

ESTUDO DE METODOLOGIAS PARA ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE CARGA EM FUNDAÇÕES POR ESTACAS EM SOLO ARENOSO

STUDY OF METHODOLOGIES TO ESTIMATE THE BEARING CAPACITY OF PILE FOUNDATIONS IN SANDY SOIL

¹AZEVEDO, Gustavo H. S.; ¹COLIONI, Luis F.; ¹RODRIGUES, André L. C.

¹Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos – Unifio/FEMM

RESUMO

A função exercida pelas fundações é a de transferir as cargas de uma superestrutura para o solo. Sendo assim, é de suma importância a realização prévia de análises de capacidade de carga do solo, visto que, nessa relação fundação-solo, ambos estão sujeitos a suportar os esforços solicitantes da estrutura. Por conseguinte, o propósito deste trabalho foi comparar os métodos semiempíricos de determinação de capacidade de carga de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996), em um solo predominantemente arenoso, para fundações por estacas escavadas. Os valores utilizados foram provenientes de um ensaio de sondagem *Standard Penetration Test (SPT)*, de 20,0 m de profundidade, realizado em um solo litorâneo, na cidade de Maceió (Alagoas) por Marques (2004). Os métodos apresentaram resultados satisfatórios, que em algumas profundidades se mostraram muito próximos. Constatou-se que o método de Teixeira (1996) apresentou os maiores valores de resistência, sendo o menos conservador e mais econômico para este caso, por outro lado o método de Aoki e Velloso (1975) foi o que apresentou maior segurança, ao estabelecer os menores valores de resistência.

Palavras-chave: Fundações; Capacidade de Carga; Solo Arenoso.

ABSTRACT

The function performed by foundations is to transfer loads from a superstructure to the ground. Therefore, it is extremely important to carry out previous analyzes of the load-bearing capacity of the soil, since, in this foundation-soil relationship, both are subject to supporting the forces required by the structure. Wherefore, the purpose of this work was to compare the semi-empirical methods for determining the bearing capacity of Aoki and Velloso (1975), Décourt and Quaresma (1978) and Teixeira (1996), in a predominantly sandy soil, for excavated pile foundations. The values used came from a SPT (Standard Penetration Test), 20.0 m deep, carried out in a coastal soil, in the city of Maceió (Alagoas) by Marques (2004). The methods showed satisfactory results, which at some depths were very close. It was found that the method of Teixeira (1996) presented the highest values of resistance, being the least conservative and most economical for this case, on the other hand the method of Aoki and Velloso (1975) was the one that presented greater security, when establishing the lowest resistance values.

Keywords: Foundations; Bearing Capacity; Sandy Soil.

INTRODUÇÃO

As fundações foram conceituadas com o intuito de conduzir, por meio de uma estrutura, as cargas até o solo. Contudo, o seu dimensionamento deve ser realizado com atenção, pois diversos fatores relacionados ao projeto, a execução da obra e a possíveis eventos futuros, tais como a degradação de uma estaca, por exemplo, podem influenciar o seu desempenho. (MILITITSKY; CONSOLI; SCHNAID, 2015, p.9)

Como salienta Guimarães (2018), a classificação dos solos surgiu diante da necessidade de avaliar quais seriam os desempenhos de cada solo em determinadas situações, isto é, estipular prováveis valores para facilitar a identificação e resolução de problemas que possam vir a ocorrer. De um modo geral, com base nas análises granulométricas e nas características dos argilominerais, é plausível considerar a existência de solos rochosos (rochas em decomposição), solos arenosos e siltosos (propriedade de compactidade) e solos argilosos (propriedade de consistência).

Em suma, para a definição dos tipos de solos presentes, o terreno deve ser avaliado através de ensaios de campo e de laboratório e amostras coletadas *in loco*. Em muitos casos, ao avançar a profundidade dos ensaios, podem ser encontradas camadas de solo com propriedades variadas entre si. Para este estudo serão utilizados os parâmetros encontrados por meio do ensaio *Standard Penetration Test* (SPT), por ser o ensaio mais utilizado no mundo, com uma técnica simples e de fácil reprodução. Esta sondagem geotécnica à percussão apresenta resultados a cada metro.

Tendo ciência de que se faz necessária uma inspeção geotécnica do subsolo para a realização de um projeto de fundações, o presente artigo implica em um estudo de métodos semiempíricos para a determinação da capacidade de carga de estacas escavadas, em uma região litorânea localizada em Maceió (Alagoas), onde o solo é arenoso com ocorrência de silte. (MARQUES, 2004).

MATERIAL E MÉTODOS

Para a determinação das camadas do solo, foram utilizados ensaios de sondagem SPT, normatizado pela ABNT NBR 6484:20, é um ensaio simples utilizado para reconhecimento de solos, onde se obtém informações das camadas e profundidades, posição do nível d'água e os índices de resistência à penetração (N) por metro. O SPT utilizado neste estudo foi apresentado por Marques (2004).

De início, o solo é composto por areia fina, siltosa, amarelada e pouco compacta a compacta, sucessiva por uma areia média também de coloração amarela medianamente compacta. Em seguida, as duas outras camadas são compostas por silte arenoso pouco compacto e silte argiloso muito mole a mole respectivamente, ambos de cor cinza escuro. As outras duas camadas foram obtidas então, uma areia pouco argilosa fofa a medianamente compacta, com colorações de cinza escura e

creme claro e uma areia fina a média de cor creme claro, muito compacta. Por fim, obteve-se uma argila cinza claro de consistência dura. (MARQUES, 2004)

O Quadro 1 indica o SPT, nível d'água, profundidade e suas respectivas camadas.

Quadro 1 – Ensaio SPT em um solo de Maceió (AL).

Profundidade	SPT	Nível d'água (m)	Descrição do Material
0	6		
1	6	X	Areia fina siltosa pouco compacta a compacta
2	5		
3	30		
4	17		Areia média medianamente compacta
5	7		Silte arenoso pouco compacto
6	2/34		Silte argiloso muito mole a mole
7	3/35		
8	2/25		
9	4		
10	4		
11	5		
12	1/25		
13	p/p		
14	4/34		Areia pouco argilosa fofa a medianamente compacta
15	10/32		
16	30/32		Areia fina a média muito compacta
17	30/15		
18	22		Argila consistente dura
19	30/19		
20	30/11		

Fonte: Adaptado de Marques (2004).

Na profundidade de 13 metros, não foram apresentados valores de N_{spt} , cuja ausência de dado não foi justificada pelo autor. Todavia, para que não ficasse uma incógnita sem um valor definido na profundidade de 13 metros, foi realizado uma interpolação entre o SPT acima e o SPT abaixo, a qual resultou em um valor de 2,36.

Para a determinação da capacidade de carga foi considerada uma estaca escavada de 30 cm de diâmetro.

Método de Aoki e Velloso (1975)

Os autores Aoki e Velloso (1975) desenvolveram uma expressão de cálculo para a determinação de carga de ruptura. Sendo assim, foi considerado para o cálculo estacas do tipo Franki e dados adquiridos de provas de carga em estacas comprimidas. Para a expressão apresentada, também se baseou em dados fornecidos pelos ensaios de penetração CPT (Cone Penetration Test) e, através do coeficiente K o SPT.

A carga de ruptura é dada pela soma da carga de ruptura de lateral e de ponta. A resistência lateral R_L é dada pela Eq. (1):

$$R_L = U \cdot \sum \left[\frac{\alpha \cdot K \cdot N_{SPT}}{F_2} \right] \cdot \Delta_L \quad (1)$$

Onde U é o perímetro da seção transversal da estaca, α e K são coeficientes que depende do tipo de solo, N_{SPT} é o número de golpes para cada camada de solo, o F_2 é o fator de correção dependente do modelo de estaca e Δ_L é o segmento da estaca na respectiva camada de solo. Para valores de N_{SPT} superiores a 50, considerar 50.

Já para a resistência de ponta R_p , é dada pela Eq. 2:

$$R_p = \frac{K \cdot N_p}{F_1} \cdot A_p \quad (2)$$

Onde o N_p é o N_{SPT} localizada na região da ponta da estaca.

A resistência de cone pode ser obtida a partir dos valores de resistência à penetração N_p usando os valores de K do Quadro 2. O F_1 está relacionado ao comportamento do modelo cone ao protótipo (estaca) e depende do tipo de estaca. Ademais, o A_p é a área da seção transversal da ponta.

A capacidade de carga R_{rup} é dada pela Eq. 3:

$$R_{rup} = R_L + R_p \quad (3)$$

A carga admissível R_{adm} é dada pela Eq. 4, onde foi adotado um fator de segurança de acordo com a NBR 6122:2019.

$$R_{adm} = \frac{R_{rup}}{2,0} \quad (4)$$

Método Décourt e Quaresma (1978)

A princípio, o Método Décourt-Quaresma voltava-se para o dimensionamento de estacas pré-moldadas, porém, após a inclusão dos fatores α e β (coeficientes que variam de acordo com o tipo de estaca), este passou a incluir os demais tipos de estacas. (DANZIGER, 2021, p.54). O referido método é contemporâneo ao Método de Aoki-Velloso e se originou com o intuito de executar os conceitos e teorias estipulados por Vésic (AMANN, 2010, p. 70).

Com base nos resultados de sondagens SPT e posteriormente aos ajustes realizados, temos as seguintes equações para a determinação da resistência de ponta (R_p), resistência lateral (R_L) e a capacidade de carga (R):

$$R_p = \alpha \cdot C \cdot N_p \cdot A_p \quad (5)$$

$$R_L = \beta \cdot 10 \cdot \left(\frac{N_L}{3} + 1 \right) \cdot U \cdot L \quad (6)$$

$$R = R_L + R_p \quad (7)$$

Segundo Décourt e Quaresma (1978), para as equações acima, C é o coeficiente característico do solo, A_p é a área da ponta da estaca, U é o perímetro da estaca, L é a altura, N_p refere-se ao valor resultante da média obtida na cota da ponta da estaca e o N_L representa o valor do N_{SPT} . Ainda de acordo com os autores, o N_L varia de 3 a 50, o que prescreve a utilização do valor mínimo ou máximo, caso o número não se encaixe dentro desse limite.

Além disso, para a carga admissível do solo (R_{adm}), temos o seguinte equacionamento:

$$R_{adm} = \frac{R_L}{1,3} + \frac{R_p}{4,0} \quad (8)$$

Método Teixeira (1996)

Almejando alcançar uma unificação dos métodos de Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978), Teixeira estipulou o uso dos fatores α e β e o número de golpes do ensaio SPT, para os cálculos de carga de ruptura (ALBUQUERQUE, 2020, p.246). Sendo assim, temos as seguintes equações para a determinação da resistência de ponta, resistência lateral e capacidade de carga, respectivamente:

$$R_p = \alpha \cdot N_p \cdot A_p \quad (9)$$

$$R_L = \beta \cdot N_L \cdot U \cdot L \quad (10)$$

$$R = R_L + R_p \quad (11)$$

Segundo Teixeira (1996), assim como anteriormente citados, A_p é a área da ponta e o U e L são, respectivamente, perímetro e altura da estaca. No presente método, o N_p e o N_L representam o valor médio de resistência à penetração em intervalos, o que os difere é que o N_p somente é aferido no intervalo de quatro diâmetros acima e um abaixo da ponta e o N_L corresponde ao valor ao longo do fuste. Não obstante, bem como nas metodologias acima, o método ainda contempla um limite de N_{SPT} , o qual varia de 4 a 40.

Dessa forma, o autor também estipulou que o coeficiente de segurança utilizado no cálculo de carga admissível varia de acordo com o tipo de estaca. Dessa forma, para estacas escavadas a céu aberto, temos a seguinte equação de carga admissível (R_{adm}):

$$R_{adm} = \frac{R_L}{1,5} + \frac{R_p}{4,0} \quad (12)$$

Quadro 2 – Coeficientes indicados por cada um dos autores.

Prof. (m)	Aoki e Velloso (1975)				Décourt e Quaresma (1978)			Teixeira (1996)	
	K(kPA)	α %	F1	F2	C (kPA)	α	β	α	β
0	800	2			400	0,5	0,5	240	
1	800	2			400	0,5	0,5	240	
2	800	2			400	0,5	0,5	240	
3	800	2			400	0,5	0,5	240	
4	1000	1,4			400	0,5	0,5	270	
5	550	2,2			250	0,6	0,65	160	
6	230	3,4			200	0,6	0,65	110	
7	230	3,4			200	0,6	0,65	110	
8	230	3,4			200	0,6	0,65	110	
9	230	3,4			200	0,6	0,65	110	
10	230	3,4	3	6	200	0,6	0,65	110	4
11	230	3,4			200	0,6	0,65	110	
12	230	3,4			200	0,6	0,65	110	
13	230	3,4			200	0,6	0,65	110	
14	600	3			400	0,6	0,5	200	
15	600	3			400	0,6	0,5	200	
16	1000	1,4			400	0,5	0,5	270	
17	1000	1,4			400	0,5	0,5	270	
18	200	6			120	0,85	0,8	-	
19	200	6			120	0,85	0,8	-	
20	200	6			120	0,85	0,8	-	

LEGENDA	
	Areia fina siltosa pouco compacta a compacta
	Areia média medianamente compacta
	Silte arenoso pouco compacto
	Silte argiloso muito mole a mole
	Areia pouco argilosa fofa a medianamente compacta
	Areia fina a média muito compacta
	Argila consistente dura

Fonte: Adaptado de Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Teixeira (1996).

O método Teixeira (1996), não nos transmite o valor do fator de correção (α), para argilas duras. Portanto, as camadas 18, 19 e 20 foram desconsideradas nos cálculos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os cálculos das cargas de ruptura para cada método foram feitos metro a metro e, a partir deles, foram obtidos os valores das cargas admissíveis das camadas do solo utilizando as equações propostas por cada autor, Eq. 4, Eq. 8 e Eq. 10. A comparação dos resultados obtidos de carga admissível do solo é demonstrada no Quadro 3 e na Figura 1.

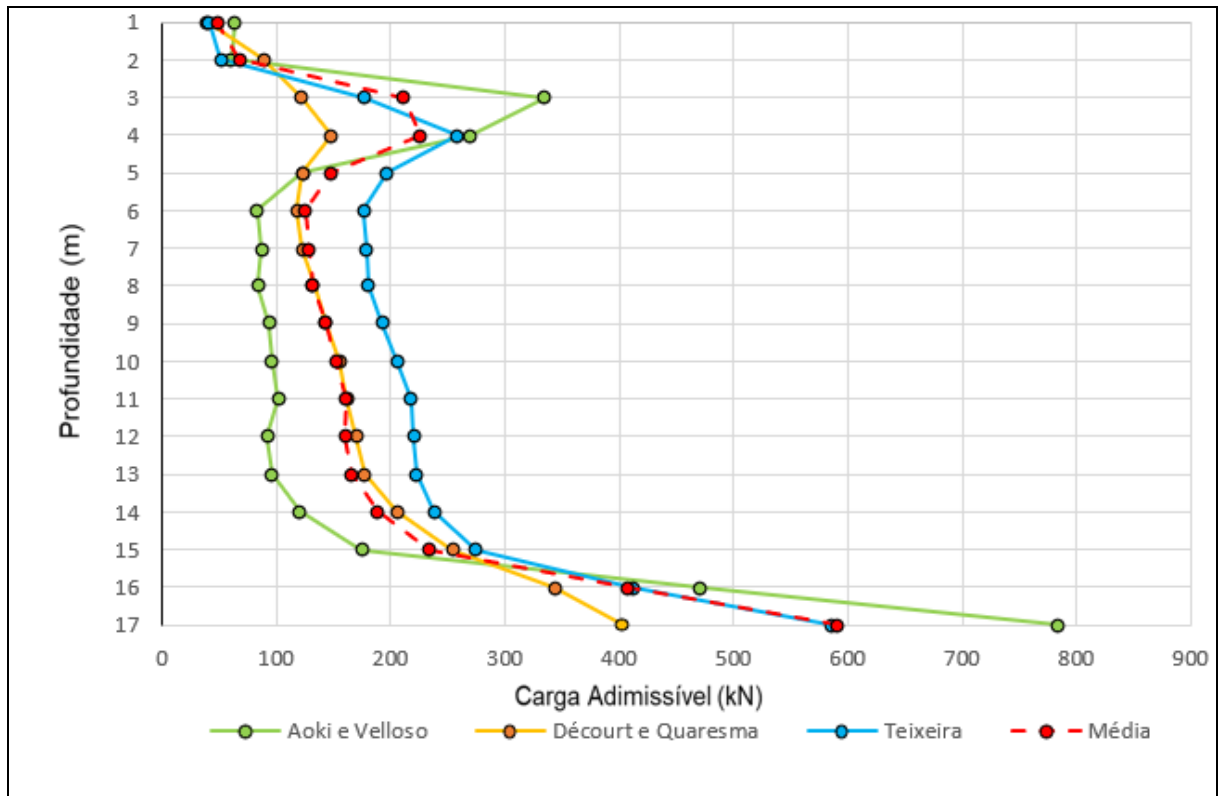
Quadro 3 – Carga admissível (kN).

CARGA ADMISSÍVEL (kN)				
Profundidade (m)	Aoki e Velloso	Décourt e Quaresma	Teixeira	Média
1	64,09	39,58	40,53	48,06
2	60,95	88,58	50,97	66,83
3	334,27	121,68	177,26	211,07
4	270,49	148,20	257,90	225,53
5	122,22	123,05	197,29	147,52
6	82,73	117,35	176,32	125,47
7	86,50	122,31	178,48	129,09
8	83,52	132,94	180,94	132,47
9	93,56	143,00	192,38	142,98
10	96,02	154,74	205,16	151,97
11	101,80	161,81	218,70	160,77
12	92,24	169,71	218,99	160,31
13	96,85	177,72	222,37	165,65
14	120,38	205,71	238,19	188,09
15	174,95	253,55	274,14	234,22
16	470,95	343,41	411,49	408,62
17	783,64	403,07	585,08	590,59

Fonte: Autor.

O principal objetivo do presente artigo consiste na avaliação dos métodos para a determinação de capacidade de carga dos solos, para averiguar qual deles é mais viável financeiramente.

Figura 1 – Relação entre profundidade e carga admissível para o solo arenoso.



Fonte: Autor.

A partir dos resultados, observou-se a ocorrência de variações de valores, visto que, alguns métodos alcançaram resistências maiores em alguns tipos específicos de solos. Por conseguinte, o método de Aoki Veloso (1975) se sobressaiu nas camadas de solo de areia fina siltosa e areia fina a média muito compacta, ao contrário do método de Décourt e Quaresma (1978), o qual, nesses solos, em sua maioria, apresentou as menores resistências. Entretanto, o valor elevado de SPT presente nas últimas camadas, perante propostas dos autores, afetou significativamente os valores de carga admissível, principalmente o método de Aoki Veloso (1975), cuja resistência alcançou 783,64 kN.

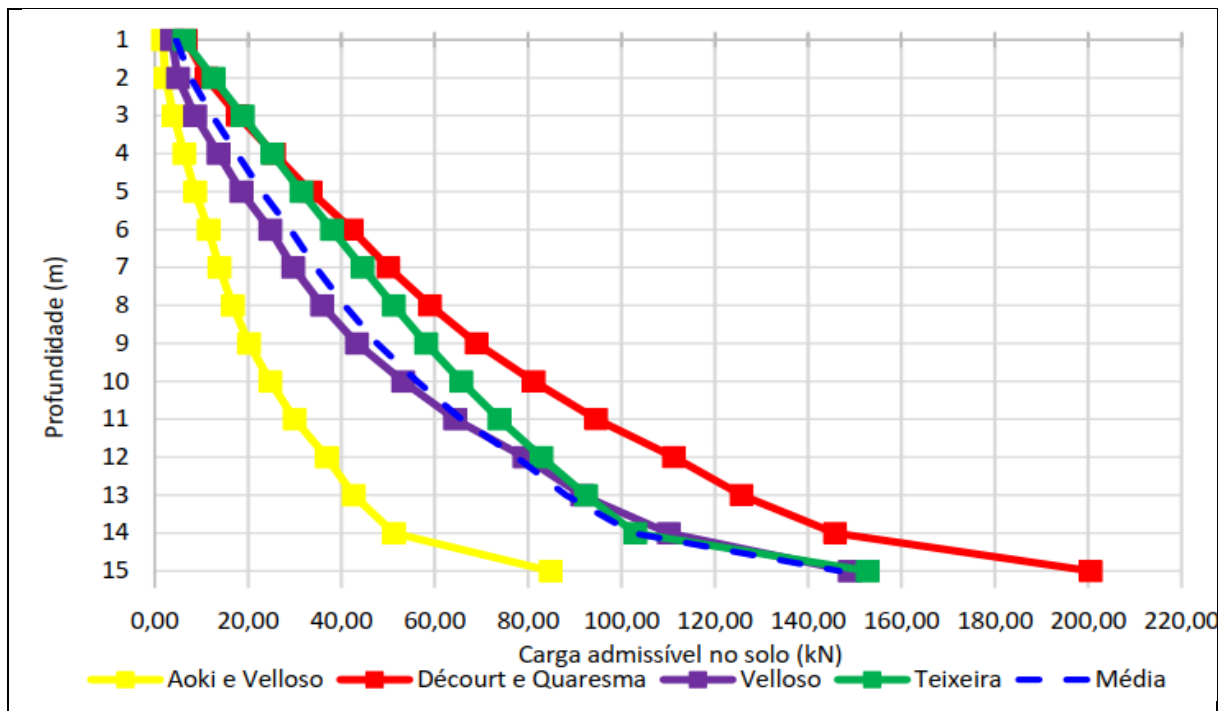
No entanto, entre a profundidade de 5 e 15 metros, com predominância de solos siltosos, houve uma baixa oscilação entre os métodos. Nota-se que as menores resistências identificadas nesse intervalo foram as do método de Aoki Veloso (1975) e as maiores, de Teixeira (1996).

Dessa forma, visando obter uma estrutura segura e rentável, como aponta a Figura 1, para o solo predominantemente arenoso, da região litorânea da cidade de Maceió (AL), o recomendado é utilizar o método de Teixeira (1996), pois o mesmo

demonstrou altos valores de resistência, o que resulta em uma fundação satisfatória com estacas de tamanhos reduzidos. Além disso, o método de Décourt e Quaresma (1978) é o mais consistente, uma vez que seus resultados ficaram próximos dos valores da média.

Para o aperfeiçoamento do estudo, foi efetuado um comparativo com outra análise dos métodos de capacidade de carga em fundações por estacas, a qual foi realizada pelos autores Nogueira, Rodrigues e Rodrigues (2021), para um solo argiloso do município de Londrina (PR). Tendo ciência disso, para o solo argiloso, notou-se que ocorreram certas discrepâncias nas cargas admissíveis do solo, assim como é demonstrado na Figura 2 a seguir.

Figura 2 – Relação entre profundidade e carga admissível para o solo argiloso.



Fonte: Nogueira, Rodrigues e Rodrigues (2021).

Mediante ausência da profundidade de 16 e 17 metros, como consta na Figura 2, o comparativo foi realizado até os 15 metros. Além disso, como no presente estudo não se fez uso do método de Velloso (1979), o mesmo foi desconsiderado nos percentuais de média.

Apesar da considerável discrepância entre os valores do N_{SPT} , o método de Aoki e Velloso (1975), cuja variação percentual foi de 81%, resultou na menor

resistência em ambos os solos, ou seja, foi a metodologia que se mostrou mais segura e conservadora.

Por conta de ter alcançado os maiores valores de carga admissível, o método de Décourt e Quaresma (1978), com uma variação de 50%, foi o menos conservador para o solo argiloso, visto que apresentou, de forma segura, uma viabilidade técnica e financeira maior. Porém, para o solo arenoso, com o percentual de 70% de variação, o método de Teixeira (1996) se mostrou o menos conservador.

Referente as médias das três metodologias, com uma variação de 67%, os valores médios do solo arenoso se mostraram superiores. Ainda assim, nos dois solos analisados, as camadas de silte argiloso apresentaram valores médios próximos.

CONCLUSÕES

Para o solo analisado, levando-se em conta os três métodos apresentados, foi possível verificar que a metodologia do autor Teixeira (1996), se mostra a mais econômica para o solo arenoso apresentado, exibindo resultados de capacidade de carga maiores em relação aos outros dois ensaios.

Na comparação com o solo argiloso estudado por Nogueira, Rodrigues e Rodrigues (2021) percebe-se uma diferença considerável nos valores de capacidade de carga, com os valores médios apresentando diferença de 67%. Assim, os engenheiros projetistas devem optar com cautela qual método será utilizado, com uma análise criteriosa do solo e de preferência com outros ensaios, além do convencional SPT.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Paulo José Rocha de. **Engenharia de Fundações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2020. 356 p.

AMANN, Kurt André Pereira. **Metodologia semiempírica unificada para a estimativa da capacidade de carga de estacas**. 2010. 1 v. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-21102010-094919/publico/Tese_Kurt_Andre_Pereira_Amann.pdf. Acesso em: 8 de maio de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.

CRUZ, Douglas Andreto Silva; ALVES, Marcelo Vale. **Análise de prova de carga bidirecional através dos métodos analíticos de cálculo de capacidade de carga**. 2018. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São João Del-Rei Campus Alto Paraopeba, Ouro Branco, 2018. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-21102010-094919/publico/Tese_Kurt_Andre_Pereira_Amann.pdf. Acesso em: 18 set. 2022.

DANZIGER, Bernadete Ragoni. **Fundações em Estacas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2022. 212 p.

FERREIRA, Tobias Ribeiro; DELALIBERA, Rodrigo Gustavo; SILVA, Wellington Andrade da. ROTINA COMPUTACIONAL PARA A PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS. **Reec – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Catalão, v. 8, n. 3, p. 38-50, jun. 2014.

GUIMARÃES, Diego. **Fundações**. Porto Alegre: Sagah, 2018. 222 p.

MARQUES, Juliane Andréia Figueiredo. **Extração e análise da geometria real das estacas escavadas, com bulbos e solos litorâneos**. Maceió: 2004. Disponível em: [http://www.agmgeotecnica.com.br/files/\(3.6\)%20GeoJovem_Marques%20JAF_1.pdf](http://www.agmgeotecnica.com.br/files/(3.6)%20GeoJovem_Marques%20JAF_1.pdf). Acesso em: 8 de maio de 2022.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das Fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 243 p.

NOGUEIRA, Daniel Luiz Sasdelli; RODRIGUES, Gabriel Vilariço; RODRIGUES, André Luis de Carvalho. **Análise comparativa entre métodos para determinação da capacidade de carga em fundações por estacas**. 2021. 11 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Geotecnia) – UNIFIO, Ourinhos.