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/COBRAMSEG2026.5/27

Avaliação da Influência do Diâmetro na Capacidade de Carga de Estacas Profundas por Método Semiempírico com base no SPT

Lucas Oliveira de Moraes
Discente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Lucasmoraes@ufpr.br

Murillo Vinícius Bednarczuk
Discente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, murillobednarczuk@ufpr.br

Nicolas Ragasson Ikonomou
Discente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, nicolas.ikonomou@ufpr.br

Vitória Becker de Toledo Piza
Discente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vitoria.becker@ufpr.br

Roberta Bomfim Boszczowski
Docente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, roberta.bomfim@ufpr.br

RESUMO: A estimativa da capacidade de carga de estacas profundas constitui etapa fundamental no dimensionamento de fundações e, na prática da engenharia geotécnica brasileira, é frequentemente realizada por meio de métodos semiempíricos baseados em resultados do ensaio de simples reconhecimento (SPT). Entre esses procedimentos destaca-se o método proposto por Aoki e Velloso, amplamente empregado para a estimativa das parcelas de resistência de ponta e resistência lateral. Nesse contexto, este trabalho apresenta um estudo de caso voltado à avaliação da influência do diâmetro na capacidade de carga de estacas profundas estimada por esse método. A análise foi conduzida a partir de dados de sondagem SPT obtidos em um perfil de solo predominantemente siltoso, considerando a utilização de estacas metálicas cravadas. As equações do método foram aplicadas ao longo do perfil investigado, mantendo-se constantes as condições geotécnicas e variando-se apenas o diâmetro das estacas, o que permitiu analisar de forma direta o efeito da geometria nas parcelas resistentes e na capacidade de carga total estimada. Os resultados evidenciam que o aumento do diâmetro promove crescimento não linear da capacidade resistente, ao mesmo tempo em que altera o aproveitamento da seção da estaca quando analisado sob a perspectiva de eficiência geométrica. Dessa forma, o estudo contribui para a compreensão do método às variações dimensionais das estacas e fornece subsídios para sua aplicação e interpretação no dimensionamento de fundações profundas.

PALAVRAS-CHAVE: Capacidade de carga de estacas, Método Aoki-Velloso, Fundações profundas, Ensaio SPT, Diâmetro de estaca, Eficiência de estacas.

ABSTRACT: The estimation of the bearing capacity of deep foundations is a fundamental step in foundation design and, in Brazilian geotechnical practice, is commonly performed using semi-empirical methods based on Standard Penetration Test (SPT) results. Among these approaches, the method proposed by Aoki and Velloso is widely applied to estimate both tip resistance and shaft resistance of piles. In this context, this study presents a case study aimed at evaluating the influence of pile diameter on the estimated bearing capacity obtained through this method. The analysis was carried out using SPT data from a predominantly silty soil profile, considering driven steel piles. The method equations were applied along the investigated profile while maintaining the same geotechnical conditions and varying only the pile diameter, allowing a direct assessment of the geometric influence on the resistant components and on the total bearing capacity. The results indicate that increasing pile diameter leads to a non-linear growth in bearing capacity and also affects the utilization of the pile cross-section when evaluated in terms of geometric efficiency. The study therefore contributes to

understanding Aoki-Velloso method to dimensional variations and provides support for its interpretation in practical deep foundation design.

KEYWORDS: Pile bearing capacity, Aoki-Velloso method, Deep foundations, Standard Penetration Test, Pile diameter, Pile efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A estimativa da capacidade de carga de estacas constitui um dos aspectos centrais do dimensionamento de fundações profundas, sendo diretamente relacionada à segurança e ao desempenho das estruturas. Do ponto de vista da mecânica dos solos, a capacidade resistente de uma estaca resulta da interação entre o elemento estrutural e o maciço de solo, sendo usualmente representada pela contribuição conjunta da resistência mobilizada na base da estaca e do atrito lateral ao longo do fuste. Esses mecanismos de transferência de carga foram sistematizados nos fundamentos clássicos da engenharia geotécnica apresentados por Karl Terzaghi e Ralph B. Peck (1967), sendo posteriormente aprofundados em estudos específicos sobre comportamento de estacas e capacidade de carga, como os desenvolvidos por Meyerhof (1976), Vesic (1977) e Tomlinson (1980).

Na prática da engenharia geotécnica brasileira, a estimativa da capacidade de carga de estacas é frequentemente realizada por meio de métodos semiempíricos baseados em resultados de ensaios de campo, particularmente o ensaio de penetração padrão (SPT), amplamente utilizado na investigação geotécnica devido à sua simplicidade e à extensa base de dados disponível. A partir dessas correlações foram desenvolvidas diversas formulações adaptadas às condições geotécnicas brasileiras, entre as quais se destacam os métodos propostos por Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978), Teixeira (1996) e Antunes e Cabral (1996), amplamente empregados no dimensionamento de fundações profundas em projetos de engenharia no país.

Além das propriedades geotécnicas do solo, fatores geométricos exercem influência significativa nos mecanismos de transferência de carga entre estaca e maciço. Entre esses fatores destacam-se a profundidade de implantação e o diâmetro da estaca, que afetam simultaneamente a área da base responsável pela mobilização da resistência de ponta e o perímetro de contato associado ao atrito lateral. Dessa forma, variações no diâmetro podem produzir respostas não lineares na capacidade de carga estimada, dependendo do mecanismo predominante de transferência de carga e das características do perfil de solo. Nesse contexto, torna-se relevante avaliar a sensibilidade das formulações semiempíricas à variação da geometria da estaca, permitindo compreender como diferentes diâmetros influenciam o desempenho geotécnico de fundações profundas estimadas a partir de resultados de SPT.

2 METODOLOGIA

Este estudo baseia-se em dados provenientes de uma sondagem à percussão (SPT) realizada em 2020 no município de Colombo, Paraná. O perfil investigado apresenta solos residuais derivados de rochas gnáissico-migmatíticas, típicos do embasamento cristalino da região. A sondagem indicou a ocorrência de camadas predominantemente siltosas ao longo do perfil, conforme ilustrado na Figura 1, com impenetrável atingido à profundidade de aproximadamente 5,45 m, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6484:2020.

Com base na interpretação do boletim de sondagem, adotou-se a classificação de silte argilo-arenoso nas camadas mais superficiais e silte argiloso nas camadas mais profundas. Os valores do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) obtidos ao longo do perfil foram utilizados como parâmetro de entrada para a estimativa da capacidade de carga das estacas.

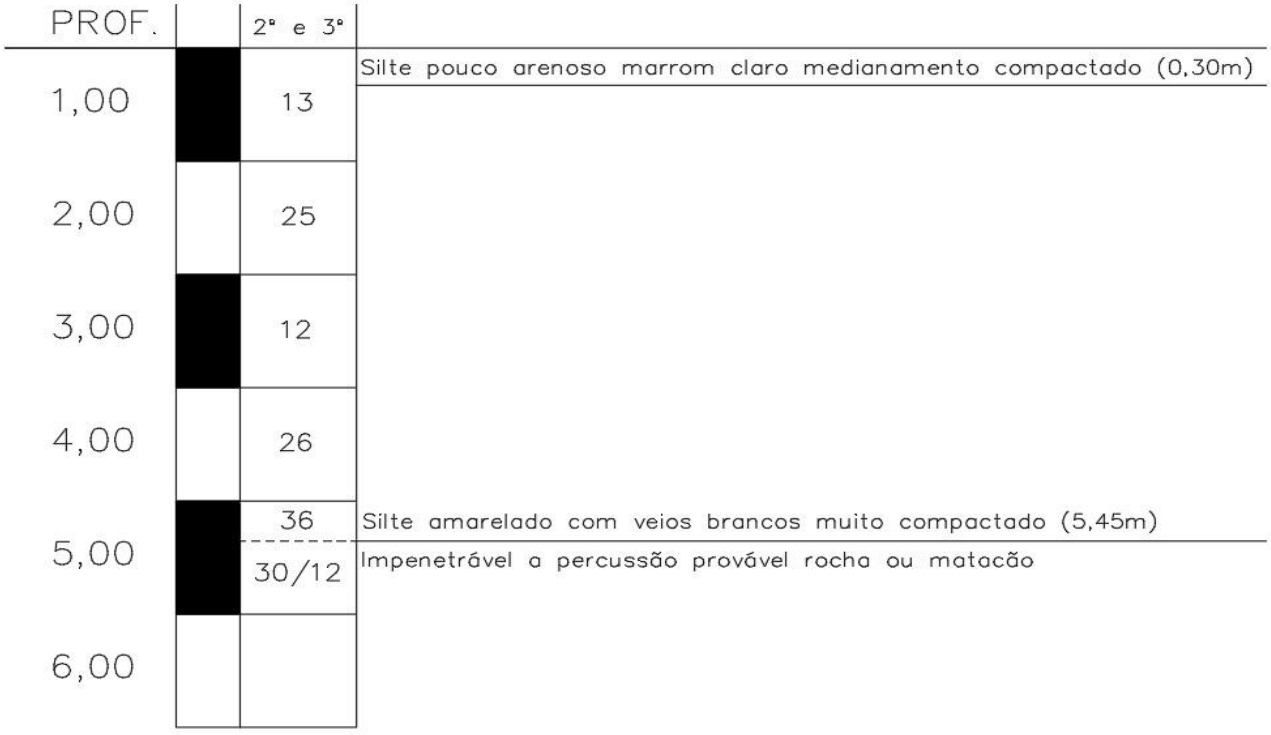


Figura 1. Interpretação da sondagem realizada.

A estimativa da capacidade de carga das estacas foi realizada por meio do método semiempírico proposto por Aoki e Velloso (1975), amplamente utilizado na engenharia geotécnica brasileira para dimensionamento de fundações profundas a partir de resultados de SPT. Nesse método, a capacidade resistente da estaca é obtida pela soma das parcelas de resistência de ponta e resistência lateral mobilizadas ao longo do fuste.

Com base nos dados da sondagem, foi realizada uma análise paramétrica variando o diâmetro das estacas e mantendo constantes as condições estratigráficas do perfil. Foram considerados cinco diâmetros representativos: 25 cm, 30 cm, 40 cm, 60 cm e 75 cm, permitindo avaliar a influência da geometria da estaca na capacidade de carga estimada. A partir dos valores obtidos para cada cenário analisado, foi também calculado um indicador de eficiência geométrica da seção, definido pela razão entre a capacidade de carga estimada da estaca e a área de sua seção transversal. Esse parâmetro foi utilizado como critério comparativo entre os diferentes diâmetros, permitindo avaliar o aproveitamento relativo da seção da estaca para uma mesma condição geotécnica.

2.1 Método de Aoki-Velloso

A estimativa da capacidade de carga das estacas foi realizada utilizando o método semiempírico proposto por Aoki e Velloso (1975), amplamente empregado na prática geotécnica brasileira para dimensionamento de fundações profundas a partir de resultados de SPT. Nesse método, a resistência última da estaca é obtida pela soma das parcelas de resistência mobilizadas na base e ao longo do fuste.

$$R_T = R_P + R_L \tag{1}$$

onde $R_T$representa a resistência total da estaca, R_P a resistência de ponta e R_L a resistência lateral.

A resistência de ponta é calculada multiplicando-se a resistência unitária de ponta r_p pela área da base da estaca A_p:

$$R_P = r_p \cdot A_p \tag{2}$$

A resistência unitária de ponta r_p pode ser estimada a partir da resistência do cone q_c dividida pelo coeficiente F_1, que considera o tipo de estaca e o método executivo. Quando não há ensaio CPT disponível, o valor de q_c pode ser estimado a partir do índice de resistência à penetração N_{SPT} utilizando o coeficiente empírico K, associado ao tipo de solo:

$$q_C = K \cdot N_{SPT} \tag{3}$$

Substituindo essa relação, a resistência de ponta pode ser escrita como:

$$R_P = \frac{K \cdot N_{SPT}}{F_1} \cdot A_p \tag{4}$$

A resistência lateral é obtida pela soma das contribuições ao longo do comprimento da estaca, considerando o perímetro da estaca U e a espessura de cada camada atravessada ΔL:

$$R_L = U\sum(r_L \cdot \Delta L) \tag{5}$$

A resistência lateral unitária r_L é estimada a partir da relação entre o atrito lateral do cone e o coeficiente de correção F_2. Utilizando a correlação entre CPT e SPT proposta no método, essa parcela pode ser expressa como:

$$r_L = \frac{\alpha \cdot K \cdot N_{SPT}}{F_2} \tag{6}$$

em que α e K são coeficientes dependentes do tipo de solo, enquanto F_1 e F_2 dependem do tipo de estaca e do processo executivo.

No presente estudo, as equações do método proposto por Aoki e Velloso foram aplicadas utilizando os valores de N_{SPT} obtidos na sondagem analisada e a utilização de estacas metálicas, essas características do sistema solo–estaca foram utilizadas para a definição dos coeficientes empíricos do método, em especial os parâmetros K e α, associados ao tipo de solo, e F_1 e F_2, relacionados ao tipo de estaca e ao processo executivo, permitindo a estimativa das parcelas de resistência de ponta e resistência lateral.

3 RESULTADOS

A Tabela 1 e a Figura 2 apresentam os valores de capacidade de carga estimados pelo método de Aoki e Velloso (1975) para diferentes profundidades de implantação da estaca e para os diâmetros analisados.

Tabela 1. Capacidade de carga estimada para diferentes diâmetros de estaca.

Profundidade (m)	Φ = 25 cm (tf)	Φ = 30 cm (tf)	Φ = 40 cm (tf)	Φ = 60 cm (tf)	Φ = 75 cm (tf)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	8,73	12,16	20,68	44,42	68,10
2,00	14,22	19,25	31,49	64,72	97,29
3,00	18,14	24,51	39,99	81,89	122,91
4,00	23,58	31,50	50,54	101,44	150,82
5,00	31,67	41,99	66,60	131,75	194,55
6,00	40,07	53,12	84,24	166,59	245,96

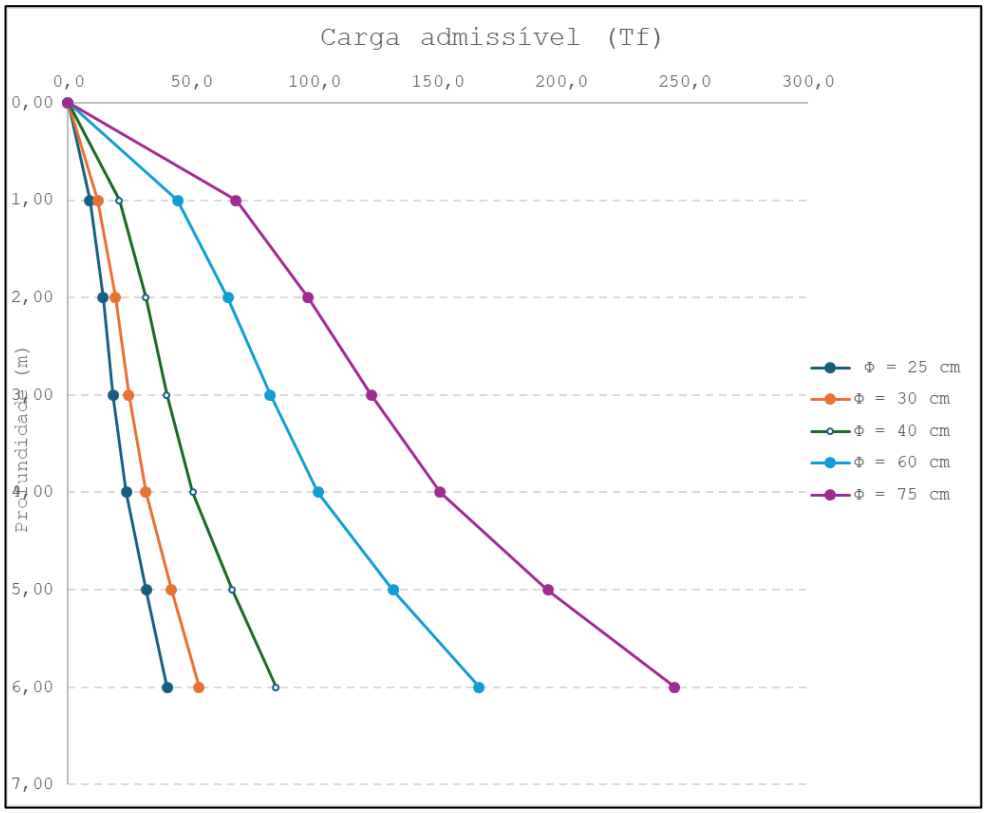


Figura 2. Resultados das análises dos diferentes diâmetros da estaca.

A partir dos resultados obtidos observa-se que o aumento do diâmetro resulta em acréscimos progressivos na capacidade de carga estimada. Esse comportamento está diretamente relacionado à forma como os termos geométricos aparecem nas equações do método. A resistência lateral mobilizada ao longo do fuste é proporcional ao perímetro da estaca, enquanto a resistência de ponta depende da área da base. Assim, o perímetro cresce linearmente com o diâmetro, enquanto a área de ponta apresenta crescimento quadrático.

Essa diferença de ordem geométrica implica que o aumento do diâmetro tende a amplificar de forma mais significativa a parcela de resistência de ponta em relação à contribuição do atrito lateral. Como consequência, a capacidade total da estaca apresenta crescimento não linear à medida que o diâmetro aumenta. No perfil analisado, caracterizado por solos siltosos com aumento progressivo do índice N_{SPT} em profundidade, esse efeito torna-se ainda mais pronunciado nas maiores profundidades, onde a resistência mobilizada na base da estaca passa a representar parcela significativa da capacidade total.

Além da análise da carga total, avaliou-se também a relação entre a carga mobilizada e a área da seção transversal da estaca, adotada neste estudo como indicador de eficiência geométrica da seção. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para a profundidade de 6 m.

Tabela 2. Eficiência em 6,00 metros de profundidade.

Diâmetro (cm)	Capacidade (tf)	Área (m²)	Eficiência (Tf/m²)
25	40,07	0,049	816,30
30	53,12	0,071	751,49
40	84,12	0,126	669,41
60	166,59	0,283	589,19
75	245,96	0,442	556,74

Observa-se que, embora estacas de maior diâmetro apresentem maiores capacidades de carga absolutas, o valor da carga mobilizada por unidade de área diminui com o aumento da seção transversal. Esse comportamento indica que o crescimento da capacidade não acompanha proporcionalmente o aumento da área da estaca. Do ponto de vista do dimensionamento, esse resultado evidencia que o aumento do diâmetro constitui uma estratégia eficaz para elevar a capacidade resistente da fundação, porém com redução progressiva da eficiência geométrica da seção. Em termos práticos, isso sugere que a escolha do diâmetro deve considerar não apenas a capacidade de carga requerida, mas também o equilíbrio entre ganho de resistência e consumo de material.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos permitiram avaliar a influência do diâmetro na estimativa da capacidade de carga de estacas profundas a partir da aplicação do método semiempírico proposto por Aoki e Velloso, utilizando como base os valores de N_{SPT} obtidos na sondagem analisada. Observou-se que o aumento do diâmetro promove elevação significativa da capacidade resistente estimada, evidenciando a elevada sensibilidade desseparâmetro geométrico no dimensionamento de fundações profundas. A análise indicou que o crescimento da capacidade de carga não ocorre de forma proporcional ao aumento da seção transversal da estaca. Esse comportamento está associado às relações geométricas presentes nas formulações do método, nas quais a resistência lateral está vinculada ao perímetro da estaca, enquanto a resistência de ponta depende da área da base, que cresce de maneira quadrática com o diâmetro. Como consequência, o aumento do diâmetro tende a intensificar principalmente a contribuição da resistência de ponta para a capacidade total da estaca.

Adicionalmente, a avaliação da relação entre a carga mobilizada e a área da seção transversal evidenciou uma redução progressiva desse indicador com o aumento do diâmetro, indicando que estacas de maior seção apresentam menor aproveitamento relativo da área quando comparadas a estacas mais esbeltas. Embora estacas de maior diâmetro apresentem capacidades de carga absolutas superiores, o incremento de resistência não acompanha proporcionalmente o crescimento da seção. Dessa forma, os resultados obtidos ressaltam a importância de considerar a influência da geometria da estaca na estimativa da capacidade de carga em métodos semiempíricos baseados em ensaios de campo. A definição do diâmetro deve, portanto, ser conduzida de forma criteriosa, considerando não apenas a capacidade resistente requerida, mas também o comportamento geotécnico do perfil investigado e os aspectos de eficiência e viabilidade técnica do projeto de fundações profundas.

5 AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao programa de extensão Grupo de Estudos em Geotecnia (GEGEO) e ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo suporte acadêmico e pelo ambiente que contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antunes, W.R., Cabral, D.A. (1996) *Capacidade de carga de estacas escavadas a partir de ensaios SPT*. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 3, São Paulo. Anais... ABMS.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). *NBR 6484. Sondagens de simples reconhecimento com SPT* – Método de ensaio. Rio de Janeiro.

Aoki, N., Velloso, D.A. (1975) *An approximate method to estimate the bearing capacity of piles*. In: 5th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires. Proceedings… v.1, p.367–376.

Décourt, L., Quaresma, A.R. (1978) *Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT*. In: 6º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro. Anais... ABMS.

Meyerhof, G.G. (1976) *Bearing capacity and settlement of pile foundations*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), p.195–228.

Teixeira, A.H. (1996) *Formulação semiempírica para a capacidade de carga de estacas*. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 3, São Paulo. Anais... ABMS.

Terzaghi, K., Peck, R.B. (1967) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.

Tomlinson, M.J. (1980) *Foundation Design and Construction*. 4th ed., Pitman Publishing, London.

Vesic, A.S. (1977) *Design of pile foundations*. In: National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board, Washington, D.C.