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/COBRAMSEG2026.5/17

Análise do desempenho de Métodos Semiempíricos na Estimativa da Capacidade de Carga de Microestacas Arcos

Reinaldo Wendel de Souza Lima Júnior
Engenheiro Civil UFSJ, Ouro Branco MG, Brasil, reinaldowsljunior@gmail.com

Irlan dos Santos Silva
Engenheiro Civil UFSJ, Brumado BA, Brasil, irlansilva112@gmail.com

Leandro Neves Duarte
Professor Associado III, UFSJ, Ouro Branco MG, Brasil, leandro.duarte@ufsj.edu.br

Tales Moreira de Oliveira
Professor Adjunto, UFSJ Ouro Branco MG, Brasil, tales@ufsj.edu.br

Anderson Ravik dos Santos
Doutorando Engenharia Civil UFOP, Ouro Branco MG, Brasil, anderson.ravik@gmail.com

RESUMO: As fundações têm a função de transmitir as cargas das estruturas ao solo, seu desempenho depende da profundidade e da capacidade de carga do terreno. Entre as fundações profundas, destacam-se as microestacas Arcos. Este estudo analisa o comportamento das microestacas Arcos por meio da estimativa de capacidade de carga utilizando métodos semiempíricos baseados nos resultados do ensaio Standard Penetration Test (SPT). A partir do perfil geológico-geotécnico de cada obra e das respectivas Provas de Carga Estática (PCE), foram estimadas as capacidades de carga segundo os métodos de Aoki e Velloso (1975) adaptado por Monteiro (1997), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996). Para interpretação das PCE, adotou-se o procedimento definido pela norma NBR 6122 para determinação da carga admissível (ABNT, 2025). Os resultados indicam que o método de Aoki e Velloso (1975), com as adaptações de Monteiro (1997), apresentou as estimativas mais conservadoras, embora os métodos de Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996) também tenham produzido valores coerentes com a PCE. Observa-se também a necessidade dos ensaios de PCE para a calibração dos métodos semiempíricos, contribuindo para maior precisão na estimativa da capacidade de carga.

PALAVRAS-CHAVE: Microestaca Arcos; Capacidade de carga; Recalque; Métodos semiempíricos; Fundação.

ABSTRACT: Foundations are responsible for transferring structural loads to the soil, and their performance depends on the depth and load-bearing capacity of the ground. Among deep foundation systems, Arcos micropiles stand out. This study analyzes the behavior of Arcos micropiles through the estimation of load-bearing capacity using semi-empirical methods based on the results of the Standard Penetration Test (SPT). Based on the geological and geotechnical profile of each project and their respective Static Load Tests (SLT), load-bearing capacities were estimated according to the methods proposed by Aoki and Velloso (1975) as adapted by Monteiro (1997), Décourt and Quaresma (1978), and Teixeira (1996). For the interpretation of the SLT results, the procedure established by the NBR 6122 standard for determining the allowable load was adopted (ABNT, 2025). The results indicate that the Aoki and Velloso (1975) method, with the adaptations proposed by Monteiro (1997), provided the most conservative estimates, although the methods of Décourt and Quaresma (1978) and Teixeira (1996) also produced values consistent with the SLT results. The study also highlights the need for Static Load Tests to calibrate semi-empirical methods, contributing to greater accuracy in estimating load-bearing capacity.

KEYWORDS: Arcos Micropile; Load capacity; Settlement; Semi-empirical methods; Foundation.

1 INTRODUÇÃO

A correta estimativa da capacidade de carga de fundações profundas deve garantir a segurança, a estabilidade e a economia de obras geotécnicas. Diversos métodos teóricos e semiempíricos têm sido propostos ao longo dos anos para prever a capacidade de carga de estacas, com base em parâmetros obtidos por investigações de campo. No entanto, tais métodos, ainda que amplamente utilizados em projetos, estão sujeitos a incertezas significativas decorrentes da variabilidade do solo, das simplificações assumidas nos modelos e da dificuldade em representar adequadamente as condições reais de carregamento (Barros, 2012).

As provas de carga estáticas (PCE) representam o procedimento experimental mais confiável para a determinação da capacidade de carga de elementos de fundação. Executadas em campo, possibilitam a análise do comportamento carga *versus* recalque das estacas carregadas, atuando não apenas como ferramenta de controle de qualidade, mas também para a validação e calibração das metodologias. A confrontação entre os resultados obtidos por meio dessas provas e as estimativas derivadas de diferentes abordagens semiempíricas revela-se, fundamental para avaliar a precisão desses métodos (ABNT, 2022).

O presente artigo tem como objetivo comparar os resultados de capacidade de carga obtidos por meio de PCE com aqueles estimados por métodos semiempíricos, avaliando o desempenho, a representatividade em diferentes condições geotécnicas e discursando eventuais discrepâncias e suas respectivas causas. Espera-se, com isso, contribuir para a melhoria da confiabilidade dos projetos de Microestaca Arcos, por meio de uma abordagem integrada entre teoria e prática.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Investigação do Subsolo por SPT

O conhecimento prévio das condições geotécnicas é fundamental para o dimensionamento das fundações. No Brasil, a investigação mais utilizada é a sondagem de simples reconhecimento com ensaio de penetração padrão (*Standard Penetration Test* – SPT). Esse procedimento fornece parâmetros essenciais como a estratigrafia do terreno, o nível d'água e o índice de resistência à penetração do solo (Nspt), que podem ser correlacionados à capacidade de carga e deformabilidade das estacas (DAS, 2011).

2.2 Microestaca Arcos

Desenvolvida pela empresa Arcos Engenharia de Solos, a Microestaca Arcos, se destaca pela sua eficiência em mobilizar alta capacidade de carga e pela sua viabilidade executiva em ambientes de acesso restrito. Tais características a tornam relevante para intervenções de reforço de solos e estruturas nesses locais onde o acesso de equipamentos de grande porte para a execução tradicional de estacas se torna impossível (Benati, 2007). Este elemento de fundação consiste na cravação de tubos de aço através de um micro bate-estacas elétrico (Engenharia, 2025). A Figura 1 mostra um exemplo da aplicação.

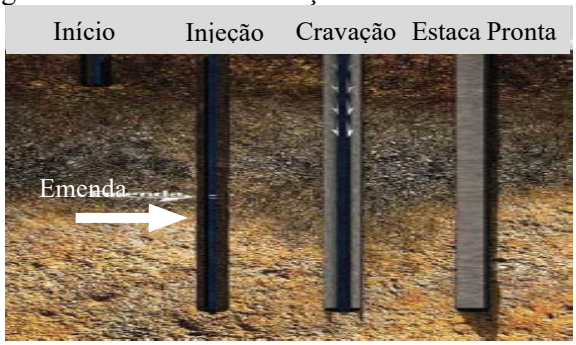
Figura 1 – Micro bate-estaca Arcos.



Fonte: Arcos Engenharia, 2025.

Após o elemento alcançar sua cota de assentamento, procede-se a injeção de uma nata de cimento no seu interior conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Detalhe de execução da microestaca-arcos



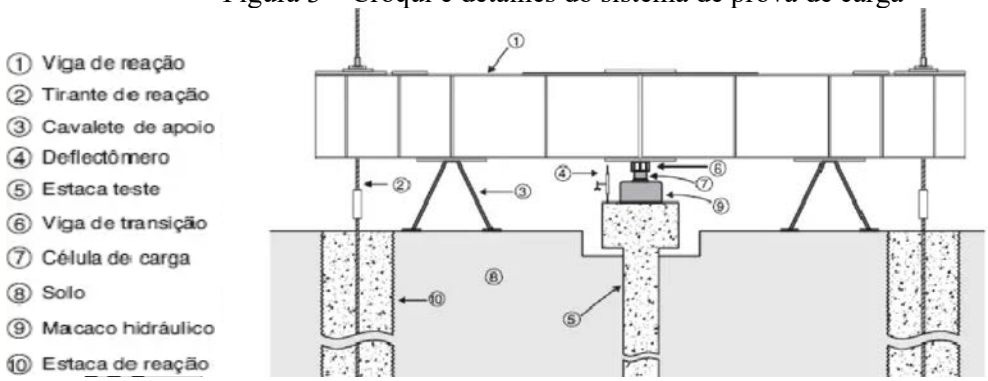
Fonte: Adaptado de Arcos Engenharia, 2025.

A soma das contribuições das paredes do tubo ao cimento, aumentam a resistência estrutural da estaca possibilitando-a alcançar até 35 tf de capacidade de carga com diâmetro de 150mm, desde que a capacidade de carga do solo comporte também a resistência oferecida pela microestaca. Esse tipo de solução permite à estaca ser implementada e utilizada como reforço estrutural mesmo na presença de lençol freático elevado já que o tubo de cravação não é recuperado e se torna parte integrante da estaca. (Engenharia, 2025)

2.3 Prova de Carga Estática em Fundações Profundas

Conforme NBR 6122:2022, esse ensaio determina a relação carga *versus* deslocamento de uma estaca, possibilitando a avaliação direta do seu desempenho no solo, o detalhamento do seu sistema de montagem é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Croqui e detalhes do sistema de prova de carga



Fonte: Albuquerque, Garcia (2020)

Consiste na aplicação de cargas progressivas sobre a cabeça da estaca, com macacos hidráulicos, utilizando sistemas de reação como vigas metálicas, blocos de concreto ou estacas de ancoragem. São medidos os deslocamentos verticais em função da carga, o que permite analisar o comportamento da estaca sob diferentes condições de carregamento. (Albuquerque; Garcia, 2020)

2.4 Metodologia de Previsão de |Capacidade de Carga

Podem ser classificados em teóricos, empíricos e semiempíricos. Os primeiros baseiam-se na mecânica dos solos e em formulações matemáticas; os empíricos relacionam ensaios in situ, como SPT e CPT (Cone Penetration Test), ao comportamento real das estacas; e os semiempíricos combinam modelos analíticos com resultados experimentais, sendo amplamente utilizados pela praticidade (Lobo, 2005).

Segundo Velloso e Lopes, (2010) os métodos semiempíricos são desenvolvidos a partir dos resultados de PCE obtidas em campo e é o que mais se aproxima do resultado da capacidade de carga do solo, garantindo maior assertividade no dimensionamento das fundações. No Brasil, destacam-se os métodos de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996) empregados em projetos de fundações profundas.

2.5 Metodologia de Aoki e Velloso Adaptado por Monteiro (1997)

O método de Aoki e Velloso (1975) foi originalmente desenvolvido com base em dados de ensaios CPT e correlacionando a resistência de ponta e o atrito lateral da estaca. Como o SPT é mais utilizado no Brasil, foram feitas adaptações de CPT para o SPT, permitindo estimar a resistência de ponta e o atrito lateral a partir do número de golpes do SPT ajustado por coeficientes relacionados ao tipo de solo; Monteiro (1997) ainda propôs uma adaptação do método, ajustando os coeficientes para aproximar às características dos solos brasileiros (Monteiro, 1997).

2.6 Metodologia de Décourt e Quaresma (1978)

Décourt e Quaresma (1978) propõe estimar a capacidade de carga de estacas a partir de informações obtidas apenas com SPT. Sua metodologia se baseia na análise do solo em camadas, relacionando o número de golpes do SPT com a resistência de ponta e o atrito lateral ao longo do fuste da estaca. Utiliza de coeficientes empiricos tabelados (α e β) que dependem do tipo de estaca e da classificação do solo.

2.7 Metodologia de Teixeira (1996)

Teixeira (1996) utiliza resultados do ensaio SPT para estimar a capacidade de carga de estacas, considerando variações relacionadas ao tipo de solo e às características da estaca. Para a resistência de ponta, o cálculo é feito a partir da média dos números de golpes próximos à base da estaca, enquanto o atrito lateral é estimado com base na média dos golpes ao longo do fuste. Este método limita o indice Nspt máximo com 40 golpes, considerando uma resistência menor do solo quando comparado ao método de Décourt e Quaresma (1978), que considera Nspt < 50.

3 METODOLOGIA

Diversas variações desses métodos já foram propostas, Pereira et al. (2020) apresentam um estudo avaliando o desempenho dos métodos semiempíricos baseados nos ensaios SPT para a previsão de capacidade de carga geotécnica a partir dos métodos amplamente difundidos na prática da Engenharia de Fundações brasileira (Pereira et al, 2020), que são eles: Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996). Nesse estudo, foram avaliadas a capacidade de carga de 10 estacas pré-moldadas em concreto cravadas em solo argilo arenoso na região de Uberlândia-MG. Posteriormente foram submetidas ao ensaio de carregamento dinâmico e comparados os seus resultados de campo à capacidade de carga estimada pelos métodos semiempíricos.

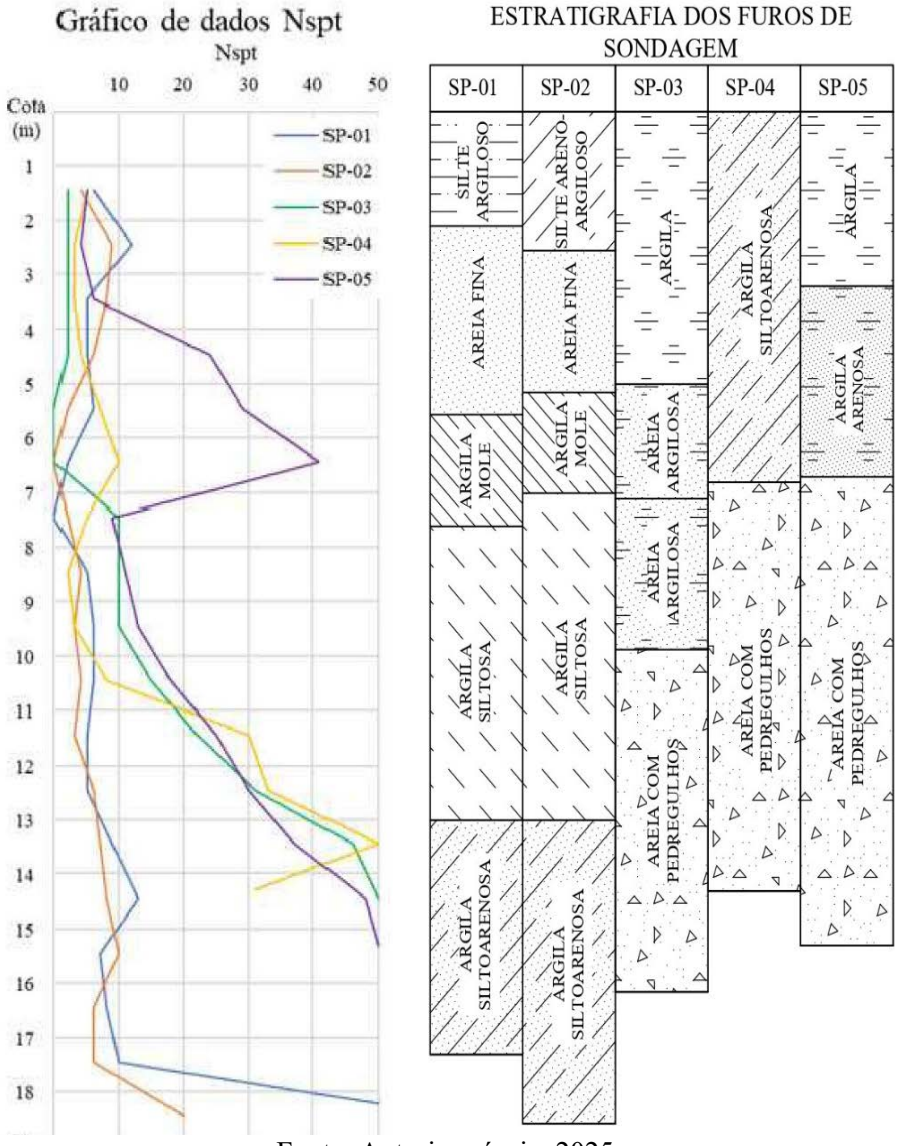
O método de Teixeira (1996) para esse estudo foi avaliado em sua formulação original. Já o método de Aoki e Velloso (1975), foi estudado conforme modificação proposta por Aoki e Cintra (2010). O método de Décourt e Quaresma (1978), foi adotado a metodologia consolidada por Décourt (1996) adaptando os fatores de estimativa de capacidade de carga. Os autores avaliaram separadamente as resistências laterais mobilizadas no fuste da estaca, as resistências de ponta, a capacidade de carga geotécnica e o desempenho dos métodos semiempíricos para a previsão da capacidade de carga das estacas.

Foi concluído que ambas as metodologias estudadas apresentaram resultados relativamente consistentes e a metodologia proposta por Aoki e Velloso (1975, 2010) apresentou o melhor desempenho, seguida de Décourt e Quaresma (1978, 1996) e Teixeira (1996), respectivamente.

Aplicação dos Métodos Semiempíricos

Foram considerados para estudo 5 furos de sondagem à percussão (SPT) para avaliar o perfil estratigráfico do solo em 5 obras diferentes e, para cada furo descrito, a identificação do furo refere-se também à sua respectiva obra. O Gráfico 1 apresenta de forma integrada a estratigrafia do solo e os valores do índice NSPT obtidos nos furos de sondagem SP-01, SP-02, SP-03, SP-04 e SP-05. A organização conjunta desses dados permite uma análise mais detalhada dos dados obtidos e da representatividade das informações geotécnicas consideradas neste trabalho.

Gráfico 1 – Dados Nspt dos furos.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Para o furo 01 e 02, observa-se um solo Argilo Siltoarenoso para as cotas que foram assentadas as estacas. Já para os furos 03, 04 e 05, o solo presente na ponta da estaca é uma Areia com Pedregulhos. O comprimento das estacas está na Tabela 1.

Tabela 1 – Comprimento das estacas.

Furo	SP-01	SP-02	SP-03	SP-04	SP-05
Comprimento	18,35m	19,90m	12,60m	13,50m	10,95m
Diâmetro	150mm	150mm	150mm	150mm	150mm

Fonte: Autoria própria, 2025.

Por fim, foi realizado o ensaio de prova de carga estática (PCE) para avaliar o comportamento da curva carga *versus* recalque das estacas. Para determinação da Carga Admissível, foi adotado um fator de segurança (FS=1,6) para ponderar a carga de Ruptura encontrada.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Análise da Previsão de Carga dos Métodos Semiempíricos

Com a determinação da carga de referência, comparou-se os resultados obtidos na previsão de carga proposta pelos métodos de Aoki e Velloso adaptado por Monteiro (1997), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996), disponíveis na Tabela 2 abaixo.

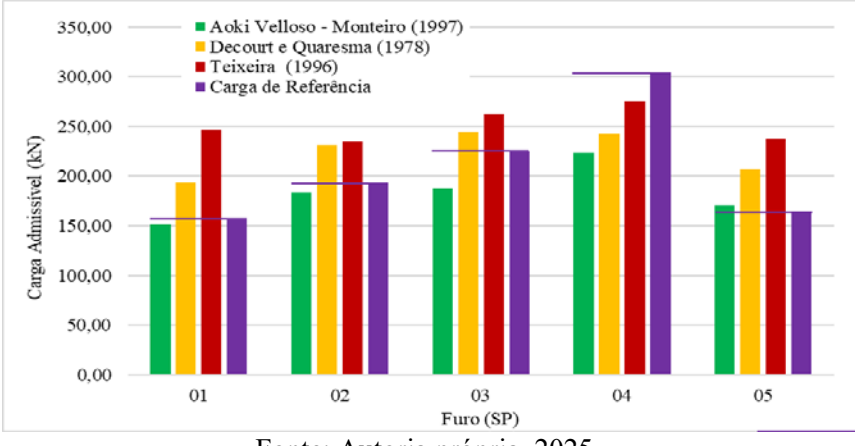
Tabela 2 -Capacidade de carga por furo

Furo	Aoki Velloso – Monteiro (1997)	Décourt e Quaresma (1978)	Teixeira (1996)	Carga de referência
SP-01	151,72 kN	193,22 kN	246,36 kN	156,25 kN
SP-02	183,20 kN	230,81 kN	234,12 kN	191,88 kN
SP-03	187,42 kN	244,79 kN	262,93 kN	225,00 kN
SP-04	223,55 kN	241,91 kN	275,85 kN	304,38 kN
SP-05	170,61 kN	207,52 kN	236,64 kN	162,50 kN

Fonte: Autoria própria, 2025.

A metodologia de Aoki e Velloso adaptado por Monteiro (1997), apresenta resultados mais conservadores. A adaptação de Monteiro (1997) apresentou consistentemente os menores valores de previsão de capacidade de carga entre os métodos semiempíricos avaliados. O método de Décourt e Quaresma (1978), apresenta valores de capacidade de carga maiores que Aoki e Velloso adaptado por Monteiro (1997) por considerar a resistência lateral da estaca em todo o fuste, desconsiderando o tipo de solo por camada, mas não apresentou os maiores valores para previsão de carga. Já o método de Teixeira (1996), apresentou os maiores valores de carga e foi o que mais se distanciou da capacidade de carga do solo. O Gráfico 2 apresenta a comparação entre os resultados obtidos entre os métodos e a PCE.

Gráfico 2 – Previsão de capacidade de carga dos métodos e carga admissível.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Observa-se a proximidade entre os resultados obtidos pelo método de Aoki e Velloso adaptado por Monteiro (1997) com os resultados obtidos pela PCE e fica evidente também a diferença entre as metodologias proposta por Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996), que apresentaram as previsões de capacidade de carga superior à carga admissível. A proposta de Teixeira (1996), nesse caso, apresentou os valores mais distantes da PCE que também foram os maiores valores de previsão de capacidade de carga, superestimando o desempenho do solo.

5 CONCLUSÃO

Para a previsão de carga, apesar de ambos os métodos apresentarem resultados relativamente próximos, os métodos de Decourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996) apresentaram para os furos SP-01, SP-02, SP-03 e SP-05 resultado superior à carga de referência. Já o método de Aoki e Velloso adaptado por Monteiro (1997) foi o que mais se aproximou dos resultados da PCE para a fundação proposta, para os furos SP-01, SP-02 e SP-05 quando dividindo o valor previsto pelo método pelo valor da capacidade de carga do solo, apresenta nessa relação uma variação inferior a 5% do resultado obtido pela PCE. De todos os métodos avaliados, Teixeira (1996) foi o que ficou mais distante dos resultados reais com exceção ao furo SP-05 que ultrapassou a carga calculada pelos demais métodos.

No caso específico desse estudo realizado, conclui-se então, que apesar da consistência dos resultados obtidos e da difusão e dos métodos semiempíricos, a realização de provas de carga estática é essencial para melhor calibração dos métodos. A correlação dos resultados obtidos, adaptado à curva de carga *versus* deslocamento proposta pelo ensaio, agrega maior eficiência e segurança no dimensionamento das estacas, extraindo assim, o melhor resultado para esse tipo de fundação profunda.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Arcos Engenharia pelo apoio e incentivo à pesquisa e aproveita o ensejo para agradecer em especial ao professor Leandro Neves Duarte e ao corpo docente de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del rei – Campus Alto Paraopeba.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, Paulo J. R.; GARCIA, J, R. **Engenharia de Fundações**. Rio de Janeiro, RJ: Grupo GEN, 2020.

AOKI, N., VELLOSO, D. A. 1975. **An approximate method to estimate the bearing capacity of piles**. In: PAN AMERICAN CSMFE, 5., 1975, Buenos Aires. Proceeding. Buenos Aires, v. 1.

ARCOS ENGENHARIA DE SOLOS (Minas Gerais). **Arcos Microestaca**. 2024. Disponível em: https://arcos.eng.br/o-que-fazemos/microestaca/. Acesso em: 25 mar. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. 3 ed. Rio de Janeiro, 2022. 108 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Solo- Sondagens de simples reconhecimento com SPT- Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16903**: Solo - Prova de carga estática em fundação. 1 ed. Rio de Janeiro, 2020. 11 p.

BENATI, Juliano Bertelli. **Metodologia de execução e determinação da capacidade de carga de estacas de pequeno diâmetro cravadas e injetadas**. 2007. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

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

DAS, Braja M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. São Paulo: Cip, 2011.

DÉCOURT, L., QUARESMA, A. R. (1978). **Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT**. In: CBMSEF, 6. Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro, v. 1.

LAPROVITERA, H. (1988). Reavaliação de método semiempírico de previsão da capacidade de carga de estacas a partir do Banco de Dados. Dissertação (Mestrado) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

LOBO, Bianca de Oliveira. **Método de previsão de capacidade de carga de estacas: aplicação dos conceitos de energia do ensaio SPT**. 2005. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LOPES, F. R.; LAPROVITERA, H.; OLIVEIRA, H. M.; BENEGAS, E. Q. (1993). **Utilização de um banco de dados para previsão do comportamento de estacas**. Anais, Simpósio Geotécnico Comemorativo dos 30 anos da COPPE (COPPEGEO), Rio de Janeiro, pp. 281-294.

MONTEIRO, P. F. (1997). **Capacidade de carga de estacas – método Aoki Velloso**, Relatório interno de Estacas Franki Ltda.

PEREIRA, Armando Belato; PORTO, Thiago Bomjardim; GOMES, Romero César; SANTOS, Raphael Lúcio Reis; RABELO, João Marcos Guimarães. Análise de desempenho de métodos semiempíricos de previsão de capacidade de carga geotécnica aplicados a estacas pré-moldadas de concreto assentes em argila arenosa. Brazilian Journal Of Development, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 5948-5976, 2020. Brazilian Journal of Development. http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n2-049.

TEIXEIRA, A. H. (1996). **Análise, Projeto e execução de fundações**. In: SEFE, 3., São Paulo. Anais. São Paulo, v. 1.

VELLOSO, D.A., LOPES, F.R. (2010). **Fundações**. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.