XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/31

Avaliação do Desempenho de Fundações Profundas de Prédios no Ceará a Partir de Resultados de Provas de Carga Estática

Vitória Amorim do Nascimento
Estudante de Eng. Civil, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, vitoria.amorim62@aluno.ifce.edu.br

Marcos Fábio Porto de Aguiar
Professor Associado, D.Sc., Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br

Luiz Kauã Grangeiro Barata
Estudante de Eng. Civil, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, luiz.kaua09@aluno.ifce.edu.br

Marina Albuquerque Porto de Aguiar
Estudante de Eng. Civil, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, marina.porto07@aluno.ifce.edu.br

RESUMO: Em projetos geotécnicos de fundação, é comum o dimensionamento a partir da capacidade de carga, que é frequentemente estimada por meio de métodos semiempíricos e validados por provas de carga estática (PCE). Este trabalho tem como objetivo analisar os resultados de 77 provas de carga estática realizadas em estacas do tipo raiz e hélice contínua, distribuídas em 31 obras localizadas no estado do Ceará, Brasil. A análise considera os valores previstos em projeto, avaliando o desempenho das soluções adotadas e a acurácia das estimativas obtidas por métodos semiempíricos. Com base nos dados de sondagens à percussão (SPT) e na geometria das estacas ensaiadas nas provas de carga estática, estimou-se as capacidades de carga e os recalques correspondentes à carga de projeto. Considerando a estimativa de capacidade de carga pelos métodos semiempíricos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978), verificou-se que o método de Décourt-Quaresma (1978) apresentou valores mais próximos dos obtidos com a prova de carga estática para as regiões analisadas e tipos de estacas do estudo. Em relação aos recalques, que foram estimados pelo método de Aoki (1984), observou-se que o referido método apresentou valores conservadores em relação ao obtido com as provas de carga estática, situação a favor da segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações profundas, Desempenho, Capacidade de carga, Recalques.

ABSTRACT: In geotechnical foundation projects, design is commonly based on bearing capacity, which is frequently estimated through semi-empirical methods and validated by Static Load Tests (SLT). This study aims to analyze the results of 77 SLTs performed on root piles and continuous flight auger (CFA) piles, distributed across 31 construction sites located in the state of Ceará, Brazil. The analysis considers the design values, evaluating the performance of the adopted solutions and the accuracy of the estimates obtained by semi-empirical methods. Based on Standard Penetration Test (SPT) data and the geometry of the piles tested in the SLTs, the bearing capacities and settlements corresponding to the design load were estimated. Considering the bearing capacity estimation by the semi-empirical methods of Aoki-Velloso (1975) and Décourt-Quaresma (1978), it was found that the Décourt-Quaresma (1978) method presented values closer to those obtained from the static load tests for the analyzed regions and pile types in the study. Regarding settlements, which were estimated by the Aoki (1984) method, it was observed that the aforementioned method yielded conservative values relative to those obtained from the static load tests, a condition favoring safety.

KEYWORDS: Deep foundations, Foundation performance, Bearing capacity, Settlements.

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução das técnicas e dos materiais empregados na construção civil ao longo dos anos, passou-se a projetar edificações cada vez mais altas. O aumento da altura e da complexidade estrutural dessas obras implicou, consequentemente, a elevação das cargas atuantes e dos esforços transmitidos às fundações. Entretanto, a capacidade resistente do solo não evolui na mesma proporção, permanecendo limitada às suas características geotécnicas naturais. Diante desse cenário, tornou-se um dos principais desafios da engenharia garantir que as fundações sejam capazes de transferir adequadamente as cargas da superestrutura ao solo, sem provocar ruptura ou deformações excessivas.

Nesse contexto, a segurança de uma fundação refere-se à sua capacidade de suportar as cargas aplicadas sem atingir a ruptura. Por se tratar de um conceito qualitativo, sua avaliação pode ser realizada por meio de métodos semiempíricos. Neste trabalho, a estimativa da capacidade de carga foi conduzida com base nos métodos de Aoki e Velloso (1975) e de Décourt e Quaresma (1978). Entretanto, além da segurança à ruptura, torna-se relevante verificar os recalques, a fim de garantir o desempenho adequado da fundação. Para essa avaliação, foi adotado o método de Aoki (1984).

Com isso, tem-se por objetivo analisar os resultados de provas de carga estática, verificando a correspondência entre a capacidade de carga e os recalques estimados e os valores medidos em campo, de modo a avaliar a eficiência dos métodos semiempíricos utilizados no dimensionamento de fundações profundas na região de estudo, que pode favorecer a otimização das práticas de projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Dimensionamento de Fundações Profundas

As fundações profundas têm como objetivo transferir as cargas da edificação ao solo por meio da base, do atrito lateral ou pela combinação de ambos os mecanismos. Segundo a NBR 6122 (ABNT,2022), a fundação profunda é aquela que possui a base a uma profundidade superior a oito vezes sua menor dimensão B e a pelo menos 3,00 m de profundidade e fundação superficial é colocada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão B da fundação como mostrada na Figura 1.

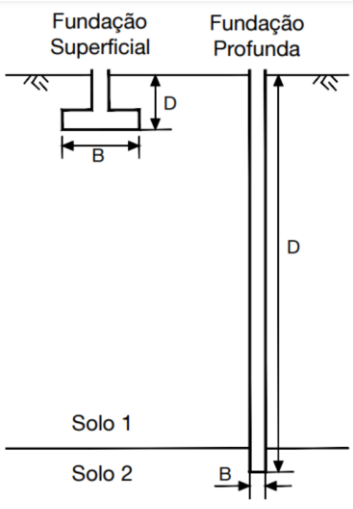


Figura 1. Fundação profunda e superficial (Monteiro, 2016).

As fundações profundas podem ser classificadas em estacas, tubulões e caixões. As estacas são aquelas que são executadas sem a necessidade da decida de um operário em nenhum momento, podendo ser cravadas ou moldadas no terreno, formadas de materiais como aço, madeira, concreto armado ou concreto pré-moldado. Os tubulões são um elemento de seção cilídrica que exigem a descida de operários para a execução, podendo ser construídos a céu aberto ou sob ar comprimido. Já os caixões, por sua vez, consistem em elementos

prismáticos ou cilídricos ocos, executados por meio da escavação do solo, permitindo sua descida até a profundidade prevista.

Para investigar o solo que serão realizadas a construção dessas estacas são realizadas as sondagens a percussão, este ensaio é normatizado pela NBR 6484 (ABNT, 2020), segundo a norma deve ser realizado a cada metro e a a cravação do amostrador padrão de Raymond – Terzaghi se faz por meio de um martelo com 65 kgf caindo de uma altura de 75 cm de altura. Durante essas cravações são anotados quantos golpes foram necessários para cravar 45 cm do amostrados, divididos em 3 conjuntos de 15 golpes. O SPT será o número de golpes necessários para cravar os últimos 30 cm do amostrador como mostra a Figura 2.

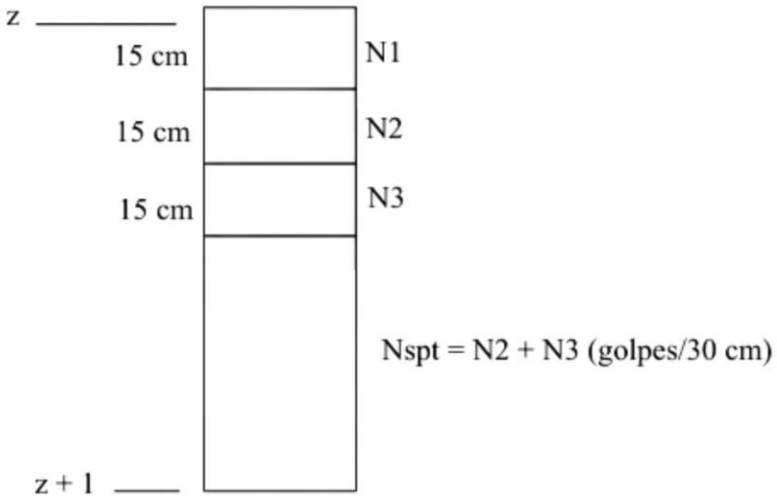


Figura 2. Ensaio de sondagem a percussão.

A partir dos resultados obtidos nas sondagens e com as informações do projeto é possível determinar a capacidade de carga, que corresponde ao valor da máxima resistência que o sistema pode oferecer ou do valor representativo da condição de ruptura do sistema. A capacidade de carga da estaca é constituída pela soma de duas partes: a resistência por atrito lateral (RL) e a resistência de ponta (RP), conforme a Figura 3 (Cintra e Aoki, 2010).

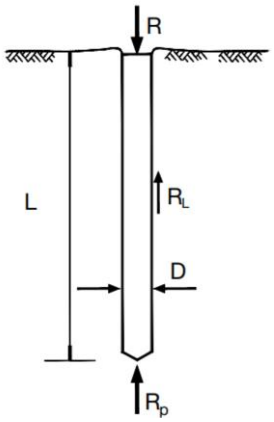


Figura 3. Parcelas de resistência que constituem a capacidade de carga.

Essa capacidade de carga pode ser calculada através de métodos semiempíricos e prova de carga. Os métodos semiempíricos relacionam os ensaios de campo, para calcular a capacidade de carga. |Já as provas de carga são realizadas em campo aplicando uma força na estaca e observando o seu deslocamento. Para esse trabalho os métodos analisados serão o Método de Aoki-Velloso (1975) e o Método de Décourt-Quaresma (1978).

2.2 Estimativa de capacidade de carga

2.2.1 Método de Aoki-Velloso (1975)

Aoki e Velloso (1975) propuseram um método para o cálculo da capacidade de carga, que usa correlação do ensaio de CPT, porém no Brasil o CPT não é tão empregado, então utiliza-se o índice de resistência à penetração (N_{SPT}). Para estimar a capacidade de carga através desse método, a capacidade de carga (R) da estaca é definida pela resistência de ponta, associada à área da base (A_P) e ao índice de resistência à penetração (N_P), e pela resistência lateral, relacionada ao perímetro do fuste (U), ao coeficiente de empuxo (K), ao índice médio de resistência (N_L) em cada camada de espessura (ΔL) e ao fator α, todos ajustados pelos fatores de correção (F1 e F2). Como mostra a equação 1.

$$R = \frac{K \cdot N_P}{F_1} \cdot A_P + \frac{U}{F_2} \cdot \sum_{1}^{n} (\alpha \cdot K \cdot N_L \cdot \Delta_L) \quad (1)$$

2.2.2 Método de Décourt-Quaresma (1978)

O método Décourt-Quaresma (1978), diferentemente do método de Aoki-Velloso, utiliza os dados apenas do ensaio SPT. Nesse método, a capacidade de carga (R) da estaca é calculada a partir da resistência de ponta (RP) e lateral (RL). Na ponta, considera-se o fator específico (α), o coeficiente do solo (C), o índice médio de resistência à penetração (NP) e a área da seção (AP). No fuste, utilizam-se o fator lateral (β), o índice médio (NL), o perímetro (U) e o comprimento da estaca (L). Como mostra a equação 2 a seguir.

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

2.2.3 Prova de carga estática

A NBR 12131 (ABNT, 2006) define que a prova de carga consiste em aplicar forças estáticas à estaca e registrar os deslocamentos. Sendo essas forças axiais, de tração ou compressão, ou transversais. A norma descreve as cargas aplicadas são definidas pelo projetista atendendo a NBR 6122 (ABNT, 2022), com carregamento lento e o rápido.

2.3 Recalque

Quando uma carga é aplicada a uma fundação, ela pode causar recalque, que é o deslocamento vertical descendente em um ponto da estrutura. De acordo com o princípio da ação e reação, a carga transmitida pela fundação ao solo causa deformações que resultam no recalque (Cintra e Aoki, 2013).

Militisky, Consoli e Schnaid (2008) definem uma fundação adequada a que apresenta recalques compatíveis com a edificação. Todas as construções apresentam recalques, pois a fundação está em contato com o solo que é deformável ao ser carregado, provocando deslocamentos das fundações. Também é possível estimar os valores do recalque, nesse trabalho será utilizado o método de Aoki (1984).

2.3.1 Método de Aoki (1984)

Para estimar os recalques para a carga de trabalho foi utilizado o método de Aoki (1984), representado a seguir, na equação 01. O recalque total da estaca é dado pela soma do encurtamento elástico da estaca e o recalque da base da estaca. Como mostra a Equação 03, a seguir.

$$p = p_e + p_s \quad (3)$$

3 ESTUDO DE CASO

Neste estudo, estimou-se a capacidade de carga e os recalques para a carga de trabalho através dos métodos semiempíricos, a partir de dados de 77 provas de carga estática em estacas (PCE), executadas em 31 obras localizadas no estado do Ceará, sendo 74 do tipo hélice contínua e 3 do tipo raiz.

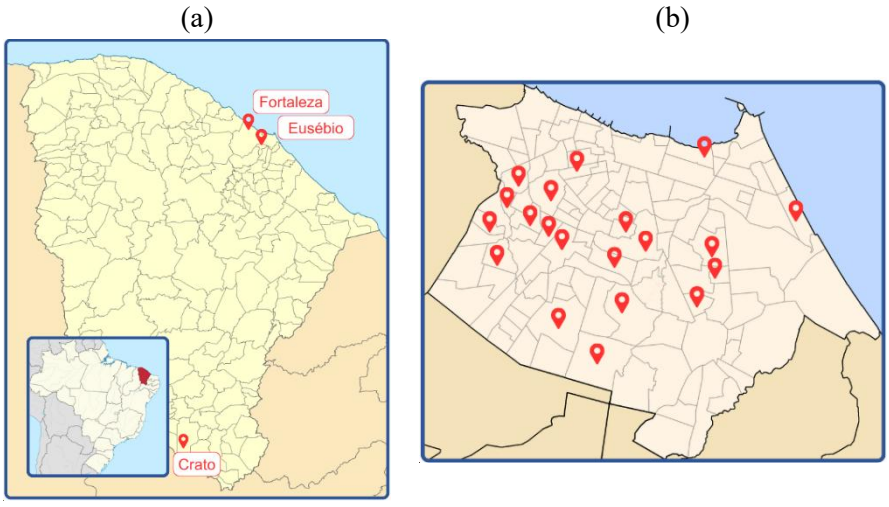


Figura 1. Localização das obras:
(a) Localização das cidades no estado do Ceará; (b) Localização das obras em Fortaleza.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados fornecidos, foi desenvolvida uma planilha eletrônica para calcular a capacidade de carga, permitindo calcular os valores de capacidade estimada. Em seguida, foi criado um banco de dados reunindo esses resultados e os valores medidos em provas de carga. Com o objetivo de verificar a acurácia dos métodos semiempíricos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978), realizou-se uma análise estatística da discrepância entre a capacidade estimada (Q_{EST}) e a capacidade medida (Q_{MED}). Essa avaliação foi conduzida por meio do índice de razão (R2), definido conforme a Equação 04, apresentada a seguir.

$$R_2 = \frac{Q_{EST}}{Q_{MED}} \tag{04}$$

As capacidades de carga foram analisadas por meio de *boxplot*. Como mostra a Figura 06, a seguir.

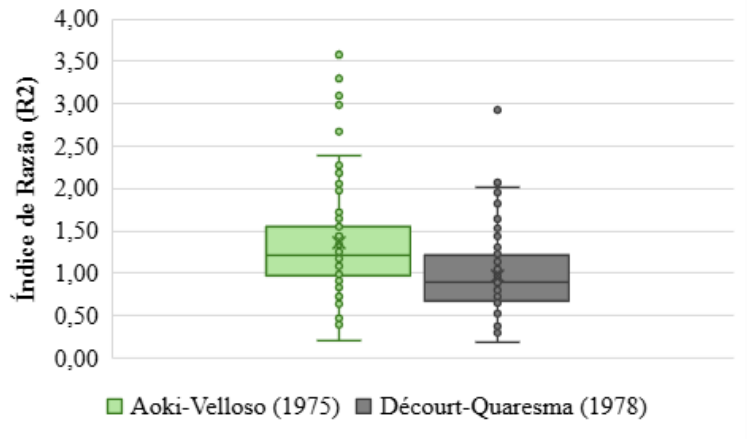


Figura 6 - Gráfico *boxplot* do índice de razão (R2).

Nesse caso, o *boxplot* evidencia diferenças relevantes entre os métodos analisados. O método de Aoki-Velloso (1975) apresenta maior dispersão dos resultados e uma mediana acima de 1, indicando tendência à superestimação da capacidade de carga. Podendo prejudicar o subdimensionamento das fundações, já que os valores estimados podem ser superiores ao realmente suportado, podendo comprometer a segurança. Entretanto, o método de Décourt-Quaresma (1978), mostra uma distribuição mais concentrada e uma mediana próxima de 1, revelando melhor proximidade entre as capacidades estimadas e medidas em campo. Esse resultado indica maior confiabilidade e acurácia, ainda que alguns outliers demonstram situações pontuais de discrepância.

De maneira análoga, também foi desenvolvida uma planilha eletrônica para calcular os recalques para a carga de trabalho, utilizando a equação do método de Aoki (1984). Após isso, criou-se um banco de dados com esses resultados e com os valores obtidos nas provas de carga, para fim de comparação. Para verificar a precisão do método na estimativa dos recalques, realizou-se uma análise estatística da diferença entre os valores de recalque previstos para a carga de trabalho (Rec_{EST}) e aqueles efetivamente observados (Rec_{MED}). Essa avaliação foi realizada por meio do índice de razão (R1), definido conforme a Equação 05, apresentada a seguir.

$$R_1 = \frac{Rec_{EST}}{Rec_{MED}} \tag{05}$$

Dessa forma, seguindo o mesmo procedimento adotado para a capacidade carga, foi utilizado o gráfico de *boxplot*, como mostra a Figura 07, a seguir.

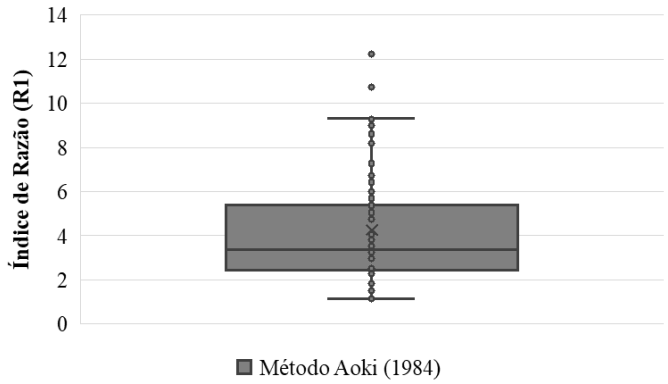


Figura 07 - Gráfico boxplot do índice de razão (R_1).

A análise do índice de razão (R_1) pelo método de Aoki (1984) indica uma tendência de superestimação dos recalques, visto que a mediana se encontra acima de 1. Esse comportamento, por um lado, pode ser considerado favorável do ponto de vista de segurança, já que implica em valores previstos superiores aos observados, reduzindo o risco de subdimensionamento. Por outro lado, a elevada dispersão dos resultados e a presença de valores variantes evidenciam a necessidade de cuidado na aplicação do método, uma vez que podem ocorrer estimativas excessivamente conservadoras, impactando a viabilidade técnica e econômica dos projetos.

5 CONCLUSÃO

O método de Aoki-Velloso (1975) demonstra maior dispersão dos resultados e tendência à superestimação da capacidade de carga. Em contrapartida, o método de Décourt-Quaresma (1978) apresenta distribuição mais concentrada e mediana próxima de 1, indicando maior confiabilidade e melhor concordância com os valores observados, embora a presença de outliers evidencie discrepâncias pontuais. Assim, as diferenças entre os métodos impactam diretamente no entendimento do comportamento da fundação considerando o desempenho e a viabilidade econômica das fundações.

Por sua vez, o método de Aoki (1984) apresenta maior tendência à superestimação dos recalques, com mediana superior a 1 e elevada dispersão, o que revela significativa variabilidade e ocorrência de valores extremos. Esse comportamento sugere caráter mais conservador nas estimativas, exigindo cautela em sua aplicação para considerando a segurança e a viabilidade técnica dos projetos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio e suporte financeiro por meio da concessão de bolsas de iniciação científica. Agradecem, também, ao Grupo de Pesquisa em Geotecnia e Infraestrutura de Transportes (GPGEO) do Instituto Federal do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, pelo suporte técnico prestado ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, U. R. Previsão e controle das fundações. São Paulo: Edgard Blucher, 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 6122:* Solo - Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 6484:* Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

Aoki, N.; CINTRA, J. C. A. Fundações por estacas: projeto geotécnico. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

Aoki, N.; Velloso, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, 5., 1975, Buenos Aires. *Anais...* Buenos Aires, 1975. v. 1. p. 367-376.

Décourt, L.; Quaresma, A. R. Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 6., 1978, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 1978. v. 1. p. 45-54.

Milititsky, J.; Consoli, N.; Schnaid, F. *Patologia das Fundações.* 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

Monteiro, Roberto dos Santos. *Tecnologia da Construção Civil – I Fundações.* Monteiro Engenharia,2016.