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/COBRAMSEG2026.5/7

Análise da Variabilidade dos resultados de Capacidade de Carga de Estacas Raiz: Comparativo entre Prova de Carga Estática e Dinâmica

Victor Tadeu Lacerda
Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, vtl@ufmg.br

Lúcio Flávio de Souza Villar
Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, lvillar@etg.ufmg.br

Matheus Albuquerque Salvo
Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, matheusalbuquerque@ufmg.br

RESUMO: O dimensionamento de fundações profundas exige a validação da capacidade de carga das estacas por meio de ensaios de campo, sendo a Prova de Carga Estática (PCE) e o Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD/PDA) os métodos mais utilizados no Brasil. A diferença conceitual e operacional entre eles, aliada à inerente heterogeneidade dos solos, introduz uma variabilidade nos resultados de grande influência no dimensionamento de projetos geotécnicos. Este trabalho apresenta uma análise comparativa e quantitativa da variabilidade dos resultados de capacidade de carga obtidos por métodos semi-empíricos e ensaios PCE e ECD, com o objetivo de fornecer subsídios para a interpretação e comparação.
O estudo de caso analisado tem dados públicos e teve seus resultados divulgados durante o evento "Simpósio de PCE, bidirecional e ECD" em agosto de 2025. Foram ensaiadas duas estacas-teste do tipo raiz (ET-01 e ET-02), executadas no campo experimental do Instituto de Engenharia, com diâmetros de 400/310 mm e 500/400 mm, respectivamente, e profundidades médias de 21 metros, em solo caracterizado, predominantemente como argila siltosa.
Os resultados obtidos revelaram que os valores de capacidade de carga determinados pelo ensaio de carregamento dinâmico foram consistentemente superiores aos valores obtidos pela prova de carga estática, mas foram influenciados pela execução das estacas em campo. A análise reforçou a necessidade de entender as condições e limitações de cada ensaio, além das premissas admitidas nos cálculos de capacidade de carga.

PALAVRAS-CHAVE: Capacidade de Carga; Prova de Carga Estática (PCE); Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD); Variabilidade; Fundações Profundas.

ABSTRACT: The design of deep foundations requires validating the load-bearing capacity of piles through field tests, with the Static Load Test (SLT) and the Dynamic Load Test (DLT/PDA) being the most widely used methods in Brazil. The conceptual and operational differences between them, combined with the inherent heterogeneity of soils, introduce variability in the results, which greatly influences the design of geotechnical projects. This study presents a comparative and quantitative analysis of the variability in load-bearing capacity results obtained from semi-empirical methods and SLT and DLT tests, aiming to provide support for interpretation and comparison.
The analyzed case study uses public data whose results were presented during the “Symposium on SLT, Bidirectional Tests, and DLT” in August 2025. Two root-type test piles (ET-01 and ET-02) were tested, executed at the experimental field of the Institute of Engineering, with diameters of 410/300 mm and 500/400 mm, respectively, and average depths of 21 meters, in soil predominantly characterized as silty clay.
The results revealed that the load-bearing capacity values determined by CAPWAP were consistently higher than those obtained from the static load test, but were influenced by the field execution of the piles. The analysis reinforced the need to understand the conditions and limitations of each test, as well as the assumptions adopted in load-bearing capacity calculations.
KEYWORDS: Pile load capacity; Static load test; Pile driving analyzer; Variability; Deep foundations.

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento teórico das estacas, embora fundamentado em métodos de cálculo amplamente consolidados, previstos na NBR 6122 (ABNT, 2022), apresenta o desafio de considerar a natureza heterogênea do solo, cujas propriedades podem variar significativamente mesmo em pequenas profundidades, especialmente em regiões tropicais. Assim, torna-se indispensável a realização de ensaios em campo que permitam confrontar os resultados teóricos de previsão de capacidade de carga dos elementos de fundação com o comportamento real do sistema estaca–solo.

No Brasil, os dois principais métodos empregados para verificação da capacidade de carga de estacas no campo são a prova de carga estática (PCE), regulamentada pela NBR 16903 (ABNT, 2020), e o ensaio de carregamento dinâmico (ECD/PDA), normatizado pela NBR 13208 (ABNT, 2007). Ambos os ensaios possuem importância reconhecida, porém diferem quanto ao procedimento, custo, tempo de execução, instrumentação necessária e grau de precisão dos resultados.

Este trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade dos resultados de capacidade de carga obtidos em estacas raiz submetidas a ensaios do tipo PCE e PDA, comparando-os com métodos teóricos de cálculo usualmente utilizados na prática de projeto geotécnico. O estudo se justifica pela necessidade de compreender as possíveis discrepâncias que possam acontecer entre o comportamento previsto em projeto e o desempenho real, especialmente diante de falhas executivas não detectadas inicialmente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Estudo de Caso

Este estudo é baseado nos resultados obtidos em um campo experimental do Instituto de Engenharia de São Paulo, localizado na avenida Dr. Dante Pazzanese, 120, Vila Mariana, São Paulo/SP. As sondagens aí realizadas apresentaram pequenas variações, tanto na composição das camadas quanto nos índices de resistência a penetração. O solo foi caracterizado, predominantemente, como uma argila siltosa com N_{SPT} de 1 a 40 golpes. Também foi identificada uma camada uniforme de areia argilosa com profundidade média de 10 metros. Os limites de profundidades atingidas também foram parecidos, em média de 30 metros, com exceção do furo S1 que atingiu 40 metros.

No campo experimental foram executadas oito estacas moldadas in loco do tipo raiz, sendo duas estacas-teste e o restante estacas de reação, utilizadas nas provas de carga estáticas. As estacas-teste foram denominadas ET-01 e ET-02 e suas características estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1. Informações das estacas-teste.

Estacas-teste					
Estaca	Tipo	Sistema de perfuração 1º / 2º trecho	Diâmetro 1º / 2º trecho [mm]	Cota de profundidade 1º / 2º trecho [m]	Material
ET-01	Raiz	Rotativa revestida / rotativa tricone	400 / 310	15,50 / 21,70	Argila siltosa dura
ET-02	Raiz	Rotativa revestida / rotativa tricone	500 / 400	15,60 / 21,60	Argila siltosa dura

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente foram executadas as provas de carga estáticas (PCE), sintetizadas na Tabela 2, e, após, aproximadamente, quatro meses foram executados os ensaios de carregamento dinâmico (PDA). A metodologia executiva e parâmetros adotados nos ensaios estão em conformidade com as normas técnicas vigentes (ABNT 2007 e ABNT 2020).

Tabela 2. Informações do ensaio PCE.

Ensaio PCE					
Estaca	Tipo	Diâmetro 1º / 2º trecho [mm]	Cota de profundidade 1º / 2º trecho [m]	Carga de ensaio atingida [tf]	Deslocamento máximo [mm]
ET-01	Raiz	400 / 310	15,50 / 21,70	247,3	46,95
ET-02	Raiz	500 / 400	15,60 / 21,60	206,3	68,86

Os ensaios de carregamento dinâmico foram executados com martelo do tipo queda livre com massa igual a 5700 kg. Foi utilizada a metodologia de energia crescente com a diferença de altura de queda entre os golpes de 30 cm. O ensaio na estaca ET-01 teve uma altura máxima de queda de 1,5 m e na ET-02 o último golpe foi aplicado com 2,7 m. As informações e os resultados numéricos dos ensaios PDA, tanto pelo método CASE (PILE, 2006) quanto pelo CAPWAP (PILE, 2006), estão dispostos na Tabela 3 e na Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3. Ensaio PDA – Método CASE

Ensaio PDA									
Estaca	Tipo	Diâmetro 1º / 2º trecho [mm]	Profundidade 1º / 2º trecho [m]	Golpe	Altura de queda [cm]	RMX [tf]	EMX [tf.m]	DMX [mm]	Nega [mm]
ET-01	Raiz	400 / 310	15,50 / 21,70	1	30	174	0,47	5	0
				2	60	270	1,39	9	2
				3	90	281	2,29	12	3
				4	120	283	3,05	14	4
				5	150	285	3,90	15	6
ET-02	Raiz	500 / 400	15,60 / 21,60	1	30	217	0,44	4	0
				2	60	233	1,42	7	2
				3	90	234	2,39	9	5
				4	120	228	3,28	11	9
				5	150	222	4,50	14	12
				6	180	239	5,25	16	14
				7	210	250	6,83	20	17
				8	240	255	8,29	24	21
				9	270	287	9,70	27	23

É possível observar que a carga total da estaca foi mobilizada, pois, nos últimos golpes, mesmo com o aumento da energia (EMX) não há um acréscimo expressivo da carga (RMX). Sendo assim, considera-se que o martelo utilizado foi adequado.

Tabela 4. Ensaio PDA – Método CAPWAP

		Ensaio PDA		Método CAPWAP				
Estaca	Tipo	Diâmetro 1º / 2º trecho [mm]	Profundidade 1º / 2º trecho [m]	Golpe	RU [tf]	Q_L [tf]	Q_P [tf]	J_C
ET-01	Raiz	400 / 310	15,50 / 21,70	1	174	154,5	19,4	0,02
				2	270	209,5	60,5	0,35
				3	281	202,3	78,7	0,69
				4	283	191,7	91,3	0,61
				5	285	180,6	104,4	0,60
ET-02	Raiz	500 / 400	15,60 / 21,60	1	225	165,9	59,1	0,00
				2	235	166,1	68,9	0,90
				3	235	163,6	71,4	0,67
				4	228	161,2	66,8	0,68
				5	230	161,3	68,7	0,68
				6	240	164,0	76,0	0,62
				7	250	172,6	77,4	0,58
				8	255	181,1	74,0	0,59
				9	288,8	187,9	100,9	0,52

Nos cálculos da capacidade de carga via métodos semi-empíricos, todas as sondagens foram consideradas representativas do perfil de solo, conforme Figura 1 e Figura 2, pela proximidade dos furos, similaridade das classificações geológicas das camadas e coerência dos índices de resistência à penetração. Assim, os resultados dos cálculos de capacidade de carga foram médias de todas as sondagens.

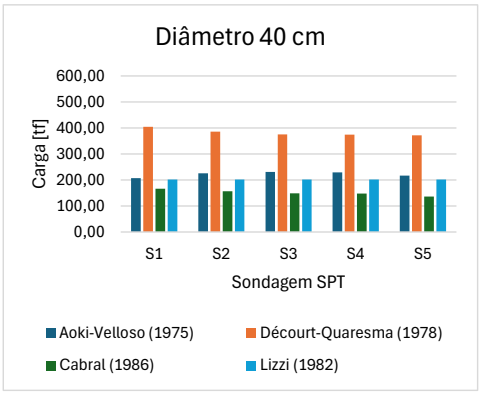


Figura 1. Comparação dos resultados de capacidade de carga para diâmetro de 40 cm.

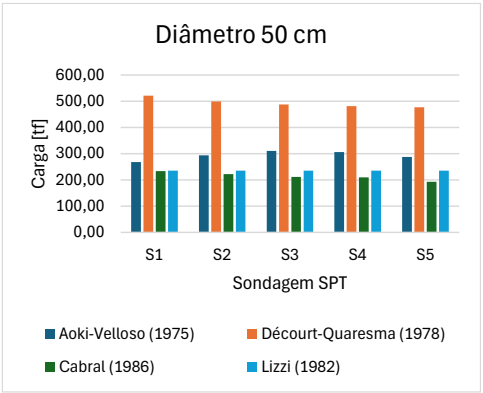


Figura 2. Comparação dos resultados de capacidade de carga para diâmetro de 50 cm.

Primeiramente, foram calculados os valores de capacidade de carga por todos os métodos semi-empíricos para cada uma das cinco sondagens. Foram feitas ponderações a fim de excluir valores discrepantes e com uma análise estatística pelo coeficiente de variação, representado pela divisão do desvio padrão pela média, esses resultados mostraram uma dispersão menor que 10%. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Análise estatística dos resultados de capacidade de carga por métodos de cálculo semi-empíricos.

Diâmetro [mm]	Método	Média [tf]	Desvio padrão [tf]	Mínimo [tf]	Máximo [tf]	Coeficiente de variação entre sondagens
400	Aoki-Velloso (1975)	221,7	10,0	206,7	230,6	4,5%
	Décourt-Quaresma (1978)	382,3	13,5	371,7	404,5	3,5%
	Cabral (1986)	151,2	11,2	136,5	166,4	7,4%
	Lizzi (1982)	202,0	0,0	202,0	202,0	0,0%
500	Aoki-Velloso (1975)	293,4	16,7	268,5	311,0	5,7%
	Décourt-Quaresma (1978)	493,5	17,7	477,3	521,3	3,6%
	Cabral (1986)	214,2	15,1	193,2	233,7	7,1%
	Lizzi (1982)	235,0	0,0	235,0	235,0	0,0%

A média dos resultados dos métodos de cálculo semi-empíricos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados dos métodos semi-empíricos.

Diâmetro [mm]	Método	Q_L [tf]	Q_P [tf]	RU [tf]	% Q_L	% Q_P
400	Aoki-Velloso (1975)	169,7	52,0	221,7	77%	23%
	Décourt-Quaresma (1978)	332,3	49,9	382,3	87%	13%
	Cabral (1986)	77,3	73,9	151,2	51%	49%
	Lizzi (1982)	202,0	0,0	202,0	100%	0%
500	Aoki-Velloso (1975)	212,2	81,3	293,4	72%	28%
	Décourt-Quaresma (1978)	415,4	78,0	493,5	84%	16%
	Cabral (1986)	97,5	116,6	214,2	46%	54%
	Lizzi (1982)	235,0	0,0	235,0	100%	0%

A comparação entre os resultados dos métodos semi-empíricos e a carga máxima atingida no PCE, apresentada na Tabela 7, revela a dispersão inerente às estimativas teóricas. As figuras 1 e 2 mostram uma comparação direta dos resultados fornecidos pelos diferentes métodos.

Tabela 7. Comparação dos resultados dos métodos semi-empíricos com carga máxima atingida no PCE.

Diâmetro [mm]	Método	Carga de ruptura [tf]	Variação em relação a carga máxima do PCE	Carga máxima atingida no PCE [tf]
400	Aoki-Velloso (1975)	222	-10,2%	247
	Décourt-Quaresma (1978)	382	+54,7%	
	Cabral (1986)	151	-38,8%	
	Lizzi (1982)	202	-18,2%	
500	Aoki-Velloso (1975)	293	+42,2%	206
	Décourt-Quaresma (1978)	493	+139,3%	
	Cabral (1986)	214	+3,9%	
	Lizzi (1982)	235	+14,1%	

Para a estaca ET-01 (400 mm), o método de Aoki-Velloso (1975) foi o que mais se aproximou da carga máxima fornecida pelo PCE, com uma subestimação de 10,2%. O método de Cabral (1986) foi o mais conservador, enquanto Décourt-Quaresma (1978) superestimou significativamente a carga. Para a estaca ET-02 (500 mm), todos os métodos superestimaram a carga máxima fornecida pelo PCE, sendo Cabral (1986) o mais próximo (+3,9%), porém, ainda assim, não foi conservador.

O ajuste no fator β do método de Décourt-Quaresma (1978) para estacas raiz, conforme sugerido por Polido et al. (2023), melhorou a correlação com os resultados fornecidos pelo PCE, especialmente para a ET-01, conforme pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8. Comparação dos resultados do método de cálculo de Décourt-Quaresma (1978).

Diâmetro [mm]	Método	Q_L	Q_P	RU [tf]	Média [tf]	Desvio padrão [tf]	Mínimo [tf]	Máximo [tf]	Carga máxima PCE [tf]
400	Décourt-Quaresma (1978) β=1,5	332,3	49,9	382,3	382,3	13,5	371,7	404,5	247
	Décourt-Quaresma (1978) β=1,0	241,2	41,8	283,0	283,0	15,4	265,5	304,7	
500	Décourt-Quaresma (1978) β=1,5	415,4	78,0	493,5	493,5	17,7	477,3	521,3	206
	Décourt-Quaresma (1978) β=1,0	297,3	73,2	370,5	370,5	12,1	354,7	384,8	

A comparação entre o ensaio estático (PCE) e o dinâmico (PDA/CAPWAP), mostrada na Tabela 9, também revelou diferenças.

Tabela 9. Comparação da carga máxima mobilizada no PDA x carga máxima atingida no PCE.

Diâmetro [mm]	RU PDA [tf]	Carga máxima PCE [tf]
400	285,0	247,3
500	288,8	206,3

Para a ET-01, o resultado da capacidade de carga obtida pelo PDA e calculado pelo método CAPWAP resultou em um valor 15,3% superior ao valor obtido pela PCE. Para a ET-02, a diferença foi de 39,9%,

indicando que pode ter existido um ganho de resistência notado no ensaio dinâmico que pode ser atribuído às modificações na ponta da estaca causadas pela aceleração dos recalques induzidos durante a execução do PCE. Além disso, pode ter ocorrido uma dissipação dos excessos de poropressão gerados durante o ensaio PCE, pois o PDA foi executado quatro meses após o PCE. Outro fato a ser considerado é a cravação estática da estaca que pode ter contribuído para altos valores de DMX e nega apresentados no ensaio PDA analisado pelo método CASE.

O fato que mais chamou a atenção na comparação dos ensaios PCE foi o desempenho da estaca ET-02. Inesperadamente, a estaca de maior diâmetro atingiu uma capacidade de carga menor (206,3 tf) do que a estaca ET-01 (247,3 tf). Ao analisar as curvas carga x recalque (ver a Figura 3), nota-se uma similaridade de comportamento para ambas as estacas até por volta de 1500 kN e 10 mm de recalque. A partir desse ponto, a estaca ET-02 apresentou um aumento expressivo no recalque com pouco acréscimo de carga, indicando uma ruptura. As análises conduzidas não permitiram esclarecer o motivo pelo qual tal expectativa não se confirmou, não sendo possível, com os dados disponíveis, determinar os fatores que influenciaram o comportamento observado, porém foram feitas considerações a respeito da execução da estaca.

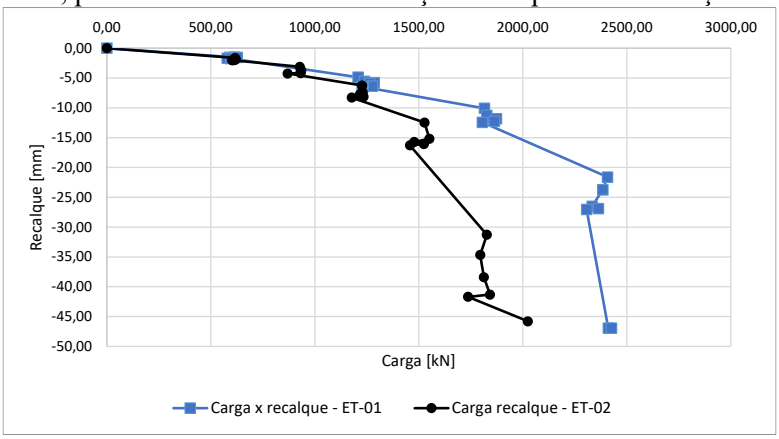


Figura 3. Comparação das curvas carga x recalque ET-01 e ET-02.

Após o término da execução dos ensaios foi feita uma escavação, em torno da estaca ET-02, Figura 4, com objetivo de investigar visualmente o sistema solo-estaca. Observou-se que o eixo central da estaca estava desalinhado com o eixo do bloco (ver a Figura 4), caracterizando um erro grave de execução e preparação do ensaio. Essa excentricidade gera efeitos de flexão quando ocorre a aplicação da carga. Este fator pode ter comprometido a ligação entre o bloco de estabilização e a estaca, e, consequentemente, o alcance de uma carga maior durante o ensaio.



Figura 4. Escavação para inspeção (Fonte: Askinis, 2025).

Outra inconformidade encontrada, ao analisar os boletins de execução, foi a falta de informações sobre o revestimento do segundo trecho das estacas. A ausência de revestimento no trecho final da estaca raiz pode diminuir significativamente a capacidade de carga por atrito lateral, mesmo com procedimentos corretos de lavagem que evitam a contaminação da injeção de argamassa.

4 CONCLUSÕES

A análise comparativa da capacidade de carga de estacas raiz, determinada por métodos semi-empíricos, provas de carga estáticas (PCE) e ensaios de carregamento dinâmico (PDA/CAPWAP), revelou uma variabilidade significativa, ressaltando a complexidade inerente à modelagem do sistema estaca-solo e à definição dos parâmetros geotécnicos.

Para a estaca ET-01 (400 mm), a média dos resultados de todos os métodos semi-empíricos (239 tf) foi próxima da carga máxima medida por PCE (247 tf). O método de Aoki-Velloso (1975) foi o mais coerente (-10,2%). O ajuste do fator β no método de Décourt-Quaresma melhorou a proximidade dos valores previstos e medidos para +14,6%. O ensaio de carregamento dinâmico apresentou resultados de uma carga mobilizada 15,3% maior que a atingida no PCE.

Para a estaca ET-02 (500 mm), a média dos métodos semi-empíricos (309 tf) superou em 50% a carga máxima medida via PCE (206 tf). O método de Cabral (1986) foi o mais próximo (+3,9%). A discrepância é atribuída a fatores executivos, como a excentricidade observada entre a estaca e o bloco de estabilização. O ensaio de carregamento dinâmico resultou em uma carga 39,9% maior que que a fornecida pela PCE.

Em síntese, o estudo concluiu que a variabilidade na determinação da capacidade de carga é um fenômeno multifatorial, regido pela diferença conceitual entre ensaios estáticos e dinâmicos, a sensibilidade dos métodos de interpretação, e, de forma crítica, a qualidade da execução da estaca. Recomenda-se, portanto, que a interpretação da capacidade de carga seja sempre realizada de forma integrada, utilizando a prova de carga estática como referência de carga de ruptura, o ensaio de carregamento dinâmico para controle de qualidade e estimativa da capacidade de carga, e o acompanhamento da execução e ensaios de integridade para mitigar riscos associados a falhas executivas, garantindo maior segurança e otimização no dimensionamento geotécnico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Engenharia do CREA-SP pela realização do evento e ao Geotecnia Brasil pela ampla divulgação de informações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Askinis, A. T. Imagens e arquivos de resultados do Simpósio de PCE, Bidirecional e ECD + Campo de Teste IE. São Paulo: Instituto de Engenharia, 2025. Material disponibilizado pelo autor.

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

Cabral, D. A. O uso da estaca raiz como fundação de obras normais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., 1986, Porto Alegre. Anais […]. Porto Alegre, 1986.

Décourt, L.; QUARESMA, A. R. Capacidade de carga de estacas a partir de valores 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.

Lizzi, F. The static restoration of monuments. Gênova: Sagep Editrice, 1982. 146 p.

Pile Dynamics, I. Case Pile Wave Analysis Program. CAPWAP Manual. 2006.

Polido, U. F.; Alledi, C. T. D. B.; Albuquerque, P. J. R.; França, H. F.; Lemos, S. G. F. P. Capacidade de carga de estacas pelo método Décourt e Quaresma: aspectos relevantes. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA – SEFE 10, 4–7 dez. 2023, São Paulo. Anais […]. São Paulo, 2023.