

Estudo da segurança em estacas hélice contínua através da teoria da confiabilidade na região de Osasco-SP

Rodrigo Rogerio Cerqueira da Silva¹

Jose Ricardo Dias de Menezes²

Resumo: Na engenharia geotécnica o dimensionamento de elementos de fundações utiliza-se métodos semi-empíricos, que confere segurança na sua concepção através de coeficientes que majora e minora valores a fim de obter confiança no projeto. Estes métodos utilizam resultados fornecidos pelos ensaios de investigação de subsolo, envolvendo uma série de incertezas durante a caracterização do maciço de solo, gerando assim uma variabilidade nos valores das resistências, que podem ocasionar ao risco de ruína das estruturas. O conceito de confiabilidade e segurança através de análises probabilísticas tem sido utilizado na engenharia de fundações possibilitando um maior nível de segurança e controle de risco na elaboração de projetos. O presente artigo apresenta os critérios de confiabilidade estrutural e segurança, bem como a probabilidade de ruína, para verificação da capacidade de carga de estacas tipo hélice contínua, através dos métodos semi-empíricos de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Antunes e Cabral (1996). Através das análises estatísticas e construção de curvas das funções de densidade de probabilidade de resistência, verificou-se que o método de Antunes e Cabral (1996) possui a menor variação nos valores estimados para a capacidade de carga nas estacas em ambos os modelos, com maior índice de confiabilidade e menor probabilidade de ruína.

Palavras-chave: Análise de Confiabilidade; Probabilidade de ruína; Hélice contínua; Prova de carga estática; Métodos semi-empíricos.

Abstract: In geotechnical engineering, the design of foundation elements uses semi-empirical methods, which provide security in their design through coefficients that increase and decrease values in order to obtain confidence in the project. These methods use results provided by subsoil investigation tests, involving a series of uncertainties during the characterisation of the soil mass, thus generating variability in resistance values, which can lead to the risk of structures collapsing. The concept of reliability and safety through probabilistic analyses has been used in foundation engineering, enabling a higher level of safety and risk control in project design. This article presents the structural reliability and safety criteria, as well as the probability of failure, for verifying the load capacity of continuous auger piles, using the semi-empirical methods of Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) and Antunes and Cabral (1996). Through statistical analyses and the construction of curves of the resistance probability density functions, it was found that the Antunes and Cabral (1996) method has the lowest variation in the estimated values for the pile load capacity in both models, with a higher reliability index and lower probability of failure.

Keywords: Reliability analysis; Probability of ruin; Continuous propeller, Static load test; Semi-empirical methods.

INTRODUÇÃO

Quando se trata da estimativa da capacidade de carga de fundações profundas são inúmeras as incertezas em seu dimensionamento, devidas a variabilidade dos maciços de solo que interagem com as fundações, seguidas das

¹ UNICAMP, E-mail: rodrigorogerioudoutorado@gmail.com

² UNICAMP, E-mail: josemenezes.est.mha@gmail.com

limitações impostas pelo número restritos de investigações geotécnicas, além dos erros e imprecisões na execução dos ensaios de campo, bem como a simplificação dos métodos de previsão de capacidade de carga semi-empíricos utilizados nos projetos (Alves et al. 2020 e Silva et al. 2020).

Para Boni et al. (2019), os problemas de engenharia estão associas as propriedades intrínsecas que surgem em função do comportamento da formação solos, e as epistêmicas provenientes da falta de conhecimento acerca de comportamentos e/ou de propriedades de materiais necessários para a previsão adequada do que se espera dos sistemas de engenharia.

Os engenheiros geotécnicos costumam usar o fator de segurança como um índice básico para avaliar o desempenho das estruturas geotécnicas, como preconiza a ABNT-NBR 6122 (2019) ao qual utiliza o conceito determinístico do coeficiente de segurança (global ou parcial), na verificação de um projeto de fundações. A variação dos parâmetros do maciço de solo em relação as resistências mobilizadas, quanto das solicitações provenientes da estrutura, o conceito determinístico de um coeficiente de segurança global ou parcial pode não ser suficiente para garantir a confiabilidade de uma fundação (Silva et al. 2020). De acordo com Tandjiria et al. (2020) a confiabilidade torna-se algo mensurável e não apenas coeficientes pré-definidos em uma norma, sendo possível um estudo específico para cada tipo de situação, com suas respectivas variáveis.

Segundo Junior et al. (2019) ao aplicar a confiabilidade estrutural, é possível determinar as variáveis a serem implementadas no processo de cálculo e adotar os coeficientes que irão ser trabalhados no processo, a fim de se obter uma exatidão e a precisão de um fator utilizado já previamente ou algo para o futuro, sejam eles um intervalo de onde pode-se trabalhar em relação ao mínimo e máximo de um fator de segurança, com isso pode identificar o nível de confiança em empregar uma determinada carga em função da fundação adotada.

Nos últimos anos, cresce no campo da literatura geotécnica a utilização de métodos baseados em probabilidade e estatística, estacas carregadas horizontalmente (Zhang et al., 2021; Khorramian et al., 2023), estacas carregas por compressão (Santos et al., 2019; Tange Phoon, 2020; Alves et al., 2020; Dong et al., 2023), estacas carregas por tração (Cheng, 2002; Wang, 2011; Reddy e Stuedlein, 2017), com isso abrem-se um leque de grandes possibilidades, seja para

uma simulação de ocorrência de um evento, ou simular resultados com variáveis distintas, já que são inúmeras probabilidades de se acontecer.

O objetivo do presente trabalho é realizar um estudo de variabilidade e confiabilidade, analisando as incertezas e variações existentes de uma obra de fundação executada em hélice contínua, a partir de análises comparativas das estimativas de capacidade de carga pelos métodos semi-empíricos e análise dos resultados das curvas de densidade de probabilidade e probabilidade de ruína, quando comparados à capacidade de carga última obtida através de prova de carga estática realizada in loco.

ABORDAGEM PROBABILÍSTICA NA ENGENHARIA GEOTÉCNICA

De acordo com Teixeira et al. (2012), Faustino (2013) para a realização da análise de estabilidade estrutural existem diversos métodos, com determinado nível de rigor envolvendo diferentes graus de exatidão. Estas possibilidades são geralmente organizadas por diferentes níveis, conforme indicado a seguir:

- Nível zero: métodos determinísticos, com utilização de fatores de segurança e cargas admissíveis;
- Nível I: métodos semi-probabilísticos, com utilização de coeficiente de segurança parciais. Estes coeficientes parciais podem ser definidos por métodos de base probabilística, visando um nível de fiabilidade concreto, ou calibrados de modo a obter um certo nível de desempenho. Afetam os valores característicos das ações, as propriedades dos materiais, as resistências e as grandezas geométricas
- Nível II: métodos probabilísticos aproximados, as variáveis aleatórias são caracterizadas pela sua distribuição e parâmetros estatísticos (média e desvio padrão ou coeficiente de variação). Estes métodos são baseados em aproximações das superfícies de rupturas por formas mais simples, em torno de localizações específicas, designadas por pontos de dimensionamento.
- Nível III: análises probabilísticas puras, com utilização dos métodos de simulação, a probabilidade de ruptura é determinada com base na distribuição conjunta das variáveis aleatórias de base, podendo para isso utilizar a integração analítica ou integração numérica.

- Nível IV: análises de risco, onde as consequências (custos materiais e não materiais) da ruína são tidas em conta.

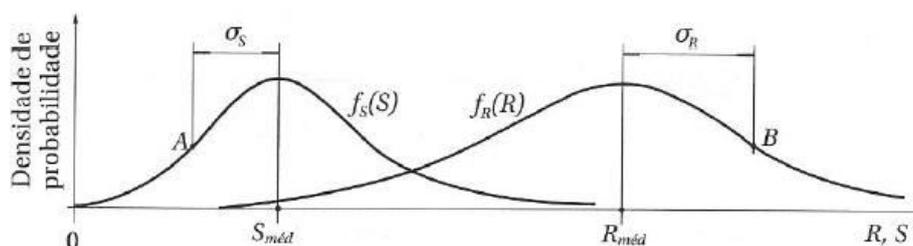
A presente pesquisa utilizará de métodos probabilísticos aproximados baseados no nível II.

MÉTODO CONFIABILIDADE POR CINTRA E AOKI (2010)

A utilização do método de análise de confiabilidade no projeto, tem por função verificar o risco de ruína máximo e considerá-lo no processo de dimensionamento com adição dos fatores de segurança da norma. Sendo os elementos para o dimensionamento de fundação por estaca, tem-se o valor da capacidade de carga (resistência R e a carga atuante (solicitação S)).

Cintra e Aoki (2010) cita que dada as variáveis existentes nos valores para resistência e solicitação, é possível realizar uma análise estatística com a construção das curvas de densidade de probabilidade de resistência $f_R(R)$ e de solicitação $f_S(S)$, conforme figura (1). Na figura (1), é apresentado os valores médios de solicitação ($S_{méd}$) e de resistência ($R_{méd}$), tal como os pontos A e B, de inflexão das curvas de S e de R, que representam os respectivos valores de desvio padrão (σ_S e σ_R), os quais quantificam a dispersão em torno do valor médio das variáveis independentes aleatórias S e R.

Figura 1: Curvas de densidade de probabilidade de resistência e solicitação.



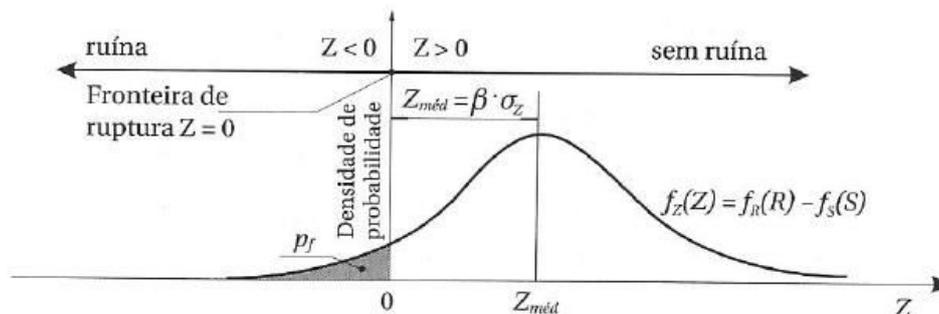
Fonte: Cintra e Aoki, 2010.

A margem de segurança $f_Z(Z)$ pode ser definida pela diferença entre as curvas de densidade de probabilidade de resistência $f_R(R)$ e de solicitação $f_S(S)$, conforme equação (1).

$$f_Z(Z) = f_R(R) - f_S(S) \quad (1)$$

Conforme ilustrado na figura (2), a área hachurada representa a região de probabilidade de ruína, com isso a ruína ocorre quando $Z \leq 0$, portanto quando $R \leq S$.

Figura 2: Função margem de segurança.



Fonte: Cintra e Aoki, 2010.

ANÁLISE PROBABILÍSTICA PURA COM MÉTODO DE MONTE CARLO

Segundo Esteves et al. (2021) o método de Monte Carlo, utilizado em análise estrutural, consiste na verificação de diferentes combinações possíveis de resistências e solicitações por meio da geração de números aleatórios respeitando a distribuição estatística das variáveis de projeto, reproduzindo sua aleatoriedade de forma intrínseca. De acordo com Lopes et al., (2019) o método de Monte Carlo, por se tratar de uma técnica de amostragem, os resultados estão sujeitos a erros, entretanto, com o aumento do número de amostras geradas tem-se uma redução do erro associado, por isso, geralmente estas análises exigem um grande número de valores gerados. Com base na equação (2) é possível determinar o número mínimo de simulações necessárias para a obtenção de um resultado válido de probabilidade de ruína, quanto menor a probabilidade de falha, maior o número necessário de simulações.

$$n_{smin} = \left(\frac{1}{\delta^2}\right) \cdot \left(\frac{1-P_f}{P_f}\right) \quad (2)$$

Onde: n_{smin} é o número mínimo de simulações; δ é o coeficiente de variação de P_f , usualmente admitido, em problemas de Engenharia, sendo inferior a 5%.

CRITÉRIOS DE ACEITABILIDADE DA ANÁLISE PROBABILÍSTICA

Na tabela (1), Aoki (2011) apresenta os requerimentos da Norma Militar americana MIL – STD – 882 para avaliar se a obra possui parâmetros aceitáveis de índice de confiabilidade e probabilidade de ruína.

Tabela 1: Escala subjetiva de risco e tempo de recorrência considerando a recomendação da norma MIL - STD – 882.

β	Ocorrência	Tempo de Recorrência	Frequência	Nível de Risco	Nível de Prob.	P_f
-7,94	Certeza	1 dia	Todo dia		1	1,00
0,00	50% probabilidade	2 dias	A cada 2 dias		2	0,50
0,52	Frequente	1 semana	Toda semana	A	3×10^{-1}	0,30
1,88	Provável	1 mês	Todo mês	B	3×10^{-2}	0,03
2,75	Ocasional	1 ano	Todo ano	C	3×10^{-3}	0,003
3,43	Remota	10 anos	A cada década	D	3×10^{-4}	0,0003
4,01	Muito remota	100 anos	A cada século	E	3×10^{-5}	0,00003
4,53	Improvável	1.000 anos	A cada milênio		3×10^{-6}	0,000003
7,27	Nunca	5,475E+12	Idade do Universo		0	1,83E-13

Fonte: Aoki, 2011.

A tabela (2) apresenta os requisitos em termos probabilísticos para obras de acordo com o seu porte de acordo com o Eurocode EN 1990 para um período de referência de 50 anos. Neto e Oliveira (2018) cita o critério do Código Europeu Eurocode EN (1990) que estabelece limites de probabilidade de ruína:

Tabela 2: Termos probabilísticos de acordo com a Eurocode EN (1990).

Código	Porte da Obra	Limite de p_f	$1/p_f$	Limite de β
RC 1	Pequeno Porte	4,83E-04	2069	3,300
RC 2	Obras Comerciais	7,23E-05	13822	3,800
RC 3	Grande Porte	8,54E-06	117096	4,300

Fonte: Eurocode EM, 1990.

Segundo Santos et al. (2019) na tabela (3) podem ser encontrados os valores de β e p_f recomendados de acordo com o nível de performance esperado segundo a norma ELT 1110-2-547 do *U.S. Army Corps of Engineers*.

Tabela 3: Termos probabilísticos de acordo com a de acordo com a norma ELT 1110-2-547 do U.S. Army Corps of Engineers.

Nível de desempenho esperado	β	Probabilidade de ruína
Alta	5,0	0,0000003
Boa	4,0	0,00003
Acima da média	3,0	0,001
Abaixo da média	2,5	0,006
Baixa	2,0	0,023
Insatisfatória	1,5	0,07
Arriscado	1,0	0,16

Fonte: U.S. Army Corps of Engineers, 1997.

ESTUDO DE CASO

O campo experimental está localizado em um empreendimento imobiliário no município de Osasco-SP, contendo uma área de terreno de 8545,42 metros quadrados, com estacas do tipo hélice contínua.

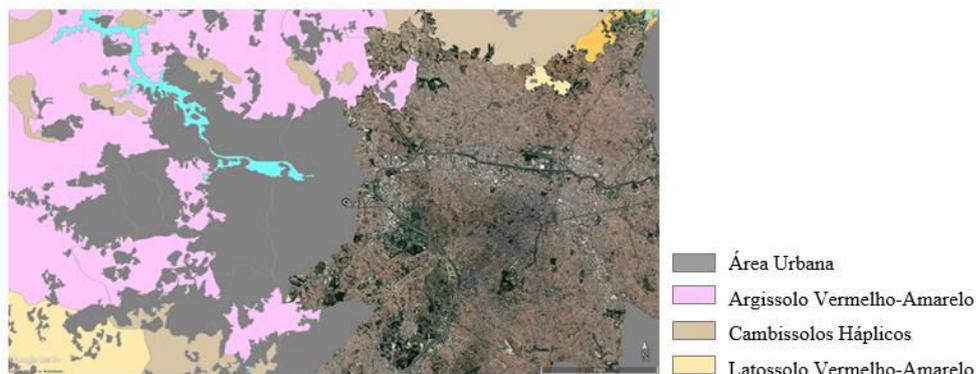
CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS- GEOTÉCNICAS

Característica geológicas

Na formação geológica do município de Osasco, onde está situado uma extensa área do Complexo Cristalino do Estado de São Paulo, cujos principais domínios tectônicos são: as Coberturas Cenozóicas, que abrange a Bacia de São Paulo e a Bacia de Taubaté. O município também é localizado nas unidades Votuverava ao sul, Formação Resende e Depósitos Aluvionares no centro, Granitóide Itaqui a nordeste, e Formação Borutuna a norte, dessa forma, segundo o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (Perrotta et al., 2005), dessa forma área de estudo estão inseridos em Depósitos Aluvionares (Q2a), compostos de areia, areia quartzosa, cascalheira, silte, e localmente, turfa. Segundo Teixeira et al (2009) o Brasil apresenta uma predominância de cobertura pedológica pois encontra-se quase que inteiramente no domínio tropical úmido e tem estabilidade estrutural de seu embasamento. A pedologia do município de Osasco, no entanto, é demonstrada predominantemente pela área urbana, ou seja, não há definição pedológica. Observa-se pelo mapa pedológico (figura 3) que há nas proximidades

de região metropolitana a presença de Cambissolos Háplicos (CX), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) e Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) (ROSSI, 2017).

Figura 4: Mapa Pedológico, Osasco-SP.

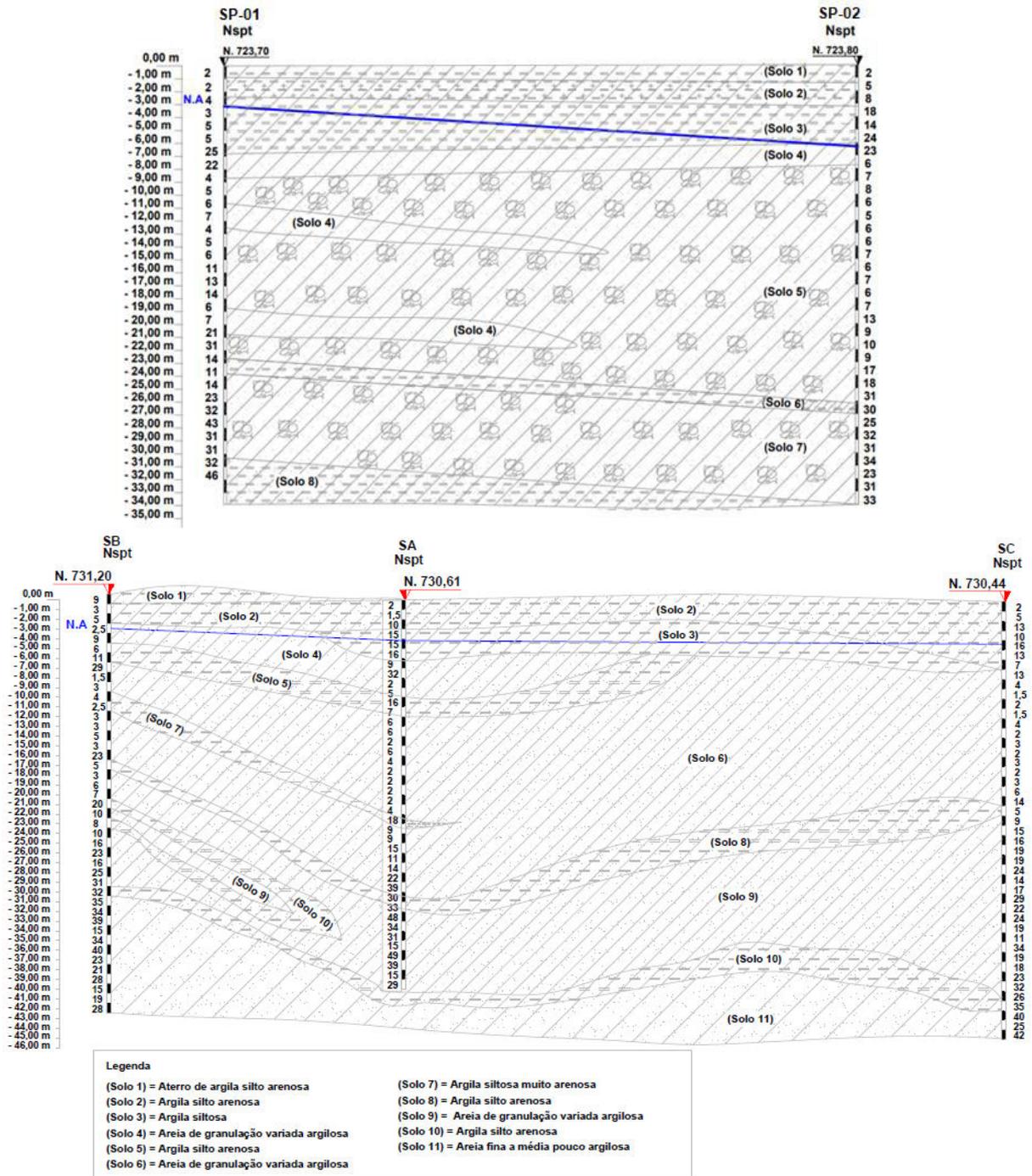


Fonte: Rossi, 2017.

Característica geotécnicas

No processo de investigação do solo, foram realizadas sondagens à percussão SPT, com profundidade limite em torno de 48 m. Para a determinação da capacidade de carga das estacas, foram elaborados dois perfis geológicos, a partir dos dados das sondagens da primeira campanha (SP-1 e SP-2) e segunda campanha (SA, SB e SC), conforme o perfil geológico ilustrado na figura (4).

Figura 4: Perfil geológico elaborado a partir das sondagens tipo SPT.



Fonte: Autores, 2023.

CARACTERÍSTICA DAS ESTACAS TESTES

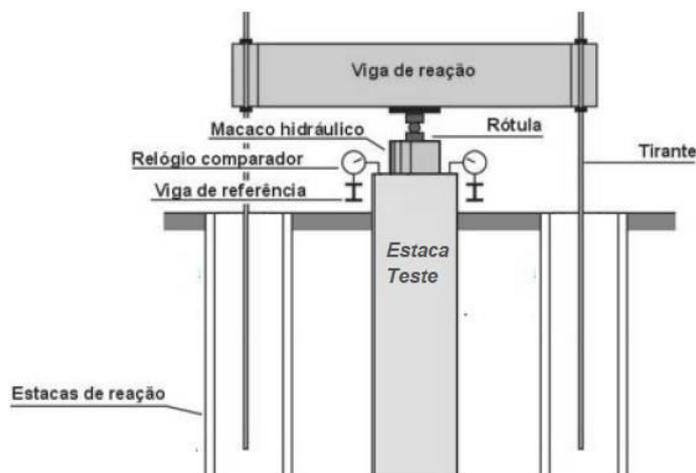
As estacas do tipo hélice contínua foram executadas com diâmetros nominal de 800 mm e comprimento de 30 m, ferragem composta por 6 Ø 20 mm CA 50 e

estribos de \varnothing 6,3 mm a cada 20 cm. O concreto utilizado das estacas testes possui um consumo de cimento igual ou superior a 450 kg/m^3 , com abatimento ou slump test de 28 ± 3 para estacas armadas, com agregado graúdo (brita 0) com diâmetro entre 12,5 mm e (f_{ck}) resistência à característica a compressão de 30 MPa aos 28 dias, seguindo as recomendações da ANBT-NBR 6122 (2019).

PROVA DE CARGA ESTÁTICA

As estacas testes foram submetidas ao ensaio a compressão, para aplicação das cargas, foi realizado um sistema de reação, feita por uma viga metálica principal e outras duas vigas metálicas secundárias. Também foi utilizado um conjunto de macaco hidráulico-bomba-manômetro com capacidade para até 500 tf (figura 5).

Figura 5: Perfil esquemático do sistema de reação das estacas de teste hélice contínua para ensaio de carregamento estático.



Fonte: Autores. 2023.

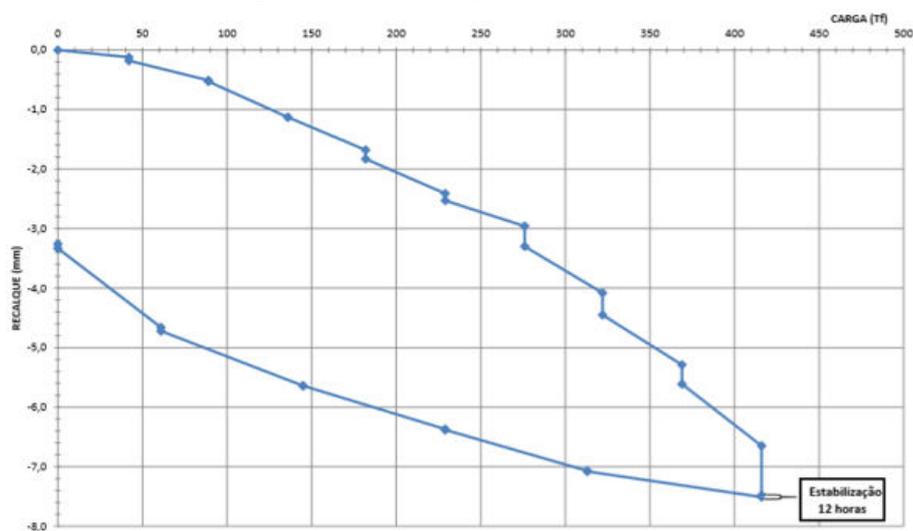
As provas de cargas foram feitas através de ensaios com carregamento lento seguindo a norma ABNT-NBR 16903 (2020), com carga de ensaio de 416 tf, correspondente a 2 vezes a carga de trabalho das estacas. Para que fosse controlado os recalques do topo da estaca comprimida foi instalado 4 deflectômetros, posicionados em dois eixos ortogonais que proporcionam leituras diretas de 0,01mm. Para o controle do deslocamento por conta da tração nas

estacas de reação, também foi instalado um deflectômetro que se faz leituras diretas de 0,01mm, alocado em um bloco adicionado.

No desenvolvimento da prova de carga, o carregamento foi executado em 2 períodos iguais e sucessivos, tendo a carga de ambos não ultrapassando 20% da carga de trabalho prevista, mantendo-se a carga até a estabilização dos deslocamentos no mínimo por 30 minutos. Em cada período os deslocamentos foram lidos assim que aplicado a carga correspondente, seguindo leituras decorridas como 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos até 30 minutos contando sempre a partir do início do estágio até que se estabilize. Pode considerar a estabilização dos deslocamentos sendo atendida, quando a diferença entre duas leituras na sequência corresponde a no máximo 5% de deslocamento.

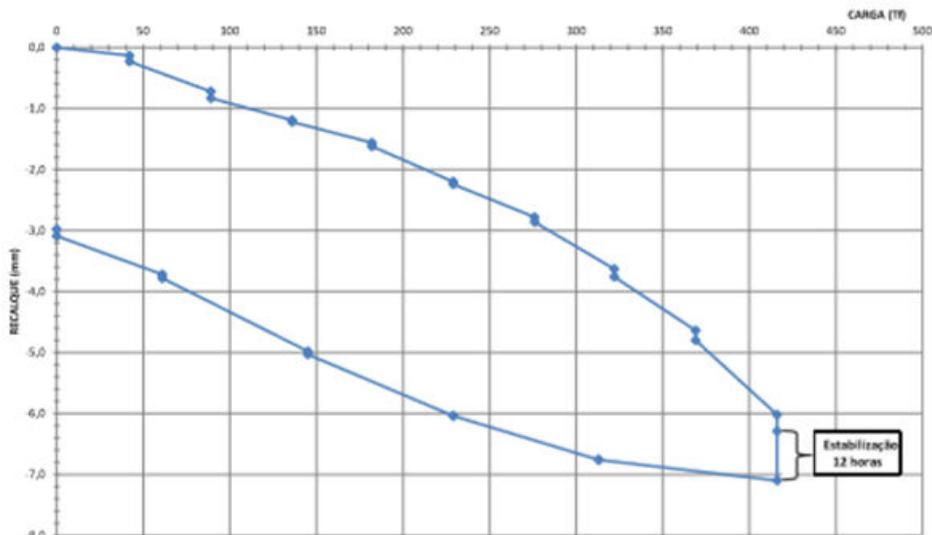
Determinada a fase de carregamento, a carga máxima do ensaio foi mantida durante 12 horas entre a estabilização dos recalques e início do descarregamento. Este descarregamento foi feito em 5 etapas, cada uma mantida por 15 minutos. Após feito o descarregamento absoluto, a leitura dos deslocamentos manteve-se até a estabilização dele. As figuras (6 e 7), demonstram alguns dados dos ensaios realizados.

Figura 6: Curva carga-recalque – PC1.



Fonte: Autores, 2023.

Figura 7: Curva carga-recalque – PC2.



Fonte: Autores (2023).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

O dimensionamento da capacidade carga do solo, foi realizada a partir de duas estacas que possuem as mesmas características, sendo do tipo de hélice contínua, com 80 centímetros de diâmetro e 30 metros de comprimento. Tendo como base de dados as sondagens SP-1, SP-2A, SA, SB e SC, o dimensionamento da capacidade de carga do solo, foram realizados através dos métodos semi-empíricos mais consagrados da literatura geotécnica como Aoki e Velloso (1975), Decourt e Quaresma (1978) e Antunes e Cabral (1996). De acordo com a tabela (4) o método de previsão de carga proposto por Décourt-Quaresma (1978) se aproximou mais do resultado obtido na prova de carga estática de 416tf, em praticamente todas as sondagens SPT analisadas, exceto na sondagem SPT 2A, onde o método de Antunes e Cabral (1996) obteve um resultado mais próximo da prova de carga. Quanto ao método de Aoki e Velloso (1975), foi o que mais superestimou a capacidade de carga das estacas, comparado aos outros métodos analisados, gerando diferenças percentuais acima dos 100%, como demonstrado na tabela (4). Pode-se afirmar que método de Décourt e Quaresma, 1978, foi o melhor método para esta avaliação da capacidade de carga, tendo uma variação máxima de +36,86%, quando comparado a prova de carga estática.

Tabela 4: Previsão da capacidade de carga e diferença percentual entre a carga indicada pela prova de carga e as previsões pelos métodos semi-empíricos para as sondagens SPT.

Sondagem	Método	Previsão capacidade de carga (tf)	Diferença Percentual
SPT-SP-1	Aoki-Velloso (1975)	593,84	+42,75%
	Decourt-Quaresma (1978)	441,77	+6,19%
	Antunes e Cabral (1996)	464,87	+11,75%
SPT-SP-2	Aoki-Velloso (1975)	879,71	+111,47%
	Decourt-Quaresma (1978)	569,33	+36,86%
	Antunes e Cabral (1996)	462,36	+11,14%
SPT-SP- SA	Aoki-Velloso (1975)	898,31	+115,94%
	Decourt-Quaresma (1978)	476,03	+14,43%
	Antunes e Cabral (1996)	603,17	+44,99%
SPT-SP- SB	Aoki-Velloso (1975)	528,94	+27,15%
	Decourt-Quaresma (1978)	434,53	+4,45%
	Antunes e Cabral (1996)	520,58	+25,14%
SPT-SP- SC	Aoki-Velloso (1975)	486,34	+16,91%
	Decourt-Quaresma (1978)	406,07	-2,39%
	Antunes e Cabral (1996)	479,51	+15,27%

Fonte: Autores, 2023.

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

Análise estatística (solicitação)

Neto e Oliveira (2018) cita que quando não há variação nos valores de solicitação, deve-se adotar a metodologia proposto por Aoki e Velloso (1975), com um coeficiente de variação mínimo de 10% devido ao arredondamento no cálculo do número de grupo de estacas e a distribuição das cargas nas estacas não ser homogênea.

Boni et al. (2019) também traz uma metodologia proposta por Ellingwood et al. (1980) onde para a carga permanente a média corresponde a $1,05 \times \text{Peso Pp}$ (Carga Permanente), com coeficiente de variação (COV) de 10% e distribuição normal de probabilidades.

A tabela (5) apresenta os valores de solicitação de carga e coeficiente de variação proposto pela metodologia de Aoki Velloso (1975).

Tabela 5: Análise estatística dos valores de solicitação

Estaca	Solicitação (tf)	Sméd (tf)	σ_s (tf)	vs	vs (%)
PCE-01	208				
PCE-02	208	208	20,8	0,1	10%

Fonte: Autores, 2023.

Resistência

Santos et al. (2019) cita que os coeficientes de segurança, baseados exclusivamente em termos de solicitações e resistências médias, desconsiderando a magnitude do desvio padrão a elas associado, não necessariamente satisfazem a segurança contra a ruptura. (Menegotto e Cintra, 2002; Aoki, 2011; Teixeira et al., 2012).

A tabela (6) apresenta os resultados de resistência média com seus respectivos valores de coeficiente de variação.

Tabela 6: Análise estatística dos valores de resistência para os métodos semi-empíricos.

Estaca	Método	R _{méd} (tf)	σ_s (tf)	vr	vr (%)
PCE-01	Aoki-Velloso				
PCE-02	(1975)	677,47	197,01	0,291	29,08
PCE-01	Decourt-				
PCE-02	Quaresma (1978)	465,55	63,14	0,136	13,56%
PCE-01	Antunes e Cabral				
PCE-02	(1996)	506,09	59,06	0,117	11,7%

Fonte: Autores, 2023.

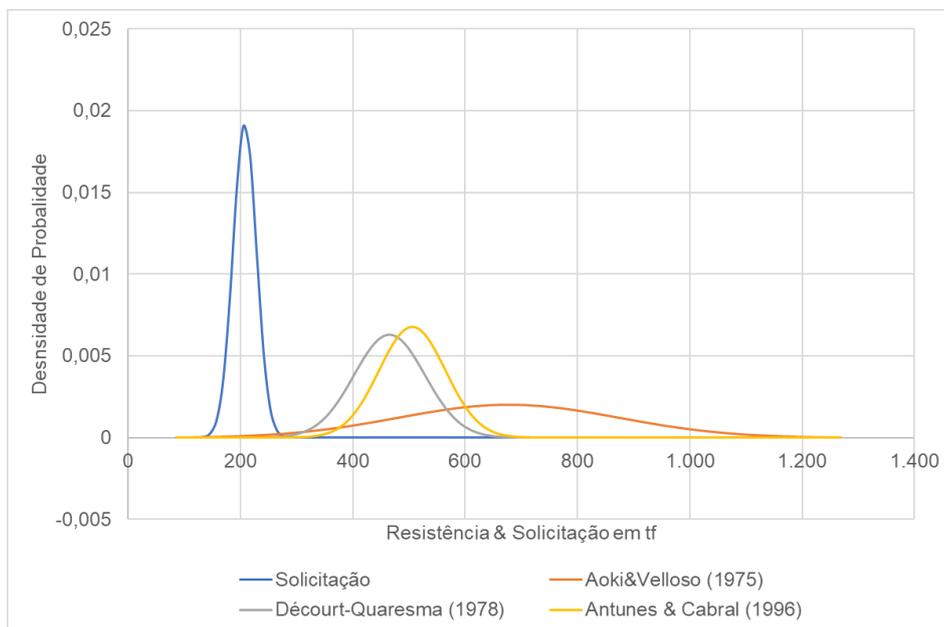
Análise das curvas de densidade de probabilidade

As curvas apresentam uma distribuição normal proposta por Gauss, após a análise estatística, é possível construir um gráfico com as curvas das funções de densidade de probabilidades da solicitação e da resistência, para uma distribuição normal simétrica (figura 8). A curva de solicitação apresenta maiores valores para densidade de probabilidade e menores valores de desvio padrão, isso se deu pelo incremento de coeficiente de variação mínimo adotado.

Com o uso da análise probabilística aproximada é possível obter resultados de grande relevância para projetos geotécnicos ao invés de utilizar apenas de fatores de segurança na análise determinística.

A figura (8) apresenta as curvas de densidade de probabilidade para as diferentes metodologias de capacidade de carga que foi possível quantificar a variação entre resultados e para a solicitação que foi adotado uma metodologia para simulação de variação de carga.

Figura 8: Curvas de densidade de probabilidade.



Fonte: Autores, 2023.

Com base na figura (8) o método do Antunes e Cabral (1996) foi o que resultou em um maior índice de confiabilidade, conseqüentemente uma menor probabilidade de ruína e todos obtiveram valores de fator de segurança acima do mínimo proposto pela ABNT-NBR 6122 (2019).

Resultados confiabilidade e probabilidade ruína

Realizado a análises probabilísticas com o uso dos parâmetros estatísticos para as resistências e solicitações, aplicando o dimensionamento da confiabilidade proposto por Cintra e Aoki (2010). A tabela (7) apresenta os valores da aplicação da metodologia e que são obtidos os valores do índice de confiabilidade, probabilidade de ruína e fator de segurança global que são os dados fundamentais para avaliação de risco.

Tabela 7: Valores da probabilidade de ruína e confiabilidade.

Método	σ_z	Zm	FS	β	pf	1/pf
Aoki-Velloso (1975)	198,11	469,43	3,26	2,370	8,905E-03	112,29
Décourt-Quaresma (1978)	66,475	257,55	2,24	3,874	5,346E-05	18.704,69
Antunes e Cabral (1996)	62,615	298,1	2,43	4,761	9,640E-07	1.037.353,87

Fonte: Autores, 2023.

Onde:

σ_z é o desvio padrão dos valores médio da margem de segurança;

Zm é o valor médio da margem de segurança;

β é o índice de confiabilidade;

pf é a probabilidade de ruína;

FS é o fator de segurança global;

1/pf é a ocorrência de probabilidade ruína.

Conforme os resultados apresentados na tabela (7) seguindo a norma MIL-STD-882 (tabela 1), obteve-se as seguintes conclusões:

Para o método de Aoki e Velloso (1975), 1 a cada 112,29 estacas chegam à condição de ruptura conforme os valores de projeto, resultando em um coeficiente de confiabilidade de (β) = 2,37, classificando-se em uma ocorrência ocasional.

Para o método de Décourt e Quaresma (1978), 1 a cada 18.704,69 estacas chegam à condição de ruptura, resultando em coeficiente de confiabilidade de (β) = 3,874, classificando-se em uma ocorrência extremamente remota.

Para o método de Antunes e Cabral (1996), 1 a cada 1.037.353,87 estacas chegam à condição de ruptura, resultando em um coeficiente de confiabilidade de (β) = 4,761, classificando-se em uma ocorrência impossível na prática.

Boni et al. (2019) diante da necessidade de se caracterizar adequadamente as incertezas aos parâmetros de resistência do solo para projetos de fundações, a abordagem probabilística tem sido cada vez mais utilizada ainda na fase de projeto, na determinação da capacidade de carga dos elementos de fundação. (Low e Phoon, 2015; Prästings et al., 2016).

Neto e Oliveira (2018) cita o critério do Código Europeu Eurocode EN (1990) que estabelece limites de probabilidade de ruína:

Em obras de pequeno porte (RC1), a probabilidade limite é de $1/2.069$;

Em obras comerciais (RC2), o limite é de $1/13.822$ e;

Em grandes obras (RC3) a probabilidade deve ser $1/117.096$.

Portanto seguindo como base o porte obra em análise, categorizada como uma obra de grande porte, junto dos parâmetros estipulados pelo Eurocode, pode-se afirmar que apenas o método de Antunes e Cabral (1996), atingiu a classificação RC3, pois apresentou um índice de probabilidade de ruína de $1/1.037.353,87$ ultrapassando o mínimo estipulado pela norma.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos comparativos realizados entre as previsões de capacidade de carga, constatou-se que o resultado previsto pelo método de Décourt e Quaresma (1978), atingiu com maior proximidade a resistência de ensaio obtido através da prova de carga, tendo uma variação máxima inferior aos outros métodos.

Ao aplicar a teoria da confiabilidade não se obteve o mesmo resultado, onde apenas o método de Antunes e Cabral (1996) se adequou a classificação RC3, descartando assim o Décourt-Quaresma como um método confiável para este estudo de caso.

Portanto com base nos resultados levantados, o método de previsão de carga de Antunes e Cabral foi dado como a opção mais confiável para esta obra em análise, essa diferença surge, pois, a confiabilidade engloba fatores intrínsecos para a confiança no método aplicado, sendo incorporados fatores de variáveis aleatórias para as cargas de solicitação de projeto, bem como a variabilidade de solo local, mão de obra, qualidades dos materiais, execução, entre outros, resultando em uma análise mais condizente com a realidade, se tornando um fator importante a ser incrementado na hora da escolha do método mais adequado.

Ao confrontar os resultados obtidos com outras literaturas que seguem a mesma aplicação, houve também uma divergência entre os resultados, devido as diferenças das características geológicas, diâmetros e comprimentos das estacas.

Através das pesquisas realizadas, analisou-se um aumento da literatura atrelada à análise de confiabilidade em estacas sobre a calibração baseada em

confiabilidade dos principais códigos de projeto estrutural brasileiros, o que contribui para a implementação na revisão de normas futuras e para uso nos dimensionamentos de confiabilidade. Logo, pode-se afirmar que a Teoria da Confiabilidade seja de suma importância para todos os projetos, garantindo a segurança e a confiabilidade do mesmo, pois com sua análise é possível identificar a probabilidade de falha possibilitando o reajuste dos fatores de segurança.

REFERENCIAS

ALVES, I. S.; DA SILVA NETO, A. N.; DE OLIVEIRA, J. T. R.; DE MELO FERREIRA, S. R. Análise probabilística de um reservatório apoiado em estaca ensaiadas por meio de prova de carga estática. XX-COBRANSEG. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações - procedimento. Rio de Janeiro. 108 p. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16903: Solo – Prova de carga estática em fundação profunda. Rio de Janeiro. 11 p. 2020.

AOKI, N. A probabilidade de ruína e os fatores de segurança em fundações. 7ª. Palestra ABMS, CDROM, Recife, Brasil. (2011).

AOKI, N.; CINTRA, J. C. A.; MENEGOTTO, M. L. Probabilidade de ruína como critério para definir o coeficiente de segurança a ser usado na previsão da carga admissível de fundações por estacas. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2002, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABMS, 2002.

BONI, H. S.; ROCHA, B. P.; GIACHETI, H. L.; NOGUEIRA, C. G. Consideração sobre o emprego da análise probabilística na fase de projeto de fundações por estacas: Aplicação em estacas escavadas de pequeno diâmetro. 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia - SEFE 9. 2019.

CHENG, Po Wen. A reliability based design methodology for extreme responses of offshore wind turbines. DUWIND Delft University Wind Energy Research Institute, 2002.

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

Clemens, P. L. Combinatorial failure probability analysis using MIL-STD 882. Jacobs Sverdrup, Handbook 6000-8. Journal of the System Safety Society, Vol. 18, No. 4.1983.

Dong, X.; Tan, X.; Lin, X.; Guo, W.; Zha, F.; Xu, L. Reliability Analysis and Design of Vertically Loaded Piles in Spatially Variable Soils. International Journal of Geomechanics, v. 23, n. 10, p. 04023175, 2023.

ESTEVEES, A. V.; DE LIMA JUNIOR, E. T.; MARQUES, J. A. F.; FONSECA, V. B.; AMORIM, A. S. Análise probabilística de estacas metálicas via método form: estudo de caso. South American Journal of Basic Education, Technical and Technological, v. 8, n. 2, p. 761-799, 2021.

Eurocode EN. Eurocode – Basis of Structural Design. CEN 2002. 1990.

FAUSTINO, G. T. Segurança estrutural em geotecnia através de métodos de base probabilística. 2013. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia. 2013.

JUNIOR, A. J. G.; ROCHA, B. P.; FERNANDES, J. B.; NOGUEIRA, G.; GIACHETI, H. L. Confiabilidade de métodos de previsão da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de CPT. Geotecnia, n. 147, p. 61-76, 2019.

KHORRAMIAN, K.; ALHASHMI, A. E.; OUDAH, F. Optimized active learning Kriging reliability based assessment of laterally loaded pile groups modeled using random finite element analysis. Computers and Geotechnics, v. 154, p. 105135, 2023.

LOPES, L. M. P. C.; MAIA, A., P. C.; PRELLWITZ, M. F. Análise do Índice de Confiabilidade de Fundações em Estacas Empregando Diferentes Metodologias- Estudo de Caso. 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia - SEFE 9. 2019.

MIL-STD 882C. Military Standard – System Safe Program Requirements. Department of Defense, United States of America, 1993.

NETO, A. A. S.; Oliveira, J. T. R. Confiabilidade e segurança de fundações em dois empreendimentos no nordeste do Brasil. Revista de Engenharia, Braga, Portugal, (55), 19-28, jul., 2018.

REDDY, S. C.; STUEDLEIN, A. W. Ultimate limit state reliability-based design of augered cast-in-place piles considering lower-bound capacities. Canadian Geotechnical Journal, v. 54, n. 12, p. 1693-1703, 2017.

ROSSI, M. Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal. 2017, V.1.

Santos, D. S.; Neto, A. N. S.; Gusmão, A. D.; de Brito Maia, G.; de Melo Ferreira, S. R. Análise de confiabilidade geotécnica de um edifício comercial construído em

fundações profundas. 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia - SEFE 9. 2019.

SILVA, E. R.; DANZIGER, B. R.; PACHECO, M. P. Comparação entre critérios de controle de estacas cravadas. Geotecnia, n. 149, p. 3-16, 2020.

TANDJIRIA, V.; TEH, C. I.; LOW, B. K. Reliability analysis of laterally loaded piles using response surface methods. Structural safety, v. 22, n. 4, p. 335-355, 2000.

TANG, C; PHOON, K. Statistical evaluation of model factors in reliability calibration of high-displacement helical piles under axial loading. Canadian Geotechnical Journal, v. 57, n. 2, p. 246-262, 2020.

TEIXEIRA, A.; CORREIA, A. G.; HENRIQUES, A. A.; HONJO, Y. Dimensionamento e avaliação da segurança de uma estaca com carga vertical baseado em análises de fiabilidade. Revista Engenharia Civil-Universidade do Minho, p. 41-58. 2012. 2012.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Introduction to Probability and Reliability Methods for use in Geotechnical Engineering. Washington, DC: DEPARTMENT OF THE ARMY, 1997.

WANG, Y. Closure to "Reliability-Based Economic Design Optimization of Spread Foundations" by Yu Wang. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 137, n. 4, p. 450-450, 2011.

ZHANG, X.; JIAO, B.; HOU, B. Reliability analysis of horizontally loaded pile considering spatial variability of soil parameters. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 143, p. 106648, 2021.