

Análise da variabilidade espacial vertical inerente de um depósito sedimentar marinho por meio de ensaios SPT

Henrique Milan
PPGEC, UFSC, Florianópolis, Brasil, henriquefmilan@gmail.com

Gracieli Dienstmann
PPGEC, UFSC, Florianópolis, Brasil, g.dienstmann@ufsc.br

Lucas Quiocca Zampieri
PPGEC, UFSC, Florianópolis, Brasil, lqzampieri@gmail.com

Artur Machado Scheidt
PET/ECV, UFSC, Florianópolis, Brasil, arturmachadoscheidt@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho aborda a caracterização da variabilidade espacial vertical de um depósito sedimentar marinho por meio de ensaios SPT realizados em duas localidades distintas dentro da mesma unidade litológica no município de Florianópolis, Brasil. O objetivo foi investigar a heterogeneidade e a distribuição das propriedades verticais do solo, aplicando uma análise estatística dos valores N_{SPT} normalizados pela profundidade para uma base de dados de 40 ensaios. Os resultados indicaram uma alta variabilidade dos materiais, com diferenças significativas entre as localidades, evidenciadas por meio de médias, desvios padrão, coeficientes de variação e pelo comprimento vertical de correlação espacial (SCL). Os SCL das duas localidades foram encontrados pelos métodos de Integração da função de Autocorrelação da Amostra (IAA) e da Adequação do Modelo de Autocorrelação (TAM), resultando em $3,05 \pm 0,62$ metros para o Site 1 e $1,95 \pm 0,60$ metros para o Site 2. A pesquisa destaca a importância de considerar a variabilidade espacial vertical na avaliação geotécnica, contribuindo para a compreensão do comprimento de correlação espacial vertical de um solo local tipicamente encontrado em ambientes sedimentares marinhos da região.

PALAVRAS-CHAVE: comprimento de correlação espacial; variabilidade espacial vertical; ensaio de penetração padrão; solos sedimentares

ABSTRACT: This study addresses the characterization of the vertical spatial variability of a marine sedimentary reservoir through SPT tests carried out in two different locations within the same lithological unit in the municipality of Florianópolis, Brazil. The objective was to investigate the heterogeneity and distribution of vertical soil properties, applying a statistical analysis of N_{SPT} values normalized by depth to a database of 40 tests. The results indicated a high variability of materials, with important differences between locations, evidenced through means, standard deviations, coefficients of variation and the vertical spatial dispersion length (SCL). The SCL of the two locations were found by the IAA and TAM methods, resulting in 3.05 ± 0.62 meters for Site 1 and 1.95 ± 0.60 meters for Site 2. The research highlights the importance of considering variability vertical spatial brightness in geotechnical assessment, contributing to the understanding of the vertical spatial brightness length of a local soil typically found in marine sedimentary environments in the region.

KEYWORDS: spatial correlation length; vertical spatial variability; standard penetration test; sedimentary soils

1 INTRODUÇÃO

Phoon e Kulhawy (1999) classificam as fontes de incerteza em geotecnia em três grandes grupos de influência: Grupo (i) variabilidade espacial inerente - definida por processos geológicos naturais de formação que produzem e continuamente modificam a massa do solo *in situ*; Grupo (ii) variabilidade devido à incerteza de medidas - estatística associada ao nível de investigação de campo, tanto relacionada a representatividade da investigação, como aquela causada por má calibração de equipamentos, e procedimentos do operador e de

ensaios; e Grupo (iii) incerteza relacionada à transformação de modelos - fonte de incerteza que é introduzida quando medidas de campo ou de laboratório são transformadas em parâmetros de projeto usando modelos baseados em correlações empíricas e/ou numéricas.

Frente as incertezas, a adoção de modelos probabilísticos que consideram a variação espacial das propriedades do solo tem ganhado destaque em aplicações geotécnicas, em especial em análises probabilísticas de taludes, estruturas de contenção, capacidade de carga de fundações rasas e profundas (Phoon *et al.* 2022).

Uma série de pesquisas realizadas ao longo das últimas décadas (Phoon *et al.*, 1995; Uzielli *et al.*, 2006; Kenarsari *et al.*, 2013; Salgado *et al.*, 2015, De Gast *et al.*, 2021) sugere que para caracterizar a variabilidade espacial do solo é necessário determinar um valor médio para o parâmetro em questão, calcular uma métrica de dispersão dos valores (coeficiente de variação - COV) e analisar a estrutura de correlação espacial. Essa estrutura inclui a distância de autocorrelação e a função de autocorrelação correspondente. Esses parâmetros estão relacionados à semelhança observada entre as características do solo em diferentes pontos de observação. Essa semelhança é quantificada pela distância de autocorrelação, também conhecida como escala de flutuação, que mede até que ponto as propriedades do solo estão fortemente correlacionadas (Vanmarcke, 1977). Por sua vez, a função de autocorrelação descreve como a correlação entre os pontos de observação diminui à medida que a distância entre eles aumenta.

A variabilidade espacial pode ser caracterizada pelo Comprimento de Correlação Espacial Vertical (SCL) e pela Escala de Flutuação (SoF), que é uma medida da distância sobre a qual os parâmetros característicos de um solo são similares ou correlacionados (Huang, 2022). Neste estudo, será adotada a nomenclatura da primeira (SCL), conforme utilização de Oguz *et al.* (2019).

Investigações geotécnicas contemporâneas têm priorizado a análise da variabilidade espacial do solo, com foco extensivo em ensaios de penetração de cone, especialmente em contextos de rejeitos de mineração (Perini, 2021; Becker *et al.*, 2024), solos *offshore* (Overgard, 2015, Liu *et al.*, 2015) e solos de típicos de bacias sedimentares (Bouayad, 2017). No entanto, apesar da predominância do ensaio de penetração padrão (SPT) na prática geotécnica brasileira, existe uma lacuna significativa na literatura quanto à avaliação da variabilidade espacial baseada em resultados de SPT. Pesquisadores como Huang *et al.* (2022) conduziram pesquisas para definir a variabilidade espacial do solo com base em dois lugares no centro de Londres, empregando tanto o CPT quanto o SPT. Oguz *et al.* (2019), por sua vez, investigaram o SCL em solos ao longo da costa sul da Turquia, utilizando dados de N_{SPT} e aplicando quatro métodos de autocovariância, com o qual determinaram um SCL médio para os materiais estudados.

Nesse contexto, esta pesquisa visa proporcionar uma caracterização detalhada da variabilidade espacial vertical de um depósito sedimentar marinho praiado em Florianópolis, Brasil, através da caracterização do comprimento de correlação espacial com base em ensaios SPT. Serão avaliados diferentes métodos: Método da Integração da Função de Autocorrelação da Amostra (IAA) e de Adequação do Modelo Teórico de Autocorrelação (TAM).

2 MODELAGEM DO ESTUDO DA VARIABILIDADE E INCERTEZAS INERENTES NAS PROPRIEDADES DO SOLO

A variabilidade das propriedades dos solos costuma ser mais pronunciada na vertical do que na horizontal, uma característica frequentemente atribuída à ação uniforme de processos geológicos em determinadas camadas. Por essa razão, a variabilidade horizontal frequentemente é desconsiderada, optando-se por representar uma propriedade do solo em uma elevação específica por um valor único, conforme discutido por Cao *et al.* (2017). Além disso, a escassez de dados com distâncias significativamente curtas no perfil horizontal também dificulta a análise nesta dimensão. Nesse contexto, Uzielli *et al.* (2006) enfatizam a importância de realizar o cálculo da escala de flutuação dentro de um único depósito geológico para garantir a precisão dos resultados.

Segundo Phoon *et al.* (1995), a variabilidade inerente do solo no perfil vertical pode ser descrita pela equação 1.

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

onde, $\xi(z)$ é o parâmetro geotécnico a ser modelado, $t(z)$ é a componente de tendência e $w(z)$ é a componente de flutuação, ou ruído. A componente de ruído ou flutuação pode ser modelada a partir de características

estatísticas básicas como média (μ) e desvio padrão (σ), PDF associada (normal, Lognormal), e estrutura de correlação. A estrutura de correlação pode ser modelada pelo comprimento de correlação espacial vertical (SLC), conceito proposto pela primeira vez por Vanmarcke (1977). O SLC, juntamente com a função de autocorrelação, é características da estrutura de correlação espacial de uma propriedade. Sendo a primeira, uma informação relacionada à magnitude da correlação espacial, já a segunda descreve como essa correlação entre pontos diminui com a distância de separação. Em outras palavras, conforme a distância de separação aumenta, a função de autocorrelação tende a zero.

Desde a introdução do conceito por Vanmarcke (1977), o SLC tem sido abordado por diferentes autores demonstrando metodologias distintas para o seu cálculo (e.g., Kenarsari *et al.*, 2013; Nie *et al.*, 2015; Salgado *et al.*, 2015), dentre os quais destacam-se: o método de Integração da função de Autocorrelação da Amostra (IAA) e da Adequação do Modelo de Autocorrelação (TAM).

O método de Integração da Autocorrelação da Amostra (IAA), desenvolvido por Vanmarcke (1983), propõe que a área sob a curva da função de autocorrelação da amostra corresponde ao comprimento da correlação espacial. A autocorrelação de uma amostra é uma medida estatística que depende da distância entre dois pontos e quantifica a intensidade da correlação entre valores igualmente espaçados. Para calcular a autocorrelação da amostra, é necessário primeiro determinar a covariância entre os valores dessa variável em pontos separados por uma distância constante na Equação (2). Em seguida, a autocorrelação é calculada ao normalizar a covariância pela covariância no ponto zero, ou seja, a variância dos dados, Equação (3). Ao aplicar esse cálculo a todos os pares de pontos separados pela distância de separação (τ_j) na série de dados, obtém-se a função de autocorrelação que descreve como a correlação entre os valores da variável varia à medida que a distância entre os pontos de medição aumenta. A distância de separação pode ser calculada usando a Equação (4).

$$C(\tau_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-j} (X_i - \mu_X)(X_{i+j} - \mu_X) \quad (2)$$

Onde:

$C(\tau_j)$ = covariância

n = número de pontos onde o parâmetro $X = X(z)$ tem valores

x_i = valor do parâmetro X na profundidade z_i

μ_X = média de todos os valores de X

j = um número inteiro que varia de 1 a n e está relacionado a distância de separação τ_j

$$\rho(\tau_j) = \frac{C(\tau_j)}{C(\tau_1)} \quad (3)$$

Onde:

$\rho(\tau_j)$ = autocorrelação da amostra

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

$$\tau_j = (j - 1)\Delta z \quad (4)$$

Onde:

Δz = mínima distância entre pontos consecutivos

τ_j = distância de separação entre os pontos x_i e x_{i+j} .

De acordo com essa técnica, que é corroborada por Salgado *et al.* (2019), o SLC (δ) pode ser estimado como o dobro da área sob a curva da parte positiva da função de autocorrelação da amostra (ρ), esta última obtida empiricamente, e é representada pela Equação (5).

$$\delta = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho d\tau = 2 \int_0^{+\infty} \rho d\pi \quad (5)$$

Para o método de Adequação do Modelo Teórico de Autocorrelação (TAM), Uzielli *et al.* (2006) descreve que o comprimento de correlação espacial vertical pode ser determinado ajustando-se modelos teóricos de autocorrelação à função de autocorrelação de amostra obtida de maneira empírica. Ao identificar qual modelo teórico se adapta melhor à função empírica, o comprimento de correlação espacial vertical pode ser deduzido através da relação analítica entre a função de autocorrelação teórica e o próprio comprimento de

correlação espacial vertical, como demonstrado nas relações da Tabela 1, onde τ representa a distância de separação e δ o comprimento de correlação espacial vertical. Conforme discutido por Spry *et al.* (1988), como citado por Uzielli *et al.* (2006) e Kenarsari *et al.* (2013), não há um modelo de autocorrelação que se destaque incontestavelmente em relação aos demais.

Tabela 1: Modelos teóricos de Autocorrelação

TAM	Função de Autocorrelação
Exponencial (Exponential)	$\rho(\tau) = \exp\left(-\frac{2 \tau }{\delta}\right)$
Exponencial quadrática (Squared Exponential)	$\rho(\tau) = \exp\left(-\pi\left(\frac{\tau}{\delta}\right)^2\right)$
Cosseno exponencial (Cosine Exponential)	$\rho(\tau) = \cos\left(\frac{\tau}{\delta}\right) \exp\left(-\frac{ \tau }{\delta}\right)$
Segunda ordem Markov (Second Order Markov)	$\rho(\tau) = \left(1 + \frac{4 \tau }{\delta}\right) \exp\left(-\frac{4 \tau }{\delta}\right)$

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição dos Sites

A caracterização da variabilidade avaliada é referente a ensaios SPT executados em dois locais distintos na cidade de Florianópolis, SC, separados por aproximadamente 5 km. As áreas de estudo são destinadas à construção de edifícios residenciais de alto padrão e compartilham a mesma formação litológica. De acordo com o mapeamento geológico de Tomazzoli (2014), ambas as áreas estão classificadas como depósito sedimentar marinho praiado do período Pleistoceno (PIMp). A interpretação litossedimentológica indica a presença de sedimentos arenosos e de textura variada originados de processos marinhos. As informações do mapeamento convergem com as descrições dos relatórios dos ensaios executados. A Figura 1 ilustra as localizações aproximadas dos Sites 1 e 2.



Figura 1: Localização dos Sites 1 e 2.

Neste estudo, examinamos 40 sondagens de ensaios SPT, divididas em dois grupos de 20 ensaios por localidade. A quantidade de medições variou entre os locais e os furos. Utilizamos as 15 primeiras medições para a localidade 1 (Site 1) e 17 medições para a segunda localidade (Site 2).

Cada medição corresponde a 1 metro de profundidade. É importante ressaltar que as diferenças de altitude entre os topos dos furos de sondagem na mesma área são mínimas e, por isso, foram desconsideradas na análise. Além disso, não levamos em conta o conceito de correção de energia de cravação do equipamento de amostragem nas avaliações.

3.2 Metodologia de Análise

A análise da variabilidade para o depósito sedimentar foi conduzida através da avaliação dos parâmetros coletados diretamente pelos ensaios de campo: variável do número de golpes necessário (N_{SPT}) para penetrar os últimos 30 cm de cada estrato normalizado pela profundidade de cada camada.

Para cada conjunto de dados normalizados, procedeu-se a uma análise estatística detalhada que incluiu o cálculo da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação (COV). Após a análise da variabilidade das camadas, definiu-se as camadas mais homogêneas para estimar a função de autocorrelação e do correspondente comprimento de correlação espacial vertical por meio do Método de Integração da Autocorrelação da Amostra (IAA) e do Método Teórico de Ajuste de Modelo (TAM).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Média, Desvio Padrão e Covariância dos Parâmetros

Os gráficos da Figura 2 mostram os valores médios de N_{SPT} por camada em duas localidades diferentes, Site 1 e Site 2. Os resultados de N_{SPT} são normalizados por profundidade (Z). Além dos dados individuais de cada ensaio, são plotadas as médias dos valores correspondentes a cada camada e suas relações com o desvio padrão, com o objetivo de destacar a variação presente dentro das camadas específicas. Os dados analisados correspondem ao número de golpes necessários para a penetração dos últimos 30 cm em cada camada (N_{SPT}). Os dados de SPT dos Sites 1 e 2 estão apresentados na Figura 2.

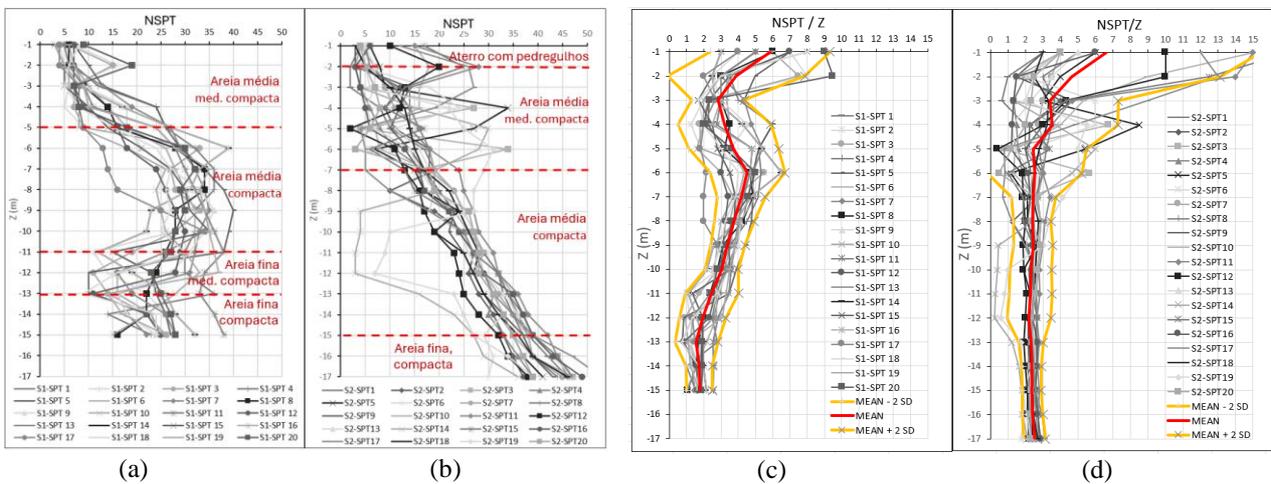


Figura 2: Valores de N_{SPT} : (a) Site 1; (b) Site 2; (c) valores normalizados Site 1; e (d) valores normalizados Site 2

Na análise do Site 1, observa-se uma diminuição da variável N_{SPT}/Z à medida que se adentra no terreno a partir da profundidade de 6 m, o que pode indicar uma manutenção do número de golpes nas camadas mais profundas. Os valores estão agrupados em torno da média, indicando uma homogeneidade relativa de resistência à penetração ao longo da profundidade.

Para o Site 2, a relação N_{SPT}/Z se mantém estável após a profundidade de 5 m, indicando um aumento consistente dos valores brutos de N_{SPT} conforme a sondagem atinge camadas mais profundas. Nota-se uma variabilidade mais expressiva nos valores de N_{SPT} nas camadas superiores, como evidenciado pelo alto desvio padrão nessas zonas, o que aumenta a incerteza da resistência nessas camadas. Em contraste com essa variação nas camadas superiores, nas profundidades maiores, os dados se homogeneizam, com os valores de N_{SPT} apresentando menor dispersão e uma tendência a se agrupar em torno da média, refletindo uma maior uniformidade dos dados normalizados.

A Tabela 2 fornece um resumo das estatísticas descritivas para os valores de N_{SPT} normalizado de cada ensaio. As estatísticas incluem a média, desvio padrão e coeficiente de variação (COV). Ao analisar a tabela para o Site 1, os valores médios de N_{SPT}/Z por ensaio variam entre 2,25 e 3,72. O desvio padrão global é relativamente baixo (0,42 golpes/metro), sugerindo uma homogeneidade entre as médias dos ensaios. O coeficiente de variação (COV) do local é de 13,12%, corroborando uma baixa variabilidade entre os dados médios de cada ensaio. Para o Site 2, as médias das sondagens variam mais amplamente, de 2,14 a 4,41, e o desvio padrão global é maior, de 0,63 golpes/metro. O COV é de 21,84%. Esses dados indicam uma variabilidade maior entre os resultados médios do Site 2 em comparação com o Site 1.

Tabela 2: Valores estimados de média, desvio padrão e COV para os SPTs.

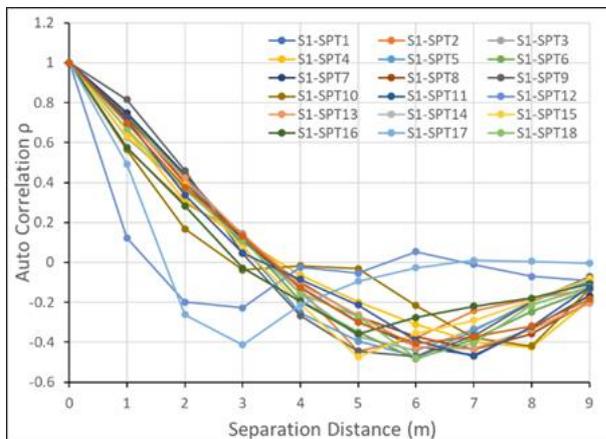
SITE 1				SITE 2			
Sondagem	Média	Desv.Pad.	COV	Sondagem	Média	Desv.Pad.	COV
S1-SPT1	3,11	1,52	48,82%	S2-SPT1	2,41	0,65	26,99%
S1-SPT2	3,13	2,17	69,35%	S2-SPT2	2,45	0,68	27,94%
S1-SPT3	3,05	1,96	64,23%	S2-SPT3	2,87	1,43	49,88%
S1-SPT4	3,86	1,67	43,22%	S2-SPT4	2,24	0,58	25,79%
S1-SPT5	3,91	1,88	48,01%	S2-SPT5	3,18	1,83	57,59%
S1-SPT6	3,24	1,45	44,73%	S2-SPT6	2,78	1,31	46,97%
S1-SPT7	3,52	1,40	39,75%	S2-SPT7	2,83	0,42	14,87%
S1-SPT8	3,14	1,36	43,2%	S2-SPT8	2,92	0,64	21,71%
S1-SPT9	3,04	1,06	34,97%	S2-SPT9	2,51	0,65	25,90%
S1-SPT10	2,79	1,60	57,36%	S2-SPT10	3,76	3,40	90,40%
S1-SPT11	3,52	0,87	24,57%	S2-SPT11	4,41	3,83	86,94%
S1-SPT12	2,88	1,37	47,72%	S2-SPT12	3,04	2,72	89,53%
S1-SPT13	3,52	0,87	24,57%	S2-SPT13	2,59	0,80	30,85%
S1-SPT14	3,1	1,53	49,36%	S2-SPT14	2,14	1,64	76,79%
S1-SPT15	2,62	0,85	32,38%	S2-SPT15	3,97	4,19	105,43%
S1-SPT16	3,10	1,53	49,36%	S2-SPT16	2,42	1,07	44,27%
S1-SPT17	2,25	0,71	31,64%	S2-SPT17	3,84	3,78	98,47%
S1-SPT18	2,82	1,71	60,73%	S2-SPT18	2,57	0,38	14,60%
S1-SPT19	3,42	1,40	41,10%	S2-SPT19	2,76	1,54	55,85%
S1-SPT20	3,72	2,45	65,89%	S2-SPT20	2,33	0,71	30,55%
Média	3,19	-	-	Média	2,90	-	-
St, Desv,	0,42	-	-	St, Dev,	0,63	-	-
COV	13,12%	-	-	COV	21,84%	-	-

4.2 Comprimento da Correlação Espacial vertical

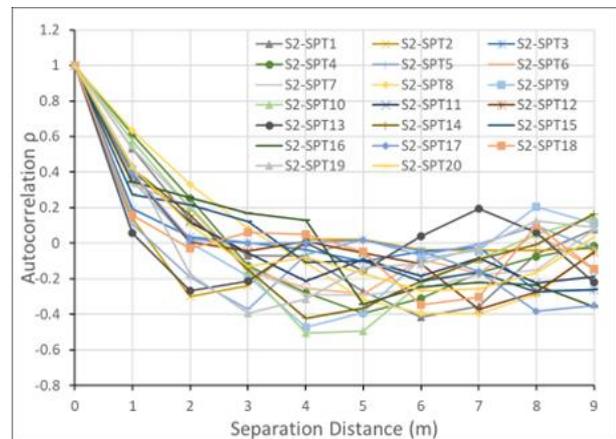
Para estimar o comprimento de correlação espacial (SCL), foram utilizadas as camadas de 5 m a 15 m no conjunto de sondagens do Site 1 e de 7 m a 17 m no conjunto de sondagens do Site 2.

Com base nesses dados, foi calculada a função de autocorrelação empírica (ρ) dos dados (Equação 3). A função de autocorrelação foi plotada utilizando o método IAA, permitindo a obtenção do SCL através da integração da área sob a curva, conforme Equação 5. Em seguida, os gráficos das funções teóricas de autocorrelação, utilizando o método TAM, são comparados com os modelos teóricos da Tabela 1, elegendo o que melhor se adequa. A Tabela 3 apresenta uma compilação dos resultados de SCL para ambos os métodos, além de indicar o modelo teórico mais adequado.

Os gráficos da função de autocorrelação da amostra (ρ) para cada ensaio SPT estão apresentados na Figura 3. Os resultados de SCL para ambos os métodos de cada ensaio juntamente com a função teórica utilizada para adequação estão indicados na Tabela 3.



(a)



(b)

Figura 3: (a) Autocorrelação da amostra Site 1 (b) Autocorrelação da amostra Site 2

Os resultados obtidos pelo TAM indicaram valores maiores de comprimento de correlação espacial (SCL) em comparação com aqueles derivados pelo Método IAA para ambos os locais. Ao combinar os métodos, estimamos que o SCL varia em torno de $3,05 \pm 0,62$ metros para o Site 1 e $1,95 \pm 0,60$ metros para o Site 2. Os modelos teóricos predominantes foram Segunda Ordem Markov e Exponencial Quadrada.

Além disso, os dois Sites exibem alguns valores atípicos, nos quais a escala de flutuação (SCL) que se aproximam da distância da amostra, indicando variabilidade alta. Essas discrepâncias podem ser atribuídas a uma série de fatores, incluindo potenciais incertezas ou imprecisões durante o ensaio, erros na coleta dos dados ou até mesmo a heterogeneidade intrínseca do terreno, que pode ser resultado de complexos processos geológicos subjacentes.

Tabela 3: Comprimento de correlação espacial vertical para os Sites 1 e 2.

SITE 1				SITE 2			
Sondagem	SCL IAA (m)	SCL TAM (m)	TAM	Sondagem	SCL IAA (m)	SCL TAM (m)	TAM
S1-SPT1	3,39	3,60	Squared Exponential	S2-SPT1	2,26	2,40	Squared Exponential
S1-SPT2	2,89	3,05	Second Order Markov	S2-SPT2	0,98	1,10	Exponential
S1-SPT3	3,13	2,80	Cosine Exponential	S2-SPT3	1,46	1,40	Second Order Markov
S1-SPT4	3,11	3,10	Second Order Markov	S2-SPT4	2,60	2,90	Squared Exponential
S1-SPT5	3,25	3,40	Squared Exponential	S2-SPT5	1,02	1,15	Squared Exponential
S1-SPT6	3,39	3,50	Squared Exponential	S2-SPT6	1,93	1,80	Second Order Markov
S1-SPT7	3,48	3,60	Squared Exponential	S2-SPT7	2,33	2,40	Second Order Markov
S1-SPT8	3,36	3,45	Squared Exponential	S2-SPT8	2,99	3,20	Second Order Markov
S1-SPT9	3,37	3,75	Squared Exponential	S2-SPT9	1,53	1,70	Squared Exponential
S1-SPT10	2,43	2,60	Squared Exponential	S2-SPT10	2,39	2,60	Second Order Markov
S1-SPT11	3,43	3,55	Second Order Markov	S2-SPT11	2,01	2,10	Second Order Markov
S1-SPT12	1,05	1,10	Second Order Markov	S2-SPT12	1,75	1,80	Squared Exponential
S1-SPT13	3,43	3,60	Second Order Markov	S2-SPT13	0,85	1,05	Squared Exponential
S1-SPT14	2,69	2,90	Second Order Markov	S2-SPT14	2,01	2,20	Second Order Markov
S1-SPT15	3,12	3,30	Second Order Markov	S2-SPT15	2,12	1,90	Second Order Markov
S1-SPT16	2,69	3,00	Second Order Markov	S2-SPT16	2,46	2,10	Exponential
S1-SPT17	1,72	2,00	Squared Exponential	S2-SPT17	1,83	1,85	Squared Exponential
S1-SPT18	3,13	3,40	Second Order Markov	S2-SPT18	1,29	3,20	Squared Exponential
S1-SPT19	3,12	3,30	Squared Exponential	S2-SPT19	1,70	1,70	Squared Exponential
S1-SPT20	3,29	3,40	Second Order Markov	S2-SPT20	1,94	2,00	Second Order Markov
Mean	2,97	3,12		Mean	1,87	2,03	
St, Dev,	0,62	0,633		St, Dev,	0,57	0,63	
COV	20,91%	20,27%		COV	30,19%	30,99%	
Max	3,48	3,75		Max	2,99	3,2	
Min	1,05	1,10		Min	0,85	1,05	

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou a variabilidade espacial vertical em um depósito sedimentar marinho, utilizando ensaios SPT em duas localidades próximas dentro do município de Florianópolis, Brasil. Foram analisados 40 ensaios SPT, com o objetivo de avaliar a homogeneidade das propriedades do solo entre os dois sites.

Os resultados mostraram que o Site 1 apresenta uma média de N_{SPT}/Z de 3,19, com desvio padrão de 0,42 e um coeficiente de variação (COV) de 13,12%, indicando uma maior uniformidade nas propriedades do solo. Em contraste, o Site 2 apresentou uma média de N_{SPT}/Z de 2,90, com desvio padrão de 0,63 e um COV de 21,84%, refletindo uma maior variabilidade entre os furos de sondagem.

A análise da escala de flutuação (SCL) mostrou que o Site 1 possui uma maior homogeneidade espacial, com um SCL médio de $3,05 \pm 0,62$ metros. Em comparação, o Site 2 apresentou um SCL médio de $1,95 \pm 0,60$ metros, sugerindo uma heterogeneidade maior das propriedades do solo. A maior variabilidade observada no Site 2 pode ser atribuída à complexidade geológica local, à heterogeneidade intrínseca do terreno e a possíveis imprecisões nos ensaios ou na coleta de dados.

A integração dos métodos IAA e TAM foi essencial para uma avaliação mais precisa da variabilidade espacial, destacando a importância de utilizar múltiplos métodos para melhorar a confiabilidade dos resultados. Estes pontos contribuem significativamente para o entendimento da variabilidade espacial de solos arenosos em bacias sedimentares e podem servir como base para futuras pesquisas e projetos de engenharia geotécnica na região de Florianópolis.

6. REFERÊNCIAS

- Bouayad, D. (2017). *Assessment of sandy soil variability based on CPT data*. *Procedia Engineering*, 175, 310-315. doi:10.1016/j.proeng.2017.01.033
- Cao, Z., & Wang, Y. (2014). *Bayesian Model comparison and characterization of undrained shear strength*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(6), 4014018-1-9. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001108
- Cami, B., Javankhoshdel, S., Phoon, K. K., & Ching, J. (2020). *Scale of fluctuation for spatially varying soils: estimation methods and values*. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 6(4), 03120002.
- De Gast, T., Vardon, P. J., & Hicks, M. A. (2021). *Assessment of soil spatial variability for linear infrastructure using cone penetration tests*. *Géotechnique*, 71(11), 999-1013.
- Oguz, E. A., Huvaj, N., & Griffiths, D. V. (2019). *Vertical spatial correlation length based on standard penetration tests*. *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(1), 45-56. doi:10.1080/1064119X.2018.1443180
- Huang, W., Dijkstra, T., Loveridge, F., Hughes, P., Blake, A. P., Dobbs, M., & Gonzalez, Y. T. (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
- Huber, M. (2013). *Soil variability and its consequences in geotechnical engineering*. PhD thesis, Stuttgart, Univ., Diss, Zugl.
- Kenarsari, A. E., Chenari, R. J., & Eslami, A. (2013). *Characterization of the correlation structure of residual CPT profiles in sand deposits*. *International Journal of Civil Engineering*, 11, 29-37.
- Liu, Z., Lacasse, S., Nadim, F., Vanneste, M., & Yetginer, G. (2015). *Accounting for the spatial variability of soil properties in the reliability-based design of offshore piles*. *Frontiers in Offshore Geotechnics III*, 2, 1375-1380.
- Nie, X., Zhang, T., Huang, H., Liu, Z., & Lacasse, S. (2015). *Scale of fluctuation for geotechnical probabilistic analysis scale of fluctuation for geotechnical probabilistic analysis*. In T. Schweckendiek, A. F. van Tol, & D. (Eds.), *Proceedings of the 5th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)* (pp. 834-840). Rotterdam, the Netherlands. doi:10.3233/978-1-61499-580-7-834
- Overgard, I. E. (2015). *Reliability-based design of a monopile foundation for offshore wind turbines based on CPT data*. Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- 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, Universidade Federal de Santa Catarina].
- Phoon, K.-K., Kulhawy, F. H., & Grigoriu, M. D. (1995). *Reliability-based design of foundations for transmission line structures*. Report TR-105000, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- Salgado, R., Ganju, E., & Prezzi, M. (2019). *Site variability analysis using cone penetration test data*. *Computers and Geotechnics*, 105, 37-50.
- Salgado, R., Prezzi, M., & Ganju, E. (2015). *Assessment of Site Variability from Analysis of Cone Penetration Test Data*. Publication No. FHWA/IN/JTRP-2015/04, Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette.
- Tomazzoli, E. R., & Pellerin, J. R. G. M. (2014). *Mapa geológico da Ilha de Santa Catarina (1ª ed.)* [Mapa]. ISBN 978-85-905992-3-4.
- Uzielli, M., Lacasse, S., Nadim, F., & Phoon, K. (2006). *Soil variability analysis for geotechnical practice*. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Characterisation 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 Division*, 103, 1227-1246.
- Vanmarcke, E. H. (1983). *Random Fields: Analysis and Synthesis*. Cambridge: MIT Press.