



Análise do Dimensionamento Geotécnico das Fundações Realizadas para um Galpão em Belém-PA

Arthur Peixoto Marques
Engenheiro Civil, UNIP/INBEC, São Paulo, Brasil, arthurpmarques@gmail.com

Marcos Fábio Porto de Aguiar
Engenheiro Civil, IFCE, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br

Fernando Feitosa Monteiro
Engenheiro Civil, Unichristus, Fortaleza, Brasil, fernando.monteiro@unichristus.edu.br

Luiz Kauã Grangeiro Barata
Graduando, IFCE, Fortaleza, Brasil, luiz.kaua.grangeiro@gmail.com

Giliane Castro Alves do Prado
Graduando, IFCE, Fortaleza, Brasil, giliane.castro@outlook.com

Marina Albuquerque Porto de Aguiar
Graduando, IFCE, Fortaleza, Brasil, marina.aporto@gmail.com

RESUMO: O objetivo deste estudo é avaliar a aplicação de métodos semiempíricos no cálculo de fundações profundas para um galpão em Belém-PA e verificar a confiabilidade do projeto executado. Foram calculados valores de capacidade de carga pelo Método Aoki-Velloso (1975), com base no relatório de sondagem a percussão, a fim de compará-los com a carga de trabalho de cada pilar e, a partir dessa análise, constatou-se a necessidade de profundidades mínimas variáveis para as estacas. Mesmo diante de um dimensionamento unificado em projeto, houve a necessidade de arrasamento em grande parte das estacas por atingirem a nega precocemente, elevando o custo da obra diante de um excedente de 20,70% do quantitativo de estacas necessárias. Portanto, o tratamento individualizado dos elementos de fundação, o uso racional dos métodos semiempíricos e de dados de sondagem conferem ao empreendimento uma maior viabilidade financeira.

PALAVRAS-CHAVE: Métodos semiempíricos, Fundações profundas, Estacas cravadas.

ABSTRACT: The purpose of this study is to evaluate the application of semi-empirical methods in the calculation of foundations for a warehouse in Belém-PA and to verify the reliability of the project in question. Load-bearing capacity values estimated by the Aoki-Velloso Method (1975) were compared with those referring to the sizing of the executed project, and results of percussion probing. The estimated workload on each pillar revealed the need for varying minimum driving depths. However, due to a unified dimensioning approach in the construction, a significant portion of the stakes had to be trimmed because they reached the refusal prematurely, raising the cost of the work in view of a increase of 20.70% of the required pile quantity. Therefore, the individualized treatment of foundation elements, the rational use of semi-empirical methods and survey data give the enterprise greater financial viability.

KEYWORDS: Semi-empirical methods, Deep foundations, Driven piles.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





1 Introdução

O correto dimensionamento do elemento de fundação é primordial tanto do ponto de vista técnico quanto financeiro. As fundações desempenham uma função fundamental ao receber e distribuir as cargas provenientes da superestrutura para o maciço de solo. Portanto, é essencial assegurar a viabilidade financeira concomitantemente à busca de um desempenho eficiente das fundações, por meio de um dimensionamento adequado. Isso requer informações sobre as características do subsolo local e sobre as demandas de carga provenientes da superestrutura. Dessa forma, é possível tomar decisões com embasamento técnico e encontrar um equilíbrio entre a eficácia estrutural e a eficiência econômica.

Embora haja um avanço contínuo na engenharia geotécnica, especialmente nas últimas décadas, no que diz respeito ao conhecimento do solo e às novas técnicas de controle e execução de fundações, ainda é possível encontrar casos de edificações com superdimensionamento ou subdimensionamento devido a falhas que podem ocorrer ao longo do processo de planejamento e execução. No mercado brasileiro, existem profissionais especializados capazes de atuar desde a etapa de projeto até a execução, porém é fundamental compreender e identificar as possíveis falhas no processo, a fim de fornecer uma base sólida para futuras obras, evitando gastos excessivos para o empreendimento ou despesas adicionais com manutenção corretiva posteriormente. Posto isso, torna-se relevante analisar obras existentes por meio de retroanálise, identificando os possíveis equívocos cometidos e buscando a melhor solução para o caso.

Neste artigo, foi realizada uma análise de dados de uma obra executada para um galpão, na cidade de Belém, no estado do Pará, cuja finalidade é de estocagem de suprimentos e equipamentos de manutenção, com base em informações do projeto e execução do empreendimento, bem como dados coletadas em campo. Posteriormente, foi feita uma avaliação comparativa entre o método executivo previsto em projeto e os valores calculados por meio do dimensionamento de fundações profundas com embasamento em revisão bibliográfica.

2 Contextualização Teórica

2.1 Investigação Geotécnica

Conforme Rebello (2008), o objetivo fundamental de toda sondagem é fornecer informações sobre as condições naturais do solo, buscando identificar seu tipo, suas particularidades físicas e, principalmente, sua resistência. Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), o escopo de uma investigação geotécnica tem relação direta com as características do meio físico, a complexidade da obra e os riscos envolvidos. A combinação desses três fatores determina a estratégia adotada para o projeto.

Ainda conforme Schnaid e Odebrecht (2012), a elaboração do planejamento para uma campanha de investigação geotécnica deve ser concebida por um engenheiro geotécnico experiente capaz de ponderar os custos e demais informações do local de implantação. Esse profissional deve considerar cuidadosamente as características da obra em relação às complexidades geológicas e geotécnicas do terreno local. Os autores também destacam que, em geral, a execução de ensaios em campo independem da natureza do projeto geotécnico adotado. Os resultados obtidos por intermédio desses ensaios *in situ* permitem uma satisfatória definição da estratigrafia do subsolo e uma aproximada estimativa das propriedades de comportamento dos materiais particulados envolvidos.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



2.1.1 Ensaio de Penetração Padrão (SPT)

Em seu trabalho, Belincanta (1998) cita que não há como desenvolver projetos geotécnicos de fundações sem a realização de uma adequada investigação geotécnica. Nesse contexto geral, o SPT (*Standard Penetration Test*) demonstra ser eficiente para obter os parâmetros necessários para a elaboração desses projetos. A Figura 1, a seguir, exemplifica os equipamentos utilizados para execução de uma sondagem a percussão.

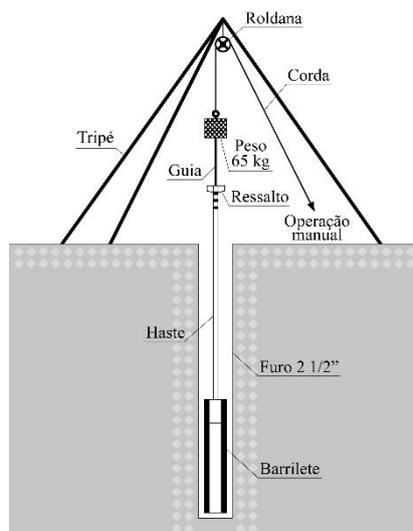


Figura 1. Esquema do equipamento para execução de SPT.

Segundo Décourt *et al.* (1988), o SPT é um dos ensaios geotécnicos com maior difusão no cenário mundial e o mais utilizado no Brasil. Tal afirmação tem relação com a praticidade de execução desse tipo de sondagem e ao custo dos equipamentos e mão de obra necessários, além da aceitação, de um modo geral, entre os projetistas de fundações.

Schnaid e Odebrecht (2012) afirmam que o SPT é realizado com a cravação do amostrador padrão (bipartido) no terreno soltando um peso de 65,00 kg de uma altura de queda de 75,00 cm. O número de golpes necessários para a cravação do amostrador em intervalos de 15,00 cm é registrado e o total de golpes para os dois últimos intervalos de 15,00 cm é denominado N_{SPT} .

2.2 Capacidade de Carga

Conforme Cintra e Aoki (2010), a capacidade de carga (R) de uma fundação profunda expressa, diante da aplicação de uma carga P , a máxima mobilização da soma das parcelas de resistência por resistência de ponta (R_p) e por atrito lateral (R_L) entre o solo e o fuste da estaca, assim como segue na Equação 1.

$$R = R_p + R_L \quad (1)$$

Ao longo das últimas décadas, diferentes autores se empenharam em equacionar formulações semiempíricas utilizadas na estimativa da capacidade de carga para fundações profundas. Ainda segundo Cintra e Aoki (2010), esses métodos são baseados em correlações

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



empíricas com resultados de ensaios *in situ* e ajustados com provas de carga. Essas formulações têm sido amplamente utilizadas na prática geotécnica, proporcionando uma abordagem prática e eficaz para estimar a capacidade de carga das fundações profundas.

2.2.1 Método Aoki-Velloso (1975)

O método proposto por Aoki e Velloso, apresentado no V Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, em 1975, é um dos métodos semiempíricos amplamente empregado para estimar a capacidade de carga à compressão em fundações profundas. Inicialmente desenvolvido com base em dados obtidos por meio do Ensaio de Penetração de Cone (CPT), os autores estabeleceram correlações entre a resistência de ponta do cone e a resistência de atrito lateral da luva. Posteriormente, essas correlações foram expandidas ao incluir o índice de resistência à penetração N_{SPT} , determinado pelo Ensaio de Penetração Padrão (SPT), largamente utilizado no Brasil. Desta forma, segundo Cintra e Aoki (2010), esse método permite calcular a capacidade de carga (R) por meio da expressão exibida na Equação 2:

$$R = \frac{K \cdot N_P}{F_1} \cdot A_P + \frac{U}{F_2} \cdot \sum_1^n (\alpha \cdot K \cdot N_L \cdot \Delta_L) \quad (2)$$

Onde:

A_P = Área da ponta da estaca;

U = Perímetro do fuste da estaca;

Δ_L = Comprimento unitário;

N_P = Valor de N_{SPT} medido na cota de assentamento da estaca;

N_L = Valor de N_{SPT} médio ao longo do fuste da estaca (Equação 3);

F_1 e F_2 = Fatores de correção;

K = Coeficiente em função do tipo de solo, que relaciona o ensaio SPT com o CPT (Tabela 1);

α = Razão de atrito em função do tipo de solo, que relaciona o ensaio SPT com o CPT (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de K e α em função do tipo de solo.

Tipo de Solo	K (MPa)	α (%)
Areia	1,00	1,40
Areia siltosa	0,80	2,00
Areia siltoargilosa	0,70	2,40
Areia argilosa	0,60	3,00
Areia argilossiltosa	0,50	2,80
Silte	0,40	3,00
Silte arenoso	0,55	2,20
Silte arenoargiloso	0,45	2,80
Silte argiloso	0,23	3,40
Silte argiloarenoso	0,25	3,00
Argila	0,20	6,00
Argila arenosa	0,35	2,40
Argila arenossiltosa	0,30	2,80
Argila siltosa	0,22	4,00
Argila siltoarenosa	0,33	3,00

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Sendo o N_P o valor de N_{SPT} medido na cota de assentamento da estaca e N_L calculado pela Equação 3, onde n corresponde ao número de camadas e i representa uma camada de solo em determinada profundidade.

$$N_L = \frac{n(i - 1) + n(i)}{2} \quad (3)$$

Os valores de F_1 e F_2 representam fatores adimensionais que consideram as diferenças nas resistências apresentadas pelo solo durante a penetração do amostrador padrão e durante o carregamento estático da estaca. Esses fatores levam em conta a discrepância de comportamento entre a estaca (protótipo) e o cone (modelo). Seus valores podem ser obtidos na Tabela 2.

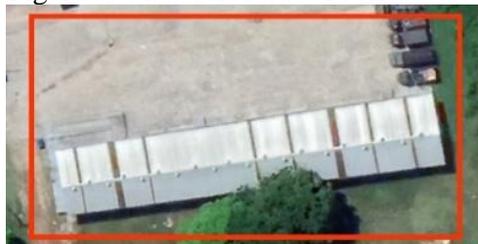
Tabela 2. Valores F_1 e F_2 em função do tipo de estaca.

Tipo de estaca	F_1	F_2
Franki	2,50	2 F_1
Metálica	1,75	2 F_1
Pré-moldada	1 + D/0,80	2 F_1
Escavada	3,00	2 F_1
Raiz, Hélice contínua e Ômega	2,00	2 F_1

3 Dados de Obra e Terreno

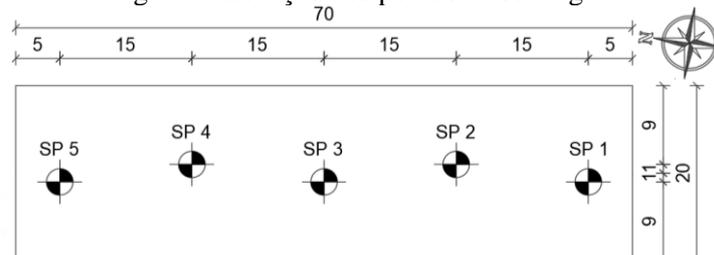
A obra analisada situa-se em uma área militar na cidade de Belém-PA, conforme exibida na Figura 3, e consiste em um pavilhão destinado à estocagem de materiais de manutenção de veículos, como peças e ferramentas.

Figura 3. Vista aérea da obra executada.



Por se tratar de uma construção com estrutura relativamente simples e com baixas cargas provenientes da superestrutura a serem transferidas para as fundações, foram necessários apenas 5 furos de sondagem, assim como mostra a Figura 4.

Figura 4. Localização dos pontos de sondagem.



Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Propôs-se um comprimento total único de 7,00 m para todas as estacas, uma vez que a abordagem do projetista teve como intuito alcançar a camada de solo com maior resistência, apontada pelos resultados dos ensaios a percussão (Figuras 5a, 5b, 5c, 5d e 5e).

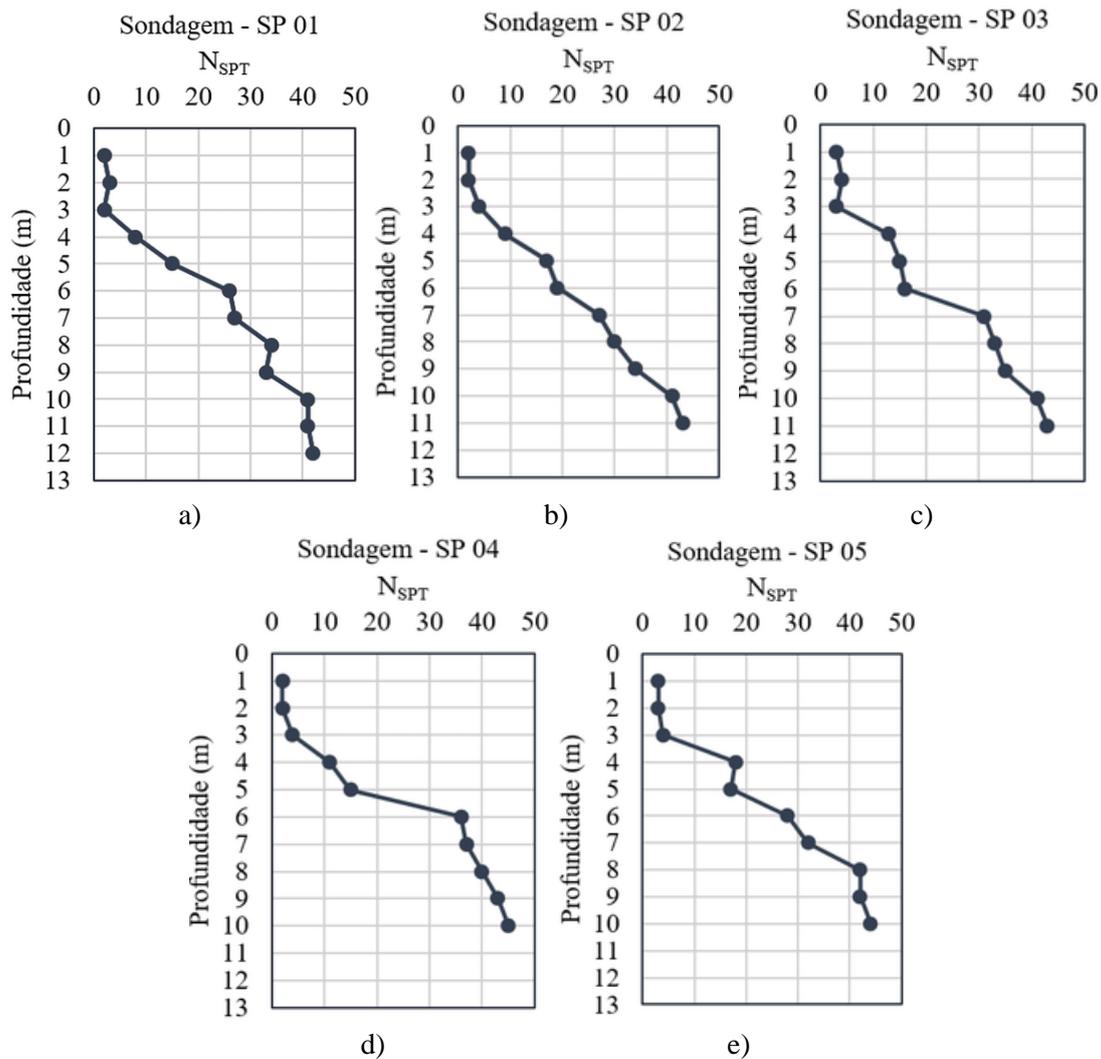


Figura 5. Disposição dos furos e perfis de sondagem a percussão: a) SP 01; b) SP 02; c) SP 03; d) SP 04; e) SP 05.

No entanto, durante a execução da cravação de algumas das estacas previstas em projeto (Figura 6), ficou evidente a possibilidade de redução do comprimento para alguns casos, haja vista a nega atingida ainda por volta dos 6,00 m de profundidade cravada.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





Figura 6. Cravação das estacas.

4 Resultados

O método de estimativa para a capacidade de carga escolhido foi o proposto por Aoki e Velloso (1975) devido sua grande aceitação e utilização por diversos projetistas de fundações no Brasil. Para a aplicação do método, uma planilha eletrônica foi desenvolvida, permitindo que, ao fornecer os dados de entrada obtidos através de sondagem SPT, a capacidade de carga do elemento de fundação seja calculada em diferentes profundidades.

Inicialmente, adotou-se a média dos valores de SPT para cada profundidade (Tabela 3), com base em cinco furos de sondagem realizados no local da obra. Em seguida, essa informação serviu como ponto de partida para o cálculo da capacidade de carga.

Tabela 3. Discretização das camadas e cálculo do N_{SPT} médio.

Profundidade (m)	SP 01	SP 02	SP 03	SP 04	SP 05	Média
1,00	2,00	2,00	3,00	2,00	3,00	2,40
2,00	3,00	2,00	4,00	2,00	3,00	2,80
3,00	2,00	4,00	3,00	4,00	4,00	3,40
4,00	8,00	9,00	13,00	11,00	18,00	11,80
5,00	15,00	17,00	15,00	15,00	17,00	15,80
6,00	26,00	19,00	16,00	36,00	28,00	25,00
7,00	27,00	27,00	31,00	37,00	32,00	30,80
8,00	34,00	30,00	33,00	40,00	42,00	35,80
9,00	33,00	34,00	35,00	43,00	42,00	37,40
10,00	41,00	41,00	41,00	45,00	44,00	42,40
11,00	41,00	43,00	43,00	**	**	**
12,00	42,00	**	**	**	**	**

** Limite da sondagem.

O valor de N_{SPT} foi calculado considerando uma única solução para toda a obra, obtendo a média das cinco medições realizadas em diferentes profundidades. A adoção de uma abordagem unificada é justificada em decorrência do tamanho reduzido da obra e diante da homogeneidade das camadas de solo analisadas.

Com a média entre os valores de N_{SPT} , e de posse da caracterização do terreno local em cada camada, foi possível estabelecer uma relação entre o tipo de solo e os valores de K e α , de acordo com o método utilizado. Conforme o tipo de estaca adotada em projeto, foram obtidos os valores dos fatores de correção F_1 e F_2 .

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Utilizando os parâmetros geotécnicos do solo e a geometria da fundação estabelecida em projeto, foi possível calcular o valor estimado da capacidade de carga por meio do Método Aoki-Velloso (1975). Além disso, determinou-se a contribuição das parcelas de resistência de ponta (R_p) e resistência por atrito lateral (R_L) em kN para diferentes profundidades, conforme Figura 7.

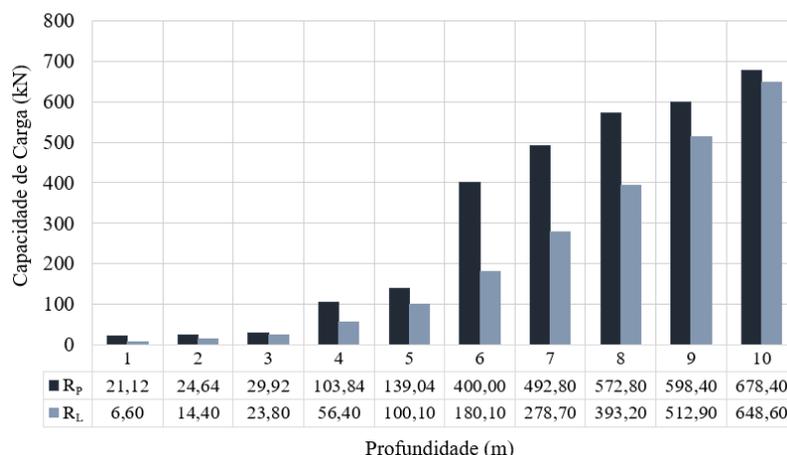


Figura 7. Valores de resistência de ponta (R_p) e por atrito lateral (R_L) obtidos pelo método semiempírico Aoki-Velloso (1975).

Com os valores de carga admissível calculados para cada profundidade, conforme a NBR 6122 (ABNT, 2022), dividindo os valores de capacidade de carga por um fator de segurança 2 para fundações profundas sem a execução de prova de carga, calculou-se as profundidades de cada estaca de forma unitária em relação as cargas axiais oriundas dos pilares. Os resultados obtidos para a capacidade de carga (R) e carga admissível (R_{adm}) estão dispostos na Figura 8.

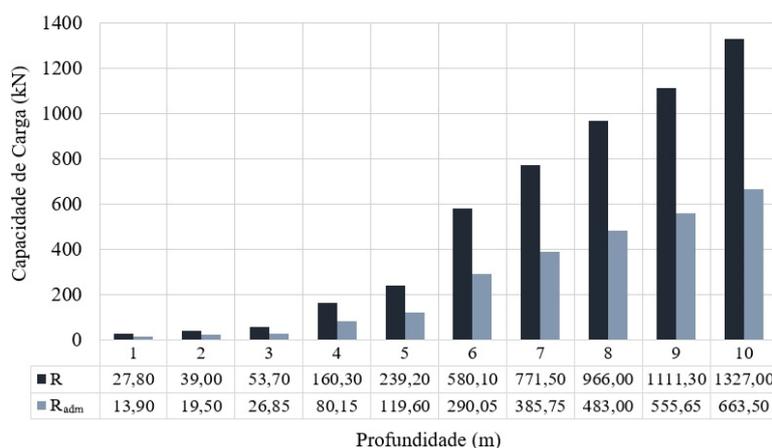


Figura 8. Valores de capacidade de carga (R) e carga admissível (R_{adm}) obtidos pelo método semiempírico Aoki-Velloso (1975).

Para determinar o comprimento das estacas, foi adotado o critério de seleção do valor mais próximo que garantisse que a carga atuante fosse menor do que a carga resistida (Tabela 4). Por exemplo, considerando o pilar P13 com uma carga atuante de 178,00 kN, verificou-se que era maior que 119,60 kN ($L = 5,00$ m) e consideravelmente menor que 290,10 kN ($L = 6,00$ m).

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





Tabela 4. Determinação da profundidade das estacas para cada pilar.

Pilar	Carga Máxima (kN)	Profundidade Calculada (m)	Pilar	Carga Máxima (kN)	Profundidade Calculada (m)
P1	40,00	4,00	P34	314,00	7,00
P2	55,00	4,00	P35	337,00	7,00
P3	41,00	4,00	P36	297,00	7,00
P4	43,00	4,00	P37	79,00	4,00
P5	43,00	4,00	P38	224,00	6,00
P6	44,00	4,00	P39	312,00	7,00
P7	43,00	4,00	P40	295,00	7,00
P8	41,00	4,00	P41	308,00	7,00
P9	38,00	4,00	P42	320,00	7,00
P10	43,00	4,00	P43	363,00	7,00
P11	30,00	4,00	P44	363,00	7,00
P12	27,00	4,00	P45	296,00	7,00
P13	178,00	6,00	P46	296,00	7,00
P14	319,00	7,00	P47	304,00	7,00
P15	296,00	7,00	P48	351,00	7,00
P16	298,00	7,00	P49	268,00	6,00
P17	299,00	7,00	P50	28,00	4,00
P18	324,00	7,00	P51	124,00	6,00
P19	324,00	7,00	P52	101,00	6,00
P20	298,00	7,00	P53	80,00	4,00
P21	298,00	7,00	P54	163,00	6,00
P22	293,00	7,00	P55	161,00	6,00
P23	307,00	7,00	P56	83,00	4,00
P24	199,00	6,00	P57	89,00	5,00
P25	261,00	6,00	P58	316,00	7,00
P26	330,00	7,00	P59	225,00	6,00
P27	313,00	7,00	P60	12,00	2,00
P28	316,00	7,00	P61	220,00	6,00
P29	317,00	7,00	P62	28,00	2,00
P30	376,00	7,00	P63	28,00	4,00
P31	376,00	7,00	P64	201,00	6,00
P32	317,00	7,00	P65	74,00	4,00
P33	316,00	7,00			

A Tabela 5 a seguir evidencia os benefícios econômicos com a redução do comprimento das estacas. A diferença entre os comprimentos calculado e o executado foi de 99,00 m, valor que corresponde a 20,70% do comprimento total que poderia ter sido reduzido sem gerar prejuízos a segurança da construção.

Tabela 5. Diferença de comprimento para solução única e solução individualizada.

Número de estacas	Comprimento em projeto (m)	Comprimento total (m)	Comprimento calculado (m)	Diferença (m)
68	7,00	476,00	377,00	99,00

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



5 Conclusões

O projeto analisado considerou um tratamento uniforme para o dimensionamento do comprimento das estacas, entretanto essa abordagem de projeto acarreta o encarecimento da obra. Assim, o uso de métodos semiempíricos para estimativa da capacidade de carga, bem como a seleção do valor mais próximo de carga admissível em relação a carga axial de cada pilar para estabelecer a cota de assentamento das estacas de maneira individualizada mostrou-se como uma solução economicamente mais viável.

Diante do estudo apresentado, foi possível inferir que o uso de métodos semiempíricos para o dimensionamento dos elementos de fundação de forma particularizada permite uma redução no comprimento total das estacas, o que confere uma significativa redução dos custos do empreendimento. Para a obra analisada, com a utilização do método semiempírico Aoki-Velloso (1975), haveria uma redução de 20,70% no comprimento total das estacas executadas em relação ao projeto geotécnico de fundações.

AGRADECIMENTOS

Os autores do presente artigo gostariam de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por apoiar e garantir suporte financeiro na concessão de bolsas de iniciação científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6122: *Solo - Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, 2022.
- Belincanta, A. *Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT*. 1998. 141p, v.1. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.
- Cintra, J. C. A.; Aoki, N. *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- Décourt, L.; et al. *Standard Penetration Test (SPT): International reference test procedure*. In: ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing - SPT Working Party, ISOPT I, Orlando, EUA, 1988, v. 1, 3-26 p.
- Rebello, Y. C. P. *Fundações – guia prático de projeto, execução e dimensionamento*. 2ª ed, São Paulo: Zigurate, 2008.
- Schnaid, F.; Odebrecht, E. *Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

