

Implementação e Cálculo da Escala de Flutuação e caracterização estatística em ensaios SPT e CPT

Fernando Pinheiro Weber

Engenheiro de projetos, UFSC/Vibra Energia, Porto Alegre/RS, Brasil, fp_weber@yahoo.com.br

Tamires dos Santos

Graduanda, UFSC, Florianópolis, Brasil, tamires.frutuoso@gmail.com

Arthur Felisbino Phelippe

Graduando, UFSC, Florianópolis, Brasil, arthur.phelippe1@gmail.com

Cláudio Cesar Zimmermann

Prof. Dr. Docente/Pesquisador, UFSC, Florianópolis, Brasil, claudio.ufsc@gmail.com

Gracieli Dienstmann

Prof. Dra. Docente/Pesquisadora, UFSC, Florianópolis, Brasil, g.dienstmann@ufsc.br

RESUMO: O presente artigo visa definir a variabilidade geotécnica utilizando os dados obtidos através de ensaios de sondagens de simples reconhecimento (SPT) e ensaio de cone (CPT) executados em um depósito de solos moles da região portuária de Itajaí. Foram utilizadas sondagens SPT executadas até profundidades médias de 45 m e ensaios CPT executadas até 50 m. Para a execução desta análise foi utilizado a linguagem de programação python e algumas de suas bibliotecas como o scipy, numpy e pandas com o intuito de automatizar os cálculos de análise para a obtenção das medidas estatísticas básicas, análise de aderência da função densidade de probabilidade e escala de flutuação vertical. Serão avaliados e utilizados para cálculo os parâmetros básicos de cada sondagem (N_{spt} , q_c , f_s). O objetivo é encontrar os valores de média, desvio padrão, escala de flutuação e coeficiente de variação dos dois ensaios para caracterização estatística e comparativo entre métodos. O conjunto de informações caracterizado poderá alimentar futuras análises de confiabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: SPT, CPT, Escala de Flutuação, Python

ABSTRACT: The objective of this article is to define geotechnical variability using data obtained through Standard Penetration Test (SPT) and Cone Penetration Test (CPT) carried out in soft soil deposit in the region of Itajaí/SC. The SPT were executed in the average it's in a deep of 45 meters and the CPT carried out in a deep of 50 meters approximately. For the analysis Python programming language and some of these libraries were used, such as spicy, numpy and pandas, with the aim of automating statical analysis calculations to obtain basic statical measurements, analysis of adherence of the probability density function and the fluctuation scale. The basic parameters of each test (N_{spt} , q_c , f_s) will be evaluated and used for calculation. The objective is to find the mean, standard deviation, fluctuation scale and coefficient of variation values of the two tests for statistical characterization and comparison between methods. The characterized set of information can feed future reliability analyzes.

KEYWORDS: SPT, CPT, scale of fluctuation, Python

1 INTRODUÇÃO

É bastante natural a interpretação de que as propriedades dos solos se modificam no próprio local, tanto verticalmente como também na horizontal do maciço. Assim caracteriza-se de forma mais ampla a incerteza e a variabilidade envolvida na geotecnia. (Cao *et. al* 2017). Vanmarcke (1977, 1983) desenvolveram a teoria do campo aleatório *Random Field Model* (RFM) para caracterizar a variabilidade de materiais geotécnicos, pela qual a correlação de uma propriedade do solo em locais diferentes (autocorrelação) é levada em consideração racionalmente. No contexto dos campos aleatórios, uma propriedade de solo dentro de uma camada homogênea é descrita por uma série de variáveis aleatórias com a mesma média e desvio padrão e a autocorrelação entre essas variáveis aleatórias depende do comprimento da correlação, conhecido como escala de flutuação.

Pospescu *et. al* (1997), executaram análises probabilísticas de elementos finitos utilizando dados de ensaios SPT e CPT para caracterizar a variabilidade do solo e explorar a sua influência sobre a geração do excesso de poropressão. Uzielli *et. al* (2005) desenvolveram simulações numéricas para análise de parâmetros com RFEM utilizando como base para caracterização estatística ensaios de piezocone.

O objetivo desta pesquisa é fornecer a caracterização detalhada da variabilidade espacial com a profundidade da região de estudo utilizando ensaios SPT e CPT. Ambos tem a premissa de caracterizar a estratigrafia do terreno, porém, com resultados e interpretações diferentes. Será realizado um comparativo entre a caracterização estatística obtida pelos diferentes ensaios com ênfase na análise da escala de flutuação determinada pelo método da função de autocorrelação da amostra (AMA), além de dados resultantes da estatística descritiva em comparação com funções densidade de probabilidade teóricas (PDFs).

2 METODOLOGIA

2.1 Referencial teórico

Como já mencionado, as incertezas na obtenção de propriedades de mecânica dos solo são intrínsecas a geotecnia. De acordo com Phoon *et. al* (1999), a variação espacial pode ser convenientemente decomposta em uma função de tendência $t(z)$ e um componente flutuante $w(z)$, figura 1, ambas as componentes variando com a profundidade, podendo ser descrita conforme a equação 1.

$$\xi(z) = t(z) + w(z) \quad (1)$$

Em que:

ξ = parâmetro do solo a ser modelado;

z = profundidade;

$t(z)$ = função de tendência de z ;

$w(z)$ = Componente flutuante, caracterizado estatisticamente por uma variável aleatória;

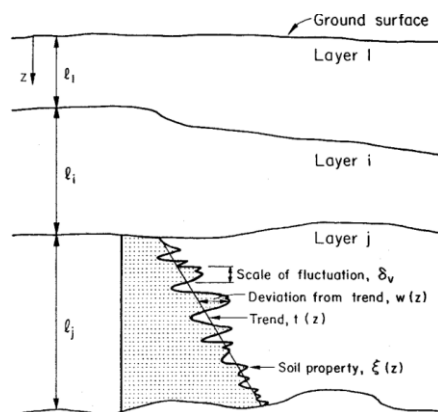


Figura 1. Variabilidade característica do solo. Fonte: Phoon, K.K.; Kulhawy F.H., 1999

Para início de tratamento dos dados será realizada a análise descritivas com os dados disponíveis englobando medidas de tendência central (média) e de dispersão como desvio padrão e coeficiente de variação, calculado conforme equação 2.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [w(z_i)]^2} \quad (2)$$

Onde:

n = número de dados disponíveis;

$w(z_i)$ = componente flutuante na profundidade z ;

O desvio padrão pode ser normalizado em função da tendência com a profundidade (tz) criando uma medida adimensional conforme equação 3.

$$COV = \frac{\sigma}{t} \quad (3)$$

Onde:

COV = coeficiente de variação;

σ = desvio padrão;

t = média da tendência da propriedade do solo;

Para medida de autocorrelação espacial de dados diferentes, formulações estatísticas podem ser utilizadas, como a autocorrelação e a covariância, ambas as medidas são caracterizadas em função da distância entre dois pontos. Para a obtenção da autocorrelação é necessário o cálculo da covariância, equação 4, em função da distância τ_j equação 5.

$$C(\tau_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-j+1} (x_i - \mu_x)(x_{i+j-1} - \mu_x) \quad (4)$$

Onde:

$C(\tau_j)$ = covariância;

n = número de pontos onde o parâmetro $X = X(z)$ assume valor;

x_i = valor do parâmetro “X” na profundidade z ;

μ_x = média;

j = valor inteiro que varia de 1 a n em função da distância de separação τ_j ;

$$\tau_j = (j - 1)\Delta_z \quad (5)$$

Onde:

Δ_z = distância mínima entre pontos consecutivos;

j = valor inteiro que varia de 1 a n em função da distância de separação τ_j ;

τ_j = distância de separação entre dois pontos x_i e x_{i+j-1} ;

Calculada a covariância da amostra a autocorrelação pode ser determinada:

$$\rho(\tau_j) = \frac{C(\tau_j)}{C(\tau_1)} \quad (6)$$

Onde:

$\rho(\tau_j)$ = Auto correlação da amostra

$C(\tau_1)$ = covariância para a distância de separação nula.

Com base na autocorelação (ρ) plotada em relação a distância de separação entre pontos, pode ser determinada a escala de flutuação, ou comprimento de correlação. A escala de flutuação indica a distância dentro da qual a propriedade do solo apresenta forte correlação (Phoon *et. al*, 1999). Para Uzielli *et. al* (2006) o valor da escala de flutuação pode ser calculado a partir de modelos teóricos de autocorrelação, identificando assim o modelo que melhor se ajusta as dados de campo caracterizados pela Equação 6. Este tipo de modelo para o cálculo da escala é chamado de Adequação do modelo de Autocorrelação (AMA) o qual será empregado neste trabalho. Os modelos mais encontrados na literatura geotécnica são o exponencial, exponencial quadrático, cosseno exponencial e Markov de segunda-ordem. As funções de autocorrelação podem ser observados na tabela 1 em que τ é a distância de separação e δ é a escala de flutuação. Um exemplo de aplicação dos modelos AMA considerando leituras de resistência de ponta de ensaios de piezocone, pode ser observado na Figura 2, de Perini (2019). A escala de flutuação caracterizada pela autora foi de 0,20m pelo método AMA e de 0,18m considerando o método IAA- Integração da Função de Autocorrelação. Esse último não será abordado no trabalho.

Modelo	Função de Autocorrelação
Exponencial	$\rho(\tau) = \exp\left(-\frac{2 \tau }{\delta}\right)$
Exponencial quadrático	$\rho(\tau) = \exp\left(-\pi\left(\frac{\tau}{\delta}\right)^2\right)$
Cosseno exponencial	$\rho(\tau) = \cos\left(\frac{\tau}{\delta}\right) \exp\left(-\frac{ \tau }{\delta}\right)$
Markov de segunda ordem	$\rho(\tau) = \left(1 + \frac{4 \tau }{\delta}\right) \exp\left(-\frac{4 \tau }{\delta}\right)$

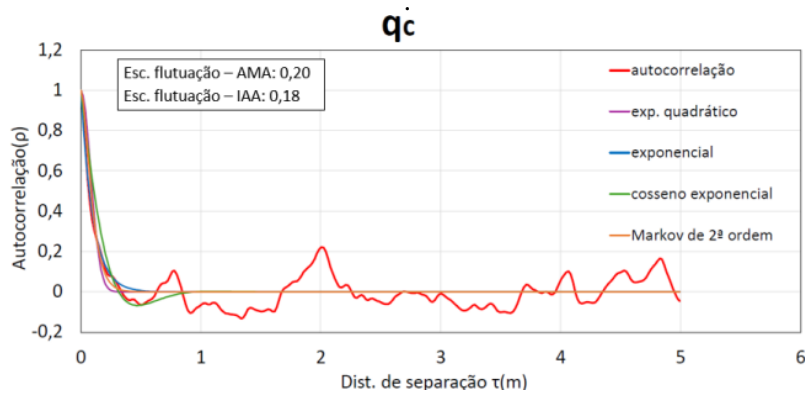


Figura 2 - Exemplo escala de flutuação através da plotagem de autocorrelação da amostra com diferentes modelos. Fonte: Perini (2019)

2.2 Materiais e métodos

Os ensaios foram realizados em uma região portuária situada junto a margem direita, sentido foz do rio Itajaí-Açu, região portuária do município de Itajaí localizado no estado de Santa Catarina. A figura 3a indica o local de realização dos ensaios de forma mais ampla, mostrando todo o município e o canal de navegação. Na figura 3b estão locados os pontos de SPT e CPT.



Figura 3. (a) Cidade de Itajaí/SC, (b) Locação dos pontos de sondagem SPT e CPT. Fonte: Google Maps (2022)

No total foram realizados 6 ensaios do tipo CPT e 3 sondagens SPT, a figura 4 mostra a compilação dos resultados de sondagens SPT, estabelecendo uma ideia de estatigrafia do terreno. Para melhor análise o perfil do terreno foi dividido em 4 camadas com objetivo de realizar um melhor tratamento de dados devido a camadas intercaladas de areia e argila. A camada 1 foi até a profundidade de -12 metros, camada 2 de -12 a -17 metros, camada 3 -17 a -37 metros e camada 4 de -37 a -50 metros. Percebe-se um perfil bastante

estratificado, formado com camadas de solo argiloso intercaladas com camadas de solo arenoso com diferentes espessuras. Os primeiros metros são formados por uma camada de argila mole, seguido de horizontes mais arenosos quando ocorre um aumento a penetração (CPT e SPT) e reduz quando se atinge novamente o substrato de argila. Próximo ao impenetrável volta a ser arenoso, atingindo o impenetrável a aproximadamente 49 metros.

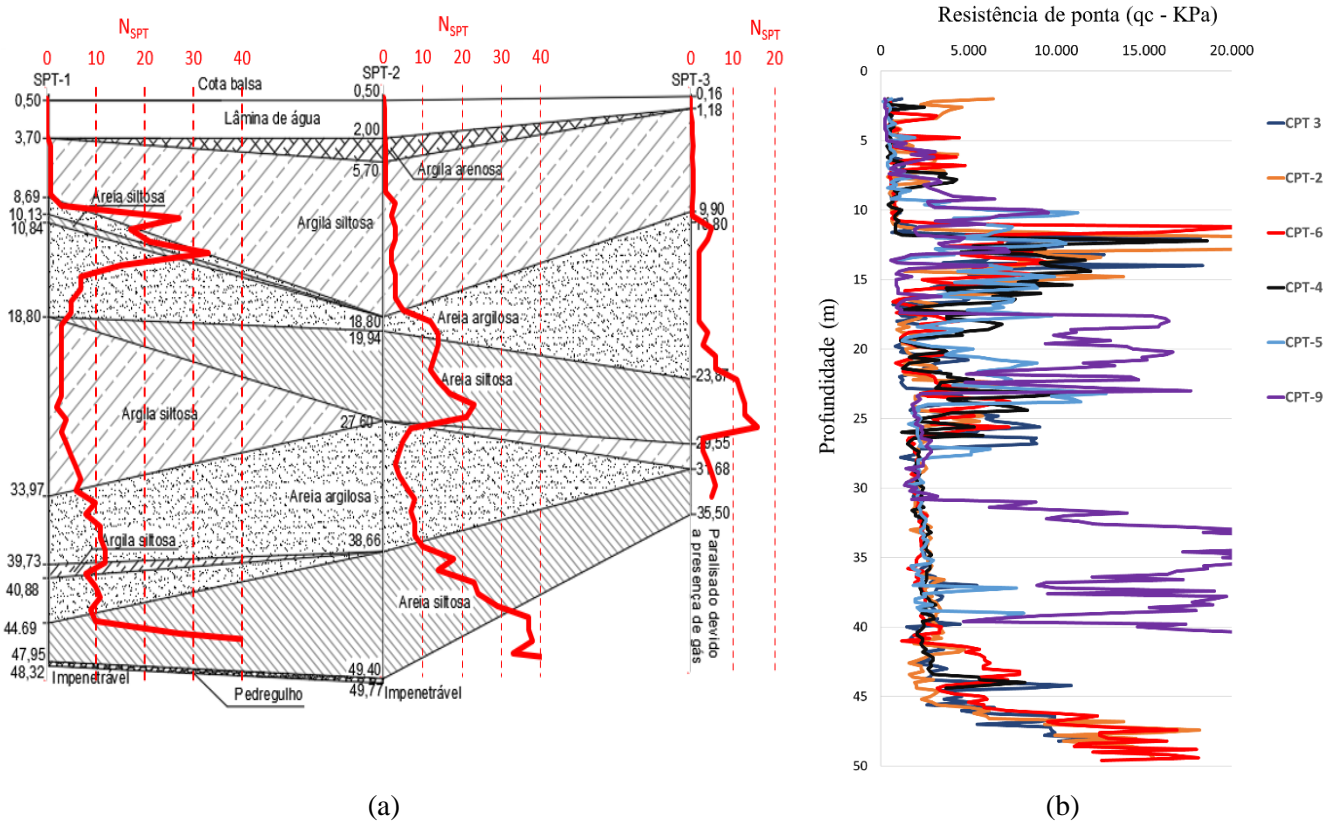


Figura 4. (a) Perfil estatigráfico estimados através de sondagens de SPT, (b) gráfico da resistência de ponta (qc) CPT na margem do canal do rio Itajaí-Açu. Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Média, desvio padrão, coeficiente de variação e escala de flutuação

A tabela 2 consolida os resultados gerais de média, desvio padrão, coeficiente de variação e escala de flutuação nos ensaios de CPT. A caracterização estatística foi realizada após a definição de camadas características, de acordo com o descrito no item 3, e Figura 2. A comparação de resultados com a literatura é bastante complexa, podemos citar Perini (2019) e Campelo (2020).

Tabela 2 – Valores estimados de média, desvio padrão, COV e escala de flutuação – CPT

Ensaio	qc (KPa)				fs (KPa)			
	Média	Desvio Padrão	COV	Escala Flutuação	Média	Desvio Padrão	COV	Escala Flutuação
CPT 3								
Camada 1	865,99	315,94	0,36	0,56	31,47	14,44	0,45	0,38
Camada 2	7055,60	4171,71	0,59	0,50	109,61	65,65	0,59	0,25
Camada 3	2898,16	1610,59	0,55	2,35	91,75	46,36	0,51	2,62

Camada 4	7137,39	3001,91	0,42	7,89	162,64	84,01	0,52	0,83
CPT 5								
Camada 1	1761,04	1400,70	0,79	0,98	125,47	33,68	0,55	0,52
Camada 2	10836,00	8126,02	0,74	3,41	242,50	189,95	0,78	3,59
Camada 3	2597,06	974,39	0,37	1,11	107,43	47,85	0,44	4,91
Camada 4	8580,35	5530,16	0,64	14,39	216,04	155,64	0,72	6,31
CPT 6								
Camada 1	2021,25	3881,16	1,92	0,52	53,82	53,01	0,98	0,56
Camada 2	5810,00	3252,38	0,55	1,82	113,54	66,90	0,58	1,64
Camada 3	2859,12	1511,82	0,23	2,67	118,29	76,45	0,64	5,39
Camada 4	10006,00	4530,81	0,45	19,89	322,00	154,79	0,48	8,25
CPT 7								
Camada 1	1050,42	990,74	0,94	0,93	40,33	24,40	0,61	0,33
Camada 2	8222,80	3781,86	0,45	0,71	136,03	105,07	0,77	0,52
Camada 3	3052,00	1586,90	0,51	2,05	100,89	47,64	0,47	1,06
Camada 4	5860,00	1842,55	0,31	5,91	188,03	77,45	0,41	6,27
CPT 8								
Camada 1	1927,29	2624,85	1,36	1,68	68,26	51,54	0,75	1,69
Camada 2	5570,40	2847,37	0,49	1,20	89,20	52,11	0,58	1,27
Camada 3	3785,40	2584,02	0,68	3,45	120,93	71,55	0,59	2,42
Camada 4	3826,67	2402,52	0,62	3,61	118,59	130,02	1,09	2,27
CPT 9								
Camada 1	2251,04	2324,42	1,03	2,70	44,14	33,47	0,75	1,04
Camada 2	2450,00	2033,28	0,83	1,61	62,26	35,17	0,56	0,88
Camada 3	9102,08	7219,28	0,79	4,70	237,21	172,46	0,72	3,53
Camada 4	14308,50	5008,44	0,35	3,40	303,78	145,96	0,48	1,99

A tabela 3 resume os valores obtidos nas análises das sondagens SPT. Verifica-se que a escala de flutuação pelo ensaio SPT apresentou uma variação de 0,82 a 8,52m, de forma geral valores superiores aos obtidos pelo ensaios CPT. Em estudo comparativo entre SPT e CPT, Huang *et. al* (2022) também encontraram escalas de flutuação maiores nos ensaios SPT. De fato a distância de medidas do ensaio a cada metro implica em uma menor capacidade do ensaio em estabelecer de forma adequada a distância de correlação. No entanto, para o local de estudo os valores mostraram-se de certa forma condizentes.

Tabela 3 – Valores estimados de média, desvio padrão, COV e escala de flutuação - SPT

Ensaio	Nspt Média	Desvio Padrão	COV	Escala Flutuação
SPT 01				
Camada 1	1,00	1,00	1,00	2,21
Camada 2	18,1	9,7	0,54	1,27
Camada 3	6,2	3,4	0,55	8,52
Camada 4	40,8	27,8	0,68	1,21
SPT 02				
Camada 1	0,4	0,2	0,46	2,21
Camada 2	2,9	0,9	0,30	1,1
Camada 3	10,5	5,58	0,53	3,52
Camada 4	38,5	9,7	0,25	0,82

SPT 03				
Camada 1	0,5	0,1	0,22	1,38
Camada 2	3,2	1,6	0,49	2,23
Camada 3	8,3	4,8	0,58	2,49

4.1 Análise das funções de densidade de probabilidade (PDF)

Para todos os ensaios, SPT e CPT, foram plotados gráficos de distribuição de densidade para verificar a distribuição dos dados coletados, adicionalmente foram simuladas curvas de distribuição normal, lognormal, exponencial, gamma e weibull conforme figura 5. Da mesma forma, gráficos do tipo quantis-quantis (Q-Q) foram plotados para melhor visualização de associação entre variáveis com o objetivo de verificar se os valores mais baixos, médios e mais altos de “x” estão relacionados aos seus correspondentes de “y”, o afastamento da linearidade representa a diferença entre as distribuições “x” e “y”, figura 6. As figuras são representativas de resultados típicos.

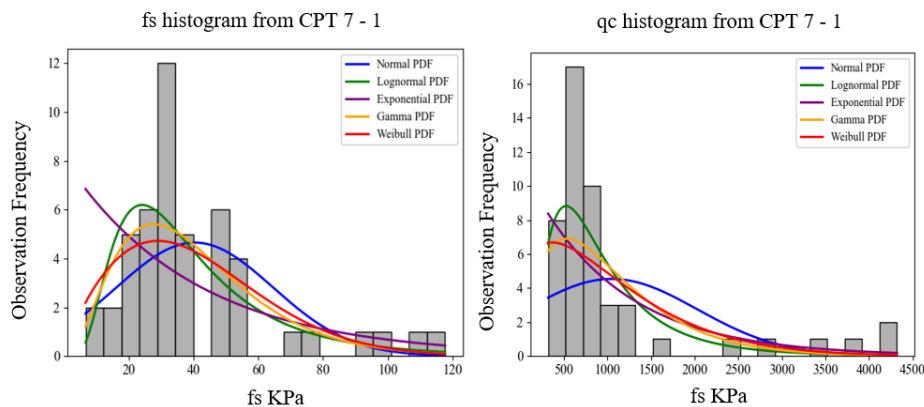


Figura 5. Distribuição de densidade para ensaio CPT 7 para qc e fs, distribuição normal e lognormal. Fonte: Autoria própria

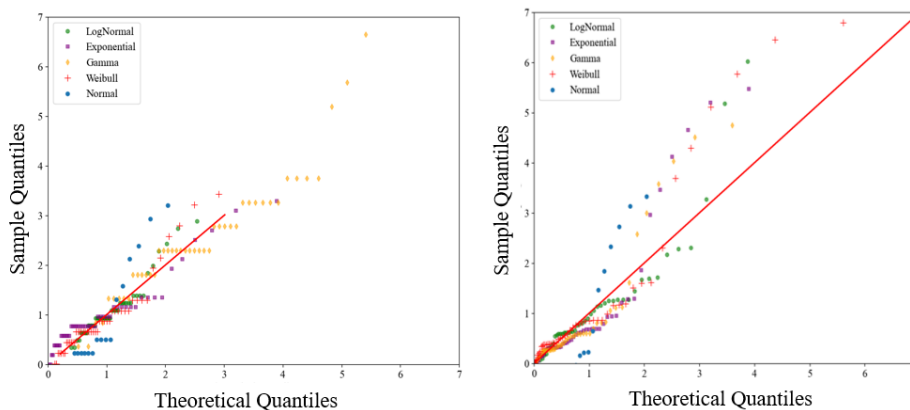


Figura 6. Gráfico Q-Q para distribuição do parâmetro qc, CPT 07. Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

Compilando os resultados, a variação da escala de flutuação para o CPT quando retirado os valores discrepantes da análise, especialmente alguns da camada 4 quando o ensaio está indo para o limite, o resultado para COV ficou entre 0,36 e 1,36. Para a escala de flutuação o valor varia de 0,36 a 4,70 ambos para o qc. Para o fs o COV variou de 0,45 a 1,09 enquanto a escala de flutuação teve variação de 0,38 a 5,39. Na análise de SPT o COV ficou entre 0,22 e 1,30. Para a escala de flutuação os valores variam de 1,27 e 8,52. Os resultados

corroboram o estudo realizado por Huang *et. al* (2022), pois indicam uma maior acurácia na escala de flutuação do CPT em relação ao SPT, devido ao espaçamento entre leituras de cada ensaio. Outro ponto importante de mencionar é o COV entre as camadas de SPT, exemplo a camada 2 que varia de 0,22 a 1,00 indicando um terreno bastante heterogêneo. De forma geral, o conjunto de resultados apresentado no presente trabalho pode ser utilizado em trabalhos futuros para os solos da mesma região, indicando a validade da utilização da distribuição log-normal. Tendo em vista que a incerteza está presente de maneira natural na geotecnia a introdução destes índices em análises probabilísticas está alinhada com a necessidade de projetos cada vez mais inseridos no “Reability-Base Design”, baseados em confiabilidade e na probabilidade de falha da estrutura e não apenas concebidos por coeficientes determinísticos o que pode ser um erro, inclusive contrário a segurança, especialmente em terrenos com COV elevados na qual a estatigrafia não é homogênea.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é resultado do grupo de pesquisa em engenharia geotécnica (GESEG) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campelo, I.C.; (2020). *Abordagem probabilística aplicada ao estudo da variabilidade geotécnica dos solos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia e Transportes, área de concentração geotecnia, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais / UFMG, 158p.
- Cao, Z.; Wang Y.; Li, D.; *Probabilistic Approaches for Geotechnical Site Characterization and Slope Stability Analysis*. Springer, ISBN 978-3-662-52912-6. DOI 10.100/978-3-662-52914-0
- Carvalho, L.O.; Riveiro, D.B.; A multiple model machine learning approach for soil classification from cone penetration test data. *Soils and Rocks*. V. 44(4).
- Huang, W., Dijkstra, T., Loveridge, F., Hughes, P., Blake, A. P., Dobbs, M., & Trinidad Gonzalez, Y. (2022). Spatial Variability of London Clay Using CPT and SPT Data. *Proceedings of the 8th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, doi: 10.3850/978-981-18-5182-7_03-015-cd
- Perini, L. (2021). *Caracterização da variabilidade de rejeitos de mineração de ouro e sua influência na análise do efeito da velocidade no ensaio CPTu*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, área de concentração geotecnia e infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina / UFSC, 157 p.
- Popescu, R., Prevost, J.H., Deodatis, G. (1997). Effects of spatial variability on soil liquefaction: *Geotechnique*, v. 55(1).
- Phoon, K.-K. and F. H. Kulhawy. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal* 36 (4):612–24. doi:10.1139/t99-038
- Uzielli, M.; Lacasse, S.; Nadim, F.; Phoon, K. (2006). Soil variability analysis for geotechnical practice. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore*. DOI: 10.1201/NOE0415426916.ch3
- Vanmarcke, E.H. (1977). Probabilistic Modeling of soil Profiles. *Journal of Geotechnical Engineering*. v103 (11).
- Vanmarcke, E.H. (1983). *Random Fields: Analysis and Synthesis*. Cambridge: M.I.T.