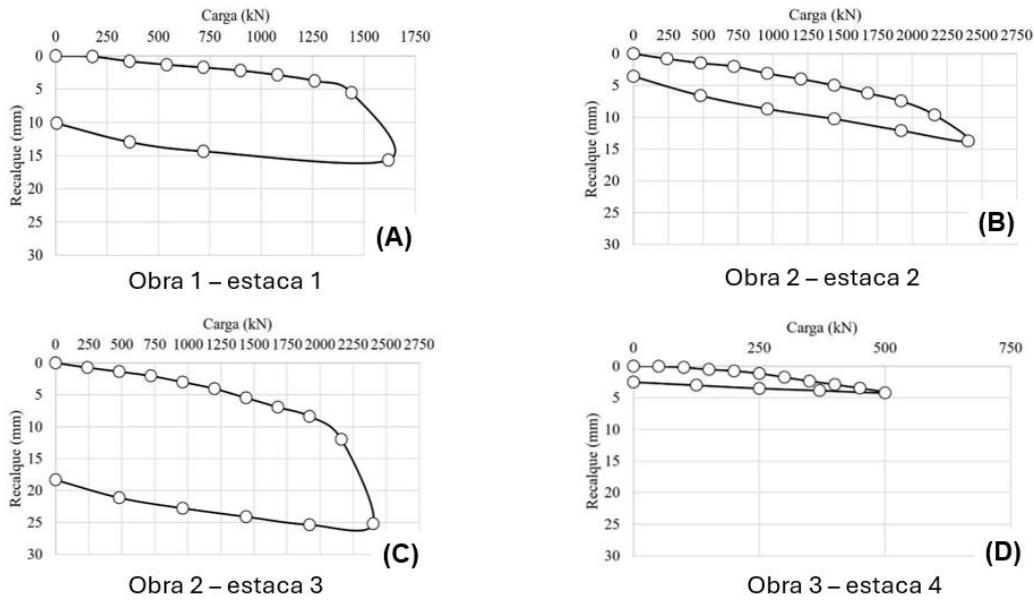


Figura 4. Curvas carga *versus* recalque: (a) estaca 1, (b) estaca 2, (c) estaca 3, (d) estaca 4.

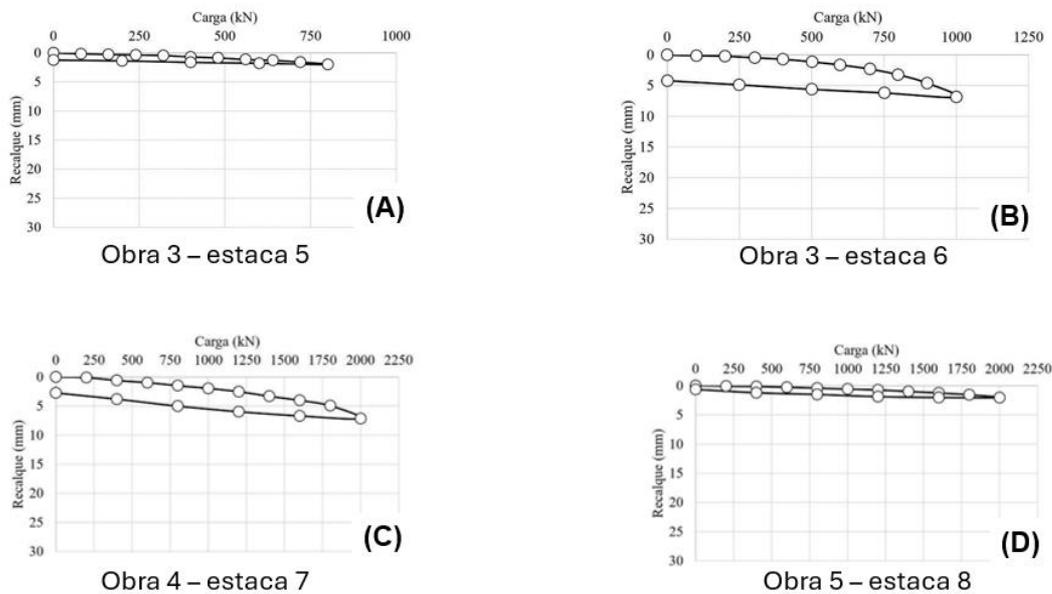


Figura 5. Curvas carga *versus* recalque: (a) estaca 5, (b) estaca 6, (c) estaca 7, (d) estaca 8.

Tabela 2. Valores de carregamento e recalque máximos observados nas provas de carga estáticas.

Dados	Obra 1	Obra 2		Obra 3		Obra 4	Obra 5	
	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3	Estaca 4	Estaca 5	Estaca 6	Estaca 7	Estaca 8
Carga Máxima Submetida (kN)	1620	2400	2400	500	800	1000	2000	2000
Recalque Máximo (mm)	15,8	13,7	12,4	4,2	2,0	6,9	7,1	2,0
Carga Extrapolada (kN)	2157	4667	3291	711	1546	1188	3487	3245

Em alguns casos, não foi possível verificar uma ruptura geotécnica caracterizada na curva carga *versus* recalque. Deste modo, a extrapolação da prova de carga foi realizada a partir da metodologia de Décourt (1996).

4 RESULTADOS

Neste item são apresentadas as estimativas de capacidade de carga realizadas a partir dos métodos semiempíricos de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978), Lizzi (1982), Salioni (1985), Cabral (1986) e Brasfond (1991). Além disso, são apresentadas análises com base no método estatístico do *Ranking Distance* (RD), que com base nas relações dos valores obtidos nas provas de carga extrapoladas (Q_m) apresentadas na Tabela 2 e 3, em conjunto dos valores calculados de capacidade de carga (Q_p) com base nas metodologias de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978), Lizzi (1982), Salioni (1985), Cabral (1986) e Brasfond (1991) apresentados na Tabela 3, indicam a precisão e acurácia das metodologias analisadas. A extrapolação de provas de carga apresenta limitações quanto ao tipo de metodologia adotada na extrapolação, bem como em relação a provas de carga que ainda se encontram no trecho linear da curva carga *versus* recalque. A validade das extrapolações pode ser averiguada a partir da realização de provas de carga instrumentadas com deslocamentos da ordem de 10% do diâmetro do fuste da estaca. Contudo, destaca-se que apenas três das oito estacas avaliadas se encontram no trecho linear das respectivas curvas carga *versus* recalque. Deste modo, as comparações aqui realizadas podem ser consideradas válidas dentro do contexto apresentado e de suas limitações quanto às condições de carregamento e ao perfil estratigráfico das obras apresentadas. A Tabela 4 apresenta os valores médios e de desvio padrão das razões (Q_p/Q_m) dos métodos semiempíricos utilizados para as oito estacas avaliadas neste trabalho. O valor do *Ranking Distance* (RD) para cada metodologia é calculado conforme a Equação 1, com base nos valores médios e de desvio padrão das razões (Q_p/Q_m) dos métodos semiempíricos empregados neste trabalho.

Tabela 3. Valores de capacidade de carga estimados (Q_p) a partir de métodos semiempíricos e valores extrapolados a partir de provas de carga (Q_m).

Estaca	Aoki e Velloso 1975 (kN)	Décourt e Quaresma 1978 (kN)	Salioni 1985 (kN)	Lizzi 1982 (kN)	Cabral 1986 (kN)	Brasfond 1991 (kN)	Prova de carga (kN)
1	765	645	730	1099	806	806	2157
2	3305	2249	1339	1906	2736	2644	4667
3	1536	1438	285	721	1505	1937	3291
4	240	128	74	178	376	351	711
5	665	285	96	213	739	724	1546
6	390	239	106	251	640	586	1188
7	1499	719	203	527	1349	1368	3487
8	1089	582	257	721	1100	1014	3245

Tabela 4. Valores de capacidade de carga estimados (Q_p) a partir de métodos semiempíricos.

Metodologia	Média (Q_p/Q_m)	Desvio Padrão (Q_p/Q_m)	Ranking Distance
Aoki e Velloso (1975)	0,43	0,13	0,58
Décourt e Quaresma (1978)	0,21	0,11	0,80
Salioni (1985)	0,09	0,12	0,92
Lizzi (1982)	0,22	0,14	0,79
Cabral (1986)	0,48	0,08	0,53
Brasfond (1991)	0,49	0,06	0,51

Ao observar os resultados apresentados na Tabela 4, é possível identificar os métodos que apresentaram melhor e pior desempenho na previsão da capacidade de carga das estacas raiz situadas em Fortaleza. As metodologias propostas por Brasfond (1991), Cabral (1986) e Aoki e Velloso (1985) foram os métodos que obtiveram melhor desempenho, com RDs de 0,51, 0,53 e 0,58, respectivamente. Ao passo que as metodologias de Salioni (1985), Décourt e Quaresma (1978) e Lizzi (1982) foram os métodos menos precisos e acurados, com RDs de 0,92, 0,80 e 0,79, respectivamente. Ressalta-se ainda que o método de Brasfond (1991) apresentou o menor valor de RD, sendo esta a metodologia mais acurada dentro do contexto analisado. Contudo,

destaca-se que os resultados apresentados são restritos às condições das análises e baseados em um conjunto limitado de dados. Portanto, é fundamental ressaltar que os resultados aqui apresentados devem ser considerados com limitações em termos de alcance e aplicabilidade, sendo válidos apenas dentro do contexto dos dados, similaridade geométrica, geotécnica e operacional utilizados nesta pesquisa.

5 CONCLUSÕES

Para este trabalho, foi proposta uma análise comparativa entre seis metodologias semiempíricas, baseadas em resultados de ensaios SPT, para estimar a capacidade de carga para oito estacas do tipo raiz, através do método estatístico do *Ranking Distance* (RD), usando resultados das estimativas e provas de carga estática realizadas em Fortaleza/CE, e assim, identificar quais destes métodos possui maior assertividade, para a situação apresentada nos ensaios do solo da cidade.

As oito estacas, estão situadas em cinco obras no município, onde foram realizadas uma sondagem e uma prova de carga para cada estaca. Os resultados das oito sondagens, em conjunto das informações de comprimento, diâmetro e pressão de injeção de cada estaca, foram aplicados em cada uma das seis metodologias, Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978), Salioni (1985), Lizzi (1982), Cabral (1986) e Brasfond (1991). Quanto as provas de carga estáticas, foram coletados dados das curvas carga *versus* recalque, sendo estas interpretadas e submetidas a extrapolação pelo método de Décourt (1996) para obter a carga máxima de ruptura de cada uma das provas de carga.

A partir dos valores das cargas de ruptura e dos resultados das estimativas, foram conduzidas análises estatísticas utilizando o método de *Ranking Distance* (RD) para determinar a precisão e a acurácia dos diferentes métodos de previsão de capacidade de carga para o município de Fortaleza. Embora alguns métodos tenham demonstrado maior precisão do que outros, ainda há espaço para aprimoramentos e ajustes nos modelos, visando aumentar a confiabilidade das previsões. Sugerem-se, portanto, estudos adicionais envolvendo uma ampla gama de dados e condições de carga, com o intuito de aprimorar as metodologias empregadas. Com base nas tendências observadas nos dados e nas análises realizadas, é possível extrair algumas conclusões gerais:

- Com base na análise dos dados realizada neste estudo, pode-se concluir que os métodos de Brasfond (1991), Cabral (1986) e Aoki e Velloso (1975) obtiveram os menores valores de RD, o que significa que foram os mais precisos e acurados, considerando os valores de referência (valores medidos em prova de carga e posteriormente extrapolados);
- O método de Brasfond (1991) apresentou o menor valor de RD, sendo esta a metodologia mais acurada dentro do contexto analisado.
- Os métodos que obtiveram os maiores valores de *Ranking Distance* (RD) foram, respectivamente, os propostos por Salioni (1985), Décourt e Quaresma (1978) e Lizzi (1982). Desta forma, observa-se que o método de Salioni (1985) demonstrou os resultados menos precisos e acurados. Tanto Lizzi (1982) quanto Décourt e Quaresma (1978) exibem comportamento semelhante, porém também apresentam resultados com menor precisão e acuidade;
- Ao analisar os métodos por meio da razão entre a capacidade de carga prevista (Q_p), calculada pelos métodos semiempíricos, e a capacidade de carga extrapolada (Q_m), constata-se que os métodos propostos por Brasfond (1991), Cabral (1986) e Aoki e Velloso (1975) proporcionam maior assertividade nas previsões de capacidade de carga. As razões (Q_p/Q_m) tendem a se aproximar de 1. Por outro lado, os métodos de Salioni (1985), Lizzi (1982) e Décourt e Quaresma (1978) resultaram em razões (Q_p/Q_m) menores, aproximando-se de 0;

De modo geral, todos os métodos semiempíricos analisados neste estudo demonstraram uma característica de dimensionamento cauteloso e conservador, levando em consideração as informações disponíveis sobre o comportamento das estacas raiz no contexto do presente estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, P. J. R., Garcia, J.R. (2020) *Engenharia de Fundações*, 1 ed., Editora GEN, São Paulo, SP, Brasil, 356 p.
- Aoki, N., Velloso, D.A. (1975) An Approximate Method to Estimate Vertical Load Capacity of Piles. In: 5th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires. *Proceedings... ISSMGE*. v. 1, p 367-376.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001) NBR 6484. *Solo – sondagens de simples reconhecimento com SPT – método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131. *Estacas- Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Brasfond (1991). Catálogo técnico sobre estacas raiz.
- Cabral, D.A. (1986) O uso da estaca raiz como fundação de obras normais. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações - COBRAMSEG 8, Porto Alegre. *Anais... ABMS*. v. 6, p. 71-82.
- Décourt, L. Quaresma, A. R. (1978) Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Fundações - CBMSEF 6, São Paulo. *Anais... ABMS*. v. 1, p. 45-53.
- Décourt, L. (1996) A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia - SEFE 3, São Paulo. *Anais... ABMS*. v. 1, p. 215-224.
- Lizzi, F. (1982) The “pali radice” (root piles): a state-of-the-art report. In: International Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok. *Proceedings...Asian Institute of Technology*. v. 1, p. 417-432.
- Monteiro, F. F. (2016) *Desenvolvimento de uma proposta para o controle executivo de estacas do tipo de raiz*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de engenharia hidráulica e ambiental, Universidade Federal do Ceará/UFC, 126p.
- Moura, A. S., Nóbrega Júnior, A. J., Aguiar, M. F. P. (2011) Análise de métodos semi-empíricos para o cálculo da capacidade de carga de estacas raiz de pequeno e grande diâmetro em obras de Fortaleza. *Revista Tecnologia*, 32(1), p.56–72.
- Orr, T.L., Cherubini, C. (2003). Use of the Ranking Distance as an Index for Assessing the Accuracy and Precision of Equations for the Bearing Capacity of Piles and At-Rest Earth Pressure Coefficient. *Canadian Geotechnica Journal*, 40(6), p.1200-1207.
- Salioni, C. (1985) Capacidade de carga de estacas injetadas. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia - SEFE 1, São Paulo. *Anais... ABMS*. v. 1, p. 13-27.