XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul
GEOSUL 2019 – 17 a 19 de Outubro, Joinville, Santa Catarina, Brasil
©ABMS, 2019

Caracterização da Variabilidade Espacial de Rejeitos de Mineração de Ouro

Letícia Perini
UFSC, Florianópolis, Brasil, leticia.perini@hotmail.com

Gracieli Dienstmann
UFSC, Florianópolis, Brasil, g.dienstmann@gmail.com

RESUMO: Um dos desafios da engenharia geotécnica nas análises e projetos de barragens de rejeitos é a estimativa de parâmetros do material. O processo construtivo e a diversidade de fontes de extração mineral contribuem para a alta variabilidade dos rejeitos. Neste sentido, o estudo da variabilidade espacial dos parâmetros pode ser útil para lidar com a heterogeneidade dos materiais, permitindo a realização de análises probabilísticas, incorporando de forma racional as incertezas dos parâmetros às análises. O objetivo deste artigo é caracterizar a variabilidade de rejeitos de mineração de ouro através da análise de ensaios de piezocone (CPTu). Para tal, são avaliados: valor médio, coeficiente de variação (COV) e escala de flutuação dos parâmetros q_c, f_s e u_2 de onze ensaios CPTu em rejeitos de mineração de ouro. Os resultados podem servir de subsídio para realização de análises probabilísticas em rejeitos.

PALAVRAS-CHAVE: rejeitos de mineração, heterogeneidade, variabilidade espacial, coeficiente de variação, escala de flutuação, função de autocorrelação.

1 INTRODUÇÃO

A indústria mineradora desperta a preocupação da população e de diversos órgãos ambientais, devido ao risco de acidentes em barragens de rejeitos. O vazamento do material contido pelas barragens frequentemente provoca desastres que podem envolver perdas econômicas, ambientais e humanas.

Dados obtidos através de ensaios de campo e de laboratório são utilizados para obter parâmetros característicos dos rejeitos para aplicação em projetos e avaliações quanto a segurança das estruturas. Neste sentido, destaca-se o ensaio de piezocone (CPTu), muito utilizado para análise de campo dos rejeitos de mineração. Entretanto, a estimativa de parâmetros geotécnicos deve ser cautelosa, visto que esse material costuma apresentar alta variabilidade decorrente do processo construtivo e da diversidade de fontes de extração mineral.

Contar com coeficientes de segurança é a ferramenta mais utilizada para lidar com a heterogeneidade dos materiais em análises e projetos, porém, o estudo da variabilidade espacial dos parâmetros permite a realização de análises probabilísticas, incorporando de forma racional as incertezas dos parâmetros às análises.

Em vista da relevância do estudo da variabilidade, o objetivo deste artigo é caracterizar a variabilidade de rejeitos de mineração de ouro através da análise de ensaios de campo do tipo CPTu.

Estudos recentes (e.g. Phoon *et al.*, 1995; Uzielli *et al.*, 2006; Kenarsari *et al.*, 2013; Salgado *et al.*, 2015) argumentam que a caracterização da variabilidade espacial do solo envolve a identificação de um valor médio do

©ABMS, 2019

parâmetro, de uma medida de dispersão de valores (coeficiente de variação – COV) e da estrutura de correlação espacial, descrita por uma distância de autocorrelação e por uma função de autocorrelação.

A estrutura de correlação espacial está relacionada com a similaridade que as características do solo apresentam em pontos de observação próximos. Assim, distância de autocorrelação, ou também escala de flutuação, é a distância dentro da qual as propriedades do solo apresentam forte correlação. Já a função de autocorrelação descreve como essa correlação entre pontos diminui com a distância de separação.

Com base em ferramentas apresentadas pela literatura para estudo de heterogeneidade dos solos, este artigo apresenta uma análise detalhada da variabilidade de rejeitos de mineração de ouro através de ensaios de piezocone, identificando COV, escala de flutuação e função de autocorrelação dos parâmetros do material. A caracterização da variabilidade poderá ser utilizada em análises probabilísticas de estabilidade, fornecendo diretrizes para a quantificação do risco de falha nestes materiais.

2 VARIABILIDADE E INCERTEZAS NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS

2.1 Fontes de Incertezas

Solos são materiais formados por processos naturais, portanto suas propriedades apresentam grande variabilidade se comparados a outros materiais estudados na engenharia civil. Processos de erosão, agentes transportadores e condições de sedimentação são alguns dos fatores responsáveis pela variabilidade nas características do material (JAKSA, 1995).

Phoon e Kulhawy (1999) explicam a variabilidade de um parâmetro como uma soma de incertezas que podem advir de diferentes fontes: variabilidade inerente (espacial) do solo, erros de medidas durante os ensaios e incertezas do modelo de transformação de um parâmetro.

2.2 Caracterização da variabilidade inerente de parâmetros geotécnicos

É crescente o reconhecimento da importância de quantificar a variabilidade dos parâmetros para caracterização do solo. De acordo com Uzielli (2008), estimar as incertezas é útil na medida que quantifica a confiança na seleção de determinado valor característico para uso em projeto, fornecendo uma informação mais completa e realista a respeito do nível de risco associado ao mesmo. Além disso, a caracterização da variabilidade espacial dos parâmetros é indispensável para a realização de análises probabilísticas.

A Figura 1 mostra a variabilidade inerente de uma propriedade do solo $\xi(z)$ ao longo da profundidade z. De acordo com Phoon *et al*. (1995), a variabilidade inerente do solo pode ser decomposta em duas componentes, tal que:

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

onde: t(z) é a função de tendência da propriedade do solo e w(z) é o resíduo da tendência, representado por uma componente flutuante.

De acordo com Phoon *et al*. (1995), A variabilidade inerente pode ser representada por uma medida adimensional ao normalizar o desvio padrão $\sigma(w)$ pela média da tendência da propriedade do solo (t):

$$COV_w = \frac{\sigma_w}{t} \quad (2)$$

onde COV_w é o coeficiente de variação da variabilidade inerente.

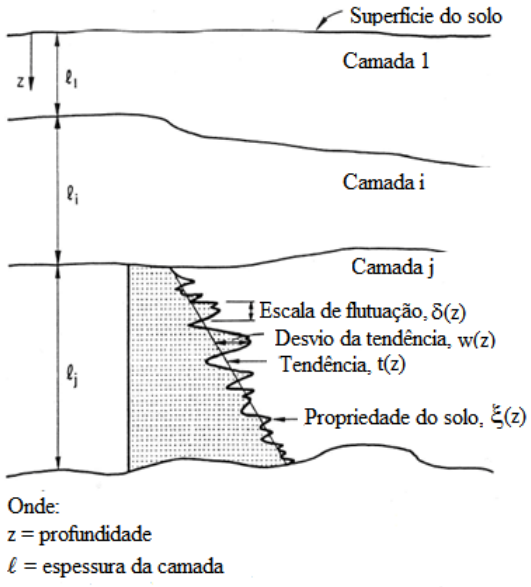

Figura 1. Variabilidade de uma propriedade do solo ao longo da profundidade. Adaptado de Phoon *et al.*(1995)

Além do COV, que é uma medida da amplitude das oscilações da propriedade do solo, avaliar também uma medida da frequência com que essas oscilações ocorrem é indispensável para a caracterização da variabilidade inerente. Essa informação pode ser traduzida pela escala de flutuação, ou distância de autocorrelação, conceito proposto pela primeira vez por Vanmarcke (1977). A escala de flutuação indica a distância dentro da qual a propriedade do solo apresenta forte correlação (PHOON *et al.*, 1995).

Uma ilustração da escala de flutuação, indicada por δ, aparece no modelo de variabilidade inerente apresentado na Figura 1. O parâmetro também pode receber a notação θ (KENARSARI *et al.*, 2013).

3 MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DA ESCALA DE FLUTUAÇÃO

3.1 Método expedito de Vanmarcke (MEV)

De acordo com Vanmarcke (1977) *apud* Kenarsari *et al.* (2013), a escala de flutuação pode ser relacionada à distância média entre dois pontos consecutivos onde o perfil geral da propriedade do solo e sua linha de tendência se cruzam. A Figura 2 e a Equação (3) mostram como obter a distância média de cruzamentro, onde d_1, d_2, ..., d_n são as distâncias de intersecção. A Equação (4) mostra a aproximação proposta por Vanmarcke (1977) para a estimativa da escala de flutuação.

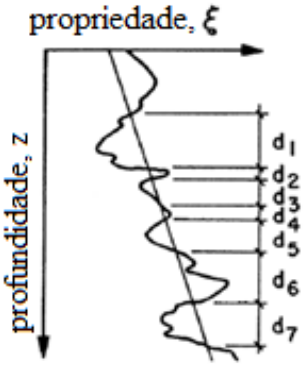

Figura 2. Distância média de intersecção para o cálculo da escala de flutuação pelo método MEV. Adaptado de Kenarsari *et al.* (2013)

$$\bar{d} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i \tag{3}$$

$$\theta \approx \sqrt{\frac{2}{\pi}}\bar{d} = 0.8\bar{d} \tag{4}$$

3.2 Integração da funcão de autocorrelação da amostra (IAA)

Vanmarcke (1983) apresentou uma nova técnica para o cálculo da escala de flutuação, onde a área abaixo do gráfico da função de autocorrelação da amostra é equivalente à escala de flutuação.

A autocorrelação, é uma medida estatística que é função da distância de separação entre dois pontos e quantifica a força de correlação entre valores igualmente espaçados. Em geral, para pequenas distâncias de separação, a

©ABMS, 2019

autocorrelação assume o valor máximo, isto é, pontos próximos apresentam forte autocorrelação; enquanto que pontos muito distantes apresentam fraca autocorrelação.

O cálculo da autocorrelação requer o cálculo da covariância. Seja τ_j a distância de separação entre dois pontos x_i e x_{i+j-1}, a covariância $C(\tau j)$ de um parâmetro (X) é calculada, conforme Salgado *et al*. (2015):

$$C(\tau_j) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n-j+1}(x_i - \mu_x)(x_{i+j-1} - \mu_x) \qquad (5)$$

onde que n é o número de pontos em que o parâmetro X = X(z) possui valores. x_i é o valor do parâmetro X na profundidade z_i; μ_x é a média de todos valores de X; j é um inteiro que varia de 1 a n e está relacionado com a distância de separação τ_j de forma que $\tau_j = (j-1)\Delta z$, onde Δz é a distância mínima entre dois pontos consecutivos.

A autocorrelação ρ de uma amostra é dada por:

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

No método de integração da funcão de autocorrelação da amostra (IAA), segundo Salgado *et al*. (2019), a escala de flutuação (θ) é equivalente a duas vezes a área abaixo da parte positiva da função de autocorrelação da amostra calculada empiricamente (ρ), conforme Equação (7), onde τ é a distância de separação entre duas medidas.

$$\theta = \int_{-\infty}^{+\infty}\rho d\tau = 2\int_{0}^{+\infty}\rho d\tau \qquad (7)$$

Para Kenarsari *et al*. (2012), é comum estimar a escala de flutuação como equivalente a duas vezes a área abaixo da função de autocorrelação antes da função de autocorrelação assumir valores negativos pela primeira vez.

3.3 Adequação do modelo de autocorrelação (AMA)

Modelos teóricos de autocorrelação podem ser empregados para representar a função de autocorrelação de uma amostra. Os modelos mais comuns encontrados na literatura geotécnica são o modelo exponencial, exponencial quadrático, cosseno exponencial e Markov de segunda-ordem (e.g., UZIELLI *et al*.,2006; KENARSARI *et al*., 2013; NIE *et al*., 2015; SALGADO *et al*., 2015).

As funções de autocorrelação dos modelos teóricos são apresentadas na Tabela 1, em que τ é a distância de separação e δ é a escala de flutuação. Segundo Spry *et al*. (1988) *apud* Uzielli *et al*. (2006) e Kenarsari *et al*. (2013), nenhum modelo de autocorrelação é preferível indubitavelmente sobre outros.

Tabela 1. Funções de autocorrelação - modelos teóricos. Fonte: NIE *et al*. (2015)

Modelo	Função de autocorrelação
Exponencial	$\rho(\tau) = \exp\left(-\frac{2\lvert\tau\rvert}{\delta}\right)$
Exp. quadrático	$\rho(\tau) = \exp\left(-\pi\left(\frac{\tau}{\delta}\right)^2\right)$
Cosseno exp.	$\rho(\tau) = \cos\left(\frac{\tau}{\delta}\right)\exp\left(-\frac{\lvert\tau\rvert}{\delta}\right)$
Markov 2ª ordem	$\rho(\tau) = \left(1+\frac{4\lvert\tau\rvert}{\delta}\right)\exp\left(-\frac{4\lvert\tau\rvert}{\delta}\right)$

De acordo Uzielli *et al*. (2006), a escala de flutuação pode ser calculada a partir da adequação dos modelos de autocorrelação teóricos à função de autocorrelação de amostra calculada empiricamente. Ao identificar o modelo teórico que melhor se ajusta à função empirica, a escala de flutuação pode ser obtida a partir da relação analítica entre a função de autocorrelação teórica e a escala de flutuação, conforme as relações apresentadas na Tabela 1.

©ABMS, 2019

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

A caracterização da variabilidade proposta neste trabalho é realizada em rejeitos de mineração de ouro provenientes de reservatórios localizado no Município de Barrocas, BA. O material, que fica disposto em lagos, tem sido utilizado para pesquisas desenvolvidas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul desde 2001.

A Figura 3 identifica a localização de investigações descritas por Bedin (2010), Klahold (2013) e Sosnoski (2016). Dentre os ensaios realizados, dispõe-se de onze ensaios do tipo CPTu, em velocidade padronizada, cujos dados serão utilizados para a caracterização da variabilidade.

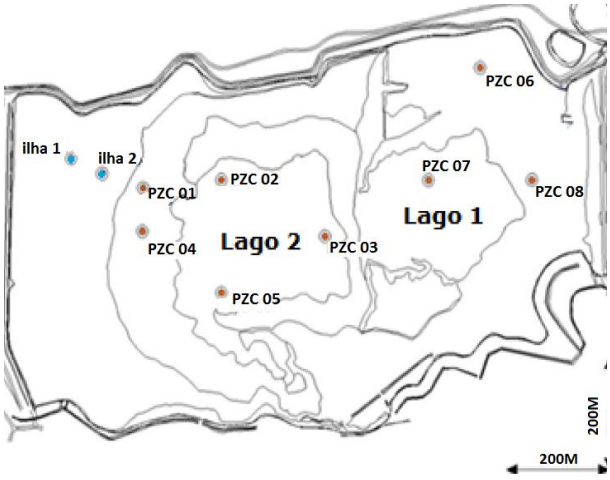

Figura 3. Localização das investigações. Adaptado de Dienstmann *et al*. (2018)

A campanha apresentada por Bedin (2010) abrangeu oito pontos de sondagem com nomenclaturas PZC01 à PZC08; Klahold (2013) analisou dois pontos de investigação, referenciando as sondagens executadas com nomenclaturas de “ilha 1” e “ilha 2”, localizadas no Lago 2; Sosnoski (2016), descreve um ponto de investigação, com localização próxima a ilha 1 de Klahold (2013).

Resultados de caracterização de laboratório indicam peso específico variando entre 18 e 20 kN/m³, índice de vazios entre 0,86 e 1,30 e umidade que diminui com a profundidade. Os rejeitos não apresentam coesão, sendo caracterizados como não plásticos, de acordo com os limites de Atterberg. A granulometria é predominantemente silto-arenosa e silto-arenosa-argilosa. (BEDIN, 2010; KLAHOLD, 2013; SOSNOSKI, 2016).

Na Figura 4 são apresentados, para todos os pontos de investigação, os perfis típicos do ensaio de piezocone (CPTu), onde a resistência de ponta (q_t), a poropressão gerada (u) e o atrito lateral (f_s) são plotados ao longo da profundidade. Pela dispersão dos resultados é possível observar como o comportamento do material é variável ao longo da profundidade e do distanciamento entre um ponto de investigação e outro

4.1 Métodos

Para caracterizar a variabilidade inerente dos rejeitos de mineração de ouro foram analisados os parâmetros lidos diretamente pelo ensaio (resistência de ponta q_c, atrito lateral f_s e poropressão gerada, u_2) dos onze ensaios CPTu em rejeitos de mineração de ouro.

Para cada um dos 11 ensaios e para cada um dos parâmetros, foram calculadas as seguintes medidas estatísticas: média, coeficiente de variação (COV), função de autocorrelação e escala de flutuação.

A escala de flutuação foi calculada através de três métodos para comparação: Método expedito de Vanmarcke (MEV), Método da adequação do modelo de autocorrelação (AMA) e Método de integração da função de autocorrelação da amostra (IAA).

No método da AMA, foram testados os quatro modelos de autocorrelação - exponencial, exponencial quadrático, cosseno exponencial e exponencial de segunda ordem - com o objetivo de verificar qual dos modelos melhor descreve a estrutura de autocorrelação.

©ABMS, 2019

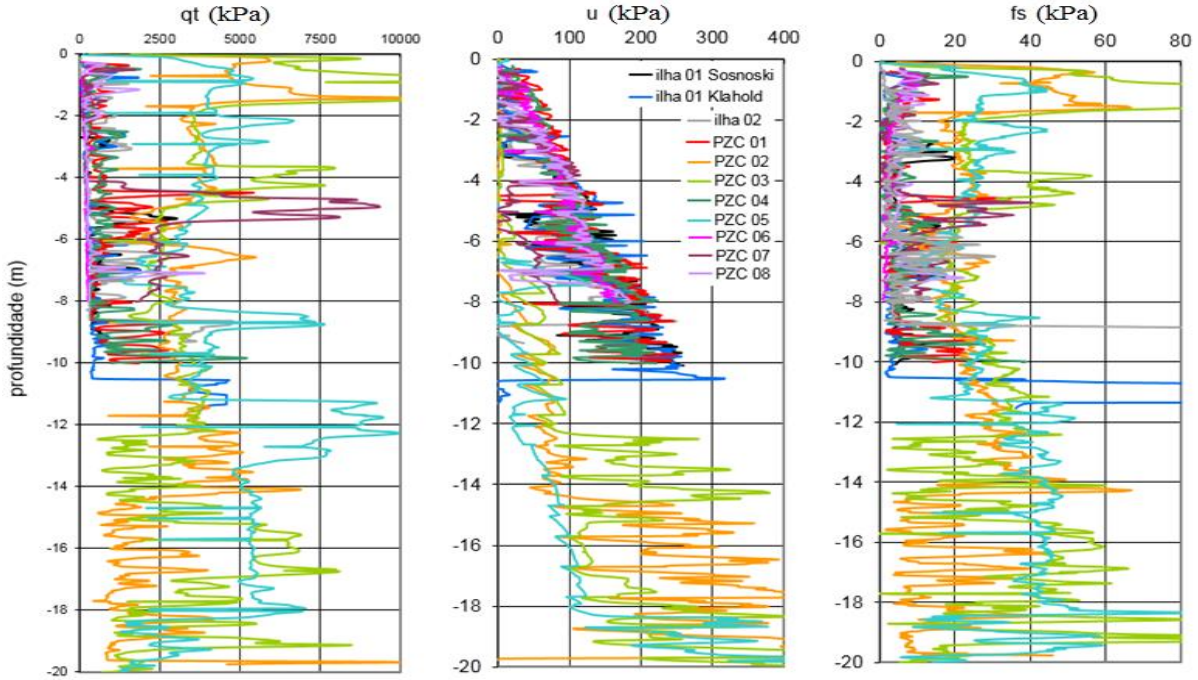

Figura 4. Perfil das leituras de 11 ensaios CPTu em rejeitos de mineração de ouro

5 RESULTADOS

5.1 Média e COV dos parâmetros

Os rejeitos de mineração de ouro apresentaram, nos onze ensaios CPTu analisados, valores médios de resistência de ponta (q_c) variando de 738,4 kPa à 4467,7 kPa; atrito lateral (f_s) variando de 3,1 à 34,4 kPa e poropressão (u_2) entre 57,3 e 132,9 kPa. Os valores médios e os coeficientes de variação dos parâmetros de cada um dos onze pontos de investigação são apresentados nas Tabela 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Valores médios dos parâmetros

	q_c (kPa)	f_s (kPa)	u_2 (kPa)
PZC1	863,6	7,3	111,1
PZC2	3145,9	22,9	94,0
PZC3	3852,2	34,4	93,2
PZC4	738,4	6,5	106,4
PZC5	4467,7	31,6	57,3
PZC6	174,6	3,1	86,7
PZC7	1785,6	8,4	36,5
PZC8	373,1	6,1	74,1
Ilha 1 K	704,6	14,4	94,3
Ilha 1 S	554,0	6,3	132,9
Ilha 2 K	879,6	15,6	69,7

Os valores obtidos para os coeficientes de variação vão de 20,2% à 154,3%, demonstrando a alta varibilidade espacial que o material apresenta.

Tabela 3. Coeficiente de variação (COV) dos parâmetros

	q_c (%)	f_s (%)	u_2 (%)
PZC1	87,1	78,0	53,5
PZC2	45,5	53,0	132,6
PZC3	61,7	62,0	110,4
PZC4	92,0	80,7	52,2
PZC5	39,7	37,5	154,3
PZC6	46,4	69,0	50,7
PZC7	122,8	90,7	90,8
PZC8	121,1	46,2	71,7
Ilha 1 K	42,4	20,2	82,8
Ilha 1 S	90,2	61,3	50,0
Ilha 2 K	119,7	271	87,5

5.2 Escala de flutuação

Para o Método expedito de Vanmarcke (MEV), a linha de tendência para cada propriedade foi escolhida de forma a se obter o maior coeficiente de determinação (R^2) em relação a propriedade analisada.

©ABMS, 2019

A Figura 5 exibe o resultado da aplicação do método AMA para o atrito lateral (f_s) do ensaio no ponto PCZ4. Através do gráfico de ρ é possível observar como a autocorrelação da amostra diminui conforme a distância de separação entre pontos aumenta. Neste caso, a escala de flutuação obtida foi de 0,45 metros e o modelo teórico que demonstrou melhor ajuste foi o modelo exponencial.

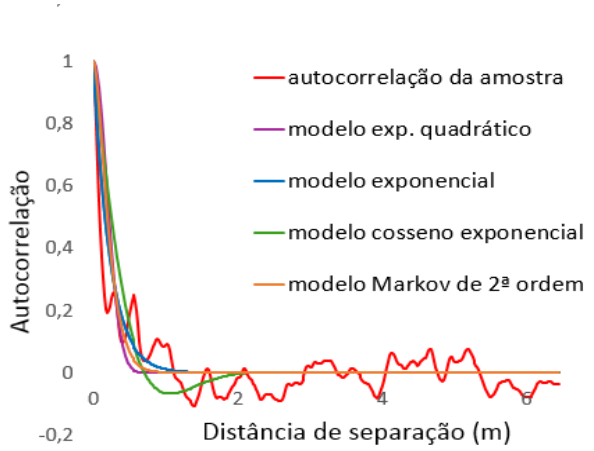

Figura 5. Autocorrelação (ρ) de f_s no ensaio PCZ4

Ainda para o atrito lateral (f_s) do ensaio no ponto PCZ4, o método AMA resultou em uma escala de flutuação equivalente a 0,43 metros. Pelo método MEV, a escala de flutuação obtida foi de 0,12 metros. De forma análoga, foi calculada a escala de flutuação para os parâmetros q_c e u_2, bem como para os demais ensaios. A Tabela 4 apresenta um resumo dos valores obtidos através dos três métodos estudados. A média apresentada na tabela é a média dos valores assumidos pela escala de flutuação nos onze pontos de investigação. A variação exibe os valores mínimos e máximos da escala de flutuação e seu coeficiente de variação (COV) indica a dispersão dos valores da escala de flutuação em torno do valor médio da escala de flutuação.

A partir da Tabela 4, nota-se que os métodos que utilizam a função de autocorrelação da amostra para o cálculo da escala de flutuação (AMA e IAA) apresentam resultados semelhantes, enquanto que o método MEV é o que apresenta valores mais distintos em relação aos demais métodos e ensaios analisados.

Tabela 4. Escala de flutuação pelos métodos MEV, AMA e IAA (em metros)

		qc	fs	u2
MEV	média	0,24	0,19	0,20
	variação	0,11-0,46	0,11-0,32	0,08-0,51
	COV	47%	41%	0,68%
AMA	média	0,80	0,92	2,67
	variação	0,20-1,80	0,26-3,40	0,95-5,80
	COV	69%	98%	54%
IAA	média	0,79	0,92	2,64
	variação	0,20-1,64	0,28-3,37	0,95-5,41
	COV	64%	99%	56%

Valores menores para a escala de flutuação foram obtidos pelo método MEV, enquanto que métodos AMA e IAA resultaram em valores mais elevados.

A faixa de variação dos valores obtidos para a escala de flutuação é alta, com coeficientes de variação (COV) de 0,41% até 99%. O cálculo de COV para a escala de flutuação pode ser entendido como uma medida da incerteza no cálculo da escala de flutuação. Neste caso, os valores elevados assumidos pelo COV indicam considerável incerteza na estimativa da escala de flutuação dos rejeitos de mineração de ouro.

Em relação aos modelos teóricos da função de autocorrelação, o modelo exponencial foi o que melhor se ajustou à maioria dos casos. Para os 33 conjuntos de dados analisados, 19 apresentaram o modelo exponencial como melhor equação de ajuste; 3 apresentaram o modelo exponencial quadrático; 7, o cosseno-exponencial e 4, o modelo Markov de segunda ordem.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo caracterizar a variabilidade de rejeitos de mineração de ouro através da análise de ensaios de piezocone (CPTu). Média, coeficiente de variação (COV) e escala de flutuação foram avaliados para os

parâmetros q_c, f_s e u_2 de onze ensaios CPTu em rejeitos de mineração de ouro.

Os valores obtidos para os COVs são indicativos de um material com alta variabilidade espacial. Para a obtenção da escala de flutuação, o método MEV apresentou valores mais discrepantes em relação aos demais métodos. O método AMA e o método IAA, entretanto, mostraram resultados similares.

A caracterização da variabilidade pode servir de subsídio para análises probabilísticas de estabilidade, fornecendo diretrizes para a quantificação do risco de falha nestes materiais. Para aplicar os resultados em análises é importante levar em conta a representatividade dos valores obtidos.

Quanto aos resultados obtidos para a escala de flutuação, o cálculo do COV destes é importante para compreender o nível de incerteza associado à estimativa. O material analisado apresentou valores elevados para o COV da escala de flutuação. Estes resultados sugerem que este parâmetro seja aplicado em análises com cautela e, se possível, que mais pontos de investigação sejam incluídos aos dados analisados para fornecer uma caracterização da variabilidade representativa e com menor nível de incerteza.

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC, PPGEC. Ao órgão de fomento (CAPES). Á Jucélia Bedin, Priscila Klahold e Jonatas Sosnoski por disponibilizarem material para este estudo.

REFERÊNCIAS

Bedin, J. (2010) Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 207 p.

Dienstmann, G.; Schnaid, F.; Maghous, S.; Dejong, J. T. (2018). Piezocone Penetration Rate Effects in Transient Gold Tailings. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. v.144, ed.2, nº04017116.

Jaksa, M. B. (1995) The influence of spatial variability on the geotechnical design properties of a stiff, overconsolidated clay. Ph.D. Thesis, University of Adelaide, Australia, 517 p.

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, v. 11, n. 1 B, p. 29–37.

Klahold, P. A. (2013) Interpretação de ensaios de campo em solos com Permeabilidade intermediária. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 105 p.

Nie, X.; Zhang, T.; Huang, H.; Liu, Z.; Lacasse, S. (2015) Scale of Fluctuation for Geotechnical Probabilistic Analysis. Geotechnical Safety and Risk V, October 2015, p. 816–821.

Phoon, K.-K.; Kulhawy, F. H. (1999) Characterization of geotechnical variability. Canadian Geotechnical Journal, v. 36, n. 4, p. 612–624.

Phoon, K.-K.; Kulhawy, F. H.; Grigoriu, M. D., (1995) Reliability based design of foundations for transmission line structures. Electric Power Research Institute, EPRI TR-105000, Project 1493-4, Final Report. Ithaca: Cornell University, 384 p.

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, Indiana, 132 p.

Salgado, R.; Ganju, E.; Prezzi, M. (2019) Site variability analysis using cone penetration test data. Computers and Geotechnics, Elsevier, v. 105, January, p. 37–50.

Sosnoski, J. (2016) Interpretação de ensaios de CPTU e DMT em solos com permeabilidade intermediária. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 137 p.

Uzielli, M. (2008) Statistical Analysis of Geotechnical Data. Geotechnical and Geophysical Site - Characterization. Proceedings of the 3th International Conference on Site Characterization, ISC-3, p. 173 - 193.