

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/478

Quantificação da variabilidade inerente e seu impacto na análise da drenagem parcial em ensaios de piezocone em rejeitos de mineração

Gracieli Dienstmann, Ph.D.

Professor, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte da Silva, 205, CEP 88037-000, Florianópolis, SC, Brasil. Email: g.dienstmann@gmail.br.

André Luis Meier, Ms.C.

Doutorando, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte da Silva, 205, CEP 88037-000, Florianópolis, SC, Brasil. Email: de.luis.meier@gmail.com

Natália Ziesmann, Ms.C.

Mestranda, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte da Silva, 205, CEP 88037-000, Florianópolis, SC, Brasil. Email: nziesmann@gmail.com

Juliano Pasa de Campos,

Graduando, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte da Silva, 205, CEP 88037-000, Florianópolis, SC, Brasil. Email: jpasa.engenhariacivil@gmail.com

RESUMO: O ensaio de piezocone (CPTu) é um método de investigação de campo utilizado para analisar o comportamento geomecânico de rejeitos de mineração. No entanto, o efeito das condições de drenagem nas medições do CPTu é um fator crítico na avaliação das propriedades dos rejeitos, especialmente porque esses materiais são frequentemente caracterizados como materiais siltosos com permeabilidade intermediária. Outro fator crucial na análise diz respeito a alta variabilidade dos rejeitos o que dificulta a determinação de parâmetros apropriados. Visando contornar esses desafios, o presente artigo propõe uma abordagem numérica para caracterizar e incorporar a variabilidade inerente dos rejeitos, para identificar limites teóricos probabilísticos de drenagem. Essa abordagem envolve a caracterização de estatísticas básicas do local, por meio da análise de ensaios de piezocone, e a incorporação dessa variabilidade em um conjunto de simulações de Monte Carlo usando como referência a teoria de expansão de cavidade. Os resultados indicam que a análise probabilística representa com boa adequação a variabilidade da resistência normalizada de ensaio, embora haja uma maior discrepância nas análises de poropressão normalizada.

PALAVRAS-CHAVE: investigação de campo; análise numérica; expansão de cavidade.

ABSTRACT: The piezocone penetration test (CPTu) is a field investigation method used to analyze the geomechanical behavior of mining tailings. However, the effect of drainage conditions on CPTu measurements is a critical factor in evaluating the properties of tailings, especially since these materials are often characterized as silty materials with intermediate permeability. Another crucial factor in the analysis concerns the high variability of the tailings, which makes it difficult to determine appropriate parameters. To overcome these challenges, this article proposes a numerical approach to characterize and incorporate the inherent variability of the tailings to identify theoretical probabilistic drainage limits. This approach involves characterizing basic site statistics through the analysis of piezocone tests and incorporating this variability into a set of Monte Carlo simulations using cavity expansion theory as a reference. The results indicate that the probabilistic analysis adequately represents the variability of the normalized resistance of the test, although there is a greater discrepancy in the analyses of normalized pore pressure.

KEYWORDS: site investigation; numerical analysis, cavity expansion

1 INTRODUÇÃO

Os desafios associados à construção e operação de Instalações de Armazenamento de Rejeitos (Tailings Storage Facilities-TSFs) têm sido reconhecidos há muito tempo e permanecem uma preocupação significativa para a comunidade de engenharia. Nos últimos anos, uma série de falhas de barragens de rejeitos de alto perfil, como Mount Polley, Fundão e Brumadinho, destacaram a importância crítica de aprimorar o projeto e a operação dessas estruturas.

Dentre as dificuldades de trabalho com rejeitos pode-se elencar a realização de investigações adequadas e representativas (ensaios de campo e laboratório) e a definição de modelos constitutivos apropriados. Com relação à representatividade dos ensaios de laboratório, uma vez que as TSFs geralmente consistem em materiais não coesivos, como areia siltosa e misturas arenosas, a viabilidade de obtenção de amostras intactas pode variar dependendo das condições específicas do local, dos métodos de amostragem e do equipamento utilizado. Além disso, é bem conhecido que diferentes métodos de reconstrução de amostras resultam em uma estrutura específica, o que pode resultar em características e respostas de tensão-deformação distintas das de campo (Carraro e Prezzi, 2007; Reid et al., 2021).

Nesse sentido, complementando campanhas de laboratório, ensaios de piezocone (CPTu) tem sido amplamente utilizados para caracterização do comportamento de rejeitos. No entanto, como destacado por Schnaid et al. (2020), os efeitos de drenagem parcial durante a penetração do cone em siltes devem ser cuidadosamente considerados, indicando que a velocidade de execução do ensaio deve ser verificada para compreender respostas totalmente drenadas ou não drenadas. Essa verificação pode ser feita por meio da construção de curvas características de drenagem, relação entre velocidade normalizada (V_h ou V_v) e resistência normalizada (Q) ou poropressão normalizada (U). Um exemplo típico de interpretação pode ser visualizado na Figura 1, considerando rejeitos de mineração de ouro.

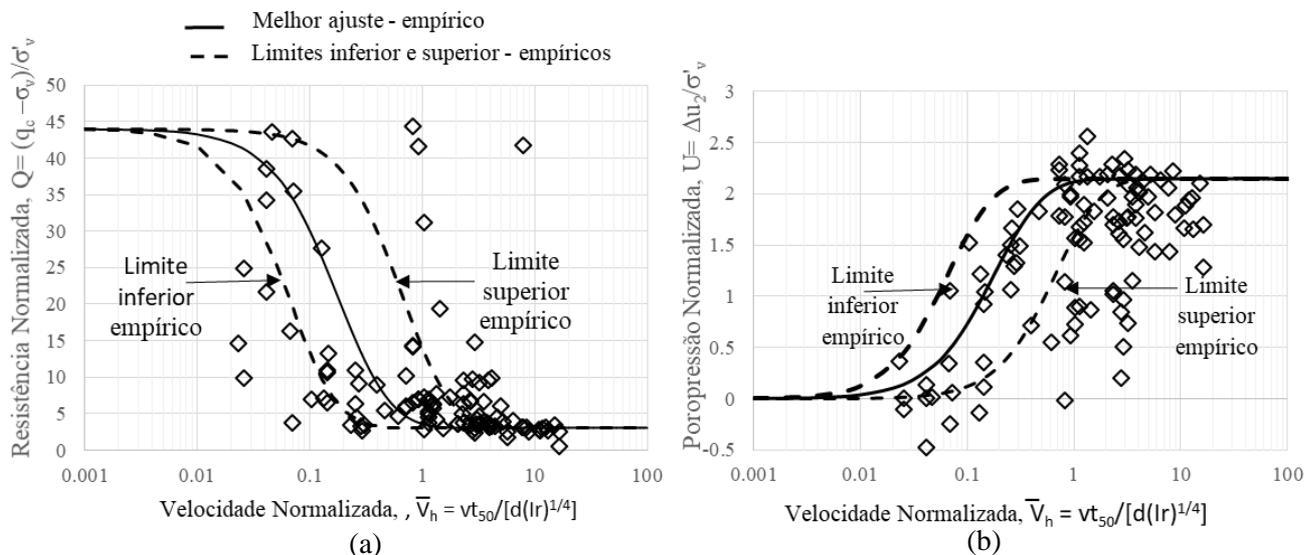


Figure 1. Curvas características de drenagem - rejeitos de ouro adaptada de Schnaid et al., (2020): (a) velocidade normalizada x resistência normalizada; (b) velocidade normalizada x poropressão normalizada

Com base nas curvas apresentadas na Figura 1 limites de comportamento podem ser estabelecidos: comportamento drenado pode ser caracterizado quando $\bar{V}_h > 3$ enquanto que comportamento não drenado pode ser estabelecido quando $\bar{V}_h < 0,01$. Os limites comportamentais (limites superior e inferior) apresentados foram estabelecidos empiricamente em Schnaid et al. (2020) e utilizam uma proposta de escrita da velocidade normalizada a partir de t_{50} , tempo de dissipação de 50% do excesso de poropressão em ensaios de dissipação, o diâmetro do equipamento, d , e o Índice de Rigidez (I_r). No entanto, as formas mais utilizadas para cálculo das velocidades normalizadas envolvem a normalização da relação entre velocidade e diâmetro do equipamento através do coeficiente de consolidação horizontal - nesse caso escreve-se $V_h = v \cdot d / c_h$ (onde v a velocidade de ensaio, d é o diâmetro da sonda e c_h é o coeficiente de consolidação horizontal), e quando adotado o coeficiente de consolidação vertical tem-se $V_v = v \cdot d / c_v$ (onde v a velocidade de ensaio, d é o diâmetro da sonda e c_v é o coeficiente de consolidação vertical). Diferentes propostas para escrita do grau de

drenagem (U) e das parcelas de resistência (Q) também podem ser encontradas em literatura. Independente da normalização adotada o conjunto de dados utilizados para elaboração da Figura 1 destaca-se por apresentar alta dispersão. Uma proposta de quantificação desta dispersão é apresentada no presente trabalho que visa racionalizar a interpretação fornecendo limites teóricos apropriados.

2 ANÁLISE DA VARIABILIDADE INERENTE

Medidas básicas para a caracterização da variabilidade de um material consistem em estabelecer valores de parâmetros básicos como média (μ), desvio padrão (σ), coeficiente de variação (COV), função densidade de probabilidade (FDP - normal, lognormal, etc), entre outros. No entanto, antes de estabelecer cálculos estatísticos básicos é importante destacar os conceitos de Phoon e Kulhawy (1999) sobre as fontes de incerteza em geotecnia, as quais podem ser agrupadas 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 a 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.

O presente trabalho objetiva caracterizar a variabilidade inerente dos materiais (Grupo (i)), devido ao processo de formação. Neste sentido, assume-se que a investigação é representativa, que os ensaios foram executados de forma apropriada, com equipamentos calibrados. Para tanto, a análise irá se embasar inicialmente na caracterização dos parâmetros básicos dos ensaios, medidas diretas. Na sequência, incorpora-se também a incerteza do modelo de transformação (Grupo (iii)), através da análise estatística de parâmetros derivados (e.g. ângulo de atrito).

3 LOCAL DE ESTUDO

3.1 Caracterização básica

Localizada na região leste do estado da Bahia, o depósito Fazenda Brasileiro é uma instalação de armazenamento de rejeitos de ouro que tem sido objeto de investigação desde 2002 (Schnaid et al., 2004; Bedin, 2010; Klahold, 2013; Sosnoski, 2016; e Nierwinski, 2019). As campanhas de investigação compreendem ensaios de laboratório e campo e indicaram que o material disposto nos lagos é predominantemente areia siltosa, pouco ou não plástica, com alto peso específico de sólidos (G_s - variando de 2,79 a 3,30 g/cm³). Em laboratório foram realizados ensaios triaxiais drenados e não drenados em compressão e extensão sob carga monotônica, o que possibilitou o estabelecimento da linha de estado crítico (CSL) (Bedin et al., 2012; Nierwinski, 2019) com um ângulo de atrito (ϕ) em torno de 30 graus e um índice de compressibilidade λ de 0,05.

A caracterização em campo foi realizada através da execução de onze (11) ilhas de investigação, nas quais foram coletadas amostras e foram realizados ensaios *in situ*, ensaios de piezocone (tanto CPTu convencional quanto SCPTu com medições sísmicas), ensaio dilatômetro sísmico (SDMT) e ensaios de palheta. A seguinte nomenclatura será usada para representar os ensaios de piezocone de diferentes campanhas: PZC01 a PZC08, Bedin (2010); I1K e I2K, Klahold (2013); e I1S, Sosnoski (2016).

Para avaliar as condições de drenagem, uma série de sondagens CPTu foi conduzida no local da Fazenda Brasileiro com velocidades de penetração variando de 0,1 mm/s a 57 mm/s. O que permitiu realizar uma comparação direta entre resultados e a construção de curvas características de drenagem já apresentadas na Figura 1.

3.2 Caracterização estatística

A caracterização da variabilidade dos rejeitos de ouro foi realizada para cada sondagem vertical de piezocone considerando somente os ensaios realizados na velocidade de penetração padrão ($v=20$ mm/s). Um

total de onze (11) sondagens foram avaliadas, e cada sondagem teve um número de medições disponíveis variando de 370 a 1047. Os valores médios, coeficiente de variação (COV) e Escala de Flutuação dos parâmetros q_c , f_s e u_2 e seus valores residuais (após remoção de tendência) foram caracterizados. As funções de densidade de probabilidade (PDFs) de cada parâmetro e do coeficiente de atrito derivado também foram avaliadas. Embora a caracterização estatística completa inclua escalas de flutuação, por uma questão de simplicidade, elas não serão apresentadas neste estudo.

Uma visão geral dos resultados pode ser visualizada na Tabela 1, onde são apresentados os valores de média, coeficiente de variação COV, e função densidade de probabilidade (PDF) para as ilhas avaliadas. Os valores médios de q_c variaram de 392,50 a 4677,74 kPa, os valores médios de f_s variaram de 3,13 a 34,40 kPa, e os valores médios de u_2 variaram de 36,46 a 132,38 kPa. Os coeficientes de variação COVs exibiram uma faixa de 0,18 a 5,27 (equivalente a 18% a 527%). Os valores de COV após a remoção das tendências se mostraram de forma geral semelhantes, quando considerada as medidas de q_c e f_s . De forma geral a faixa de amplitude de COV é alta mas similar à de estudos conduzidos em materiais siltsosos e rejeitos de mineração (Liu e Chen, 2010; Villavicencio et al., 2011).

Tabela 1. Estatística para os valores de q_c , f_s e u_2 em diferentes ilhas de investigação (adaptado de Dienstmann et al. 2024)

Sondagem	q_c				f_s				u_2			
	média (kPa)	COV	COV res	PDF best fit	média (kPa)	COV	COV res	PDF best fit	média (kPa)	COV	COV res	PDF best fit
I1K	392.5	0.76	0.81	LN	3.52	0.83	0.83	LN	101.74	0.77	0.36	N
I1S	553.99	0.9	0.93	EXP	6.27	0.61	0.6	LN	132.88	0.5	0.33	N
I2K	879.61	1.2	1.04	EXP	15.59	2.71	2.54	-	69.69	0.87	0.7	-
PZC 01	863.6	0.87	0.85	-	7.34	0.78	0.82	EXP	111.05	0.54	0.32	N
PZC 02	3145.89	0.37	0.41/0.69*	LN	22.93	0.5	0.43/0.69*	N	93.97	0.28	0.64/0.33	-
PZC 03	3852.24	0.67	0.67	LN	34.4	0.67	0.73	LN	93.2	0.34	0.62	N
PZC 04	738.44	0.92	0.83	-	6.49	0.81	0.8	-	106.42	0.52	0.26	N
PZC 05	4467.74	0.3	4.63	N	31.61	0.26	0.33	N	57.34	0.53	1.07	N
PZC 06	174.56	0.46	0.47	N	3.13	0.69	0.49	N	86.72	0.51	0.18	N
PZC 07	1785.63	1.23	0.86/0.56*	-	8.39	0.91	1.47/0.43*	-	36.52	0.91	0.60/0.42	N
PZC 08	373.13	1.21	0.71/0.71*	EXP	6.08	0.46	0.37/0.45*	LN	74.13	0.72	5.27/0.33	-

*quebras de tendência.

OBS: Na tabela 1 leia-se N - distribuição Normal, LN – distribuição Lognormal, e EXP – distribuição exponencial.

Para estabelecer leis estatísticas apropriadas para modelar a variabilidade dos dados de rejeitos, foram construídos histogramas dos parâmetros q_c , f_s e u_2 e comparados seus resultados com Funções de Densidade de Probabilidade (PDFs) teóricas. A Tabela 1 fornece um resumo dos dados estatísticos e das melhores PDFs de ajuste para cada sondagem.

Ao considerar as medições diretas de q_c , f_s e u_2 , a análise revelou que a grande variabilidade do material levou a diferentes aplicações potenciais de funções de densidade de probabilidade (PDFs). Por exemplo, nas Ilhas I1K e PZC03, a distribuição lognormal mostrou-se adequada para modelar a variabilidade dos dados de q_c e f_s , enquanto uma distribuição normal foi apropriada para modelar os dados de u_2 . Tendências semelhantes foram observadas para dados da Ilha PZC05 e da Ilha PZC06, onde as medições de q_c , f_s e u_2 foram consideradas mais próximas de distribuições normais. Em alguns casos, a distribuição exponencial mostrou-se adequada para modelar certos parâmetros em sondagens específicas, como q_c em I1S, I2K e PZC08. A análise foi realizada utilizando o software Rstudio e foram priorizadas as funções normal, lognormal, exponencial, gama e Weibull nessa ordem, pois essas funções têm aplicações estabelecidas na literatura de engenharia geotécnica. A análise de histogramas típicos pode ser consultada com mais detalhes em Perini (2021), e Dienstmann et al. (2023).

Visando aplicações numéricas foram calculados os valores de ângulo de atrito a partir dos dados piezocone e correlações de Kulhawy e Mayne (1990), Mayne e Campanella (2005), e a abordagem da Norwegian University of Science and Technology (NTNU) (Senneset et al., 1988; 1989). As Equações 1 (para areias limpas) e 2 (para tipos de solo mistos) foram empregadas para calcular os valores do ângulo de atrito com base na razão de poropressão B_q , conforme indicado:

$$\phi' = \arctan \left[0.1 + 0.38 \log \left(\frac{qt}{\sigma'_{v0}} \right) \right] \rightarrow \text{for } B_q < 0.1 \quad (1)$$

$$\phi' = 29.5^\circ \times B_q^{0.121} \left[0.256 + 0.336 B_q + \log Q \right] \rightarrow \text{for } 0.1 < B_q < 1 \text{ and } 20^\circ < \phi' < 45^\circ \quad (2)$$

No caso de parâmetros de resistência derivados a Figura 2 apresenta a análise de aderência a funções normal e lognormal. Esta apresentação é composta pela plotagem de histograma e funções teóricas, Figura 2a, complementados com gráficos de quantis (Q-Q plots), Figura 2b. Os gráficos quantis Q-Q são utilizados para comparação direta entre a distribuição real dos parâmetros e aquela obtida quando uma distribuição teórica é considerada. Um bom ajuste é indicado quando os pontos no gráfico formam aproximadamente uma reta. Com base nos resultados apresentados verifica-se que o ângulo de atrito, de forma geral, se adequa bem à representação por uma distribuição normal ou lognormal, indicando um valor médio de 30,1° com desvio de 4,72° o que corresponde a um COV de 15,7%.

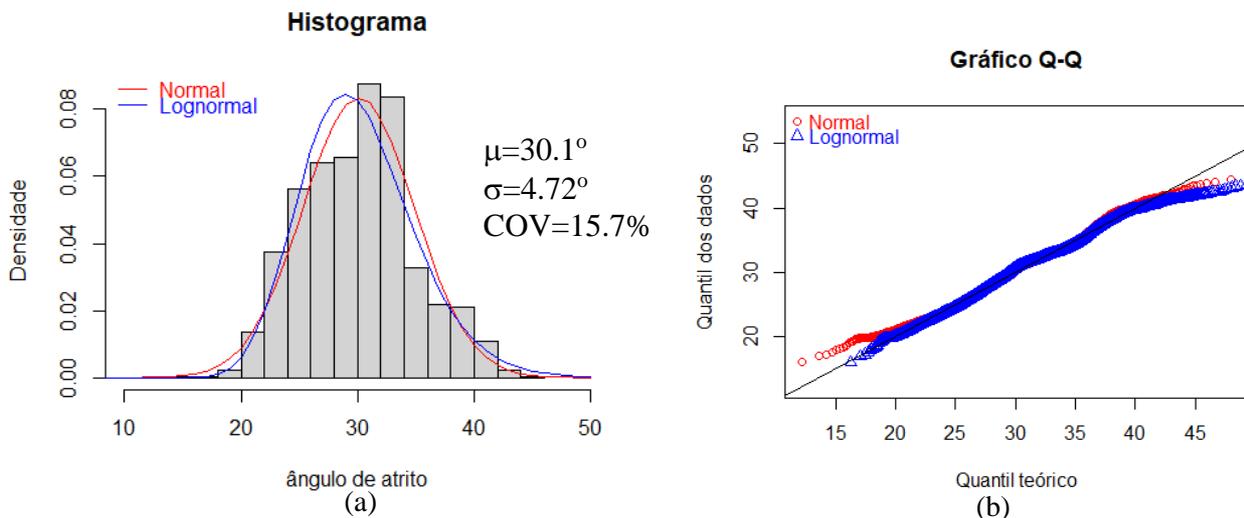


Figure 2. Análise PDF ângulo de atrito: (a) histograma; (b) quantis - (adaptado de Dienstmann et al., 2023)

4 APLICAÇÃO NUMÉRICA

4.1 Expansão de cavidade

A aplicação numérica consiste em realizar um conjunto de simulações numéricas utilizando a teoria de expansão de cavidade como referência. O modelo consiste em uma expansão cilíndrica e axisimétrica de cavidade com uma malha discretizada definida por uma "fatia" do meio poroso com condições de contorno mecânicas apropriadas: restrição de movimento vertical no topo e na parte inferior, restrição de movimento horizontal no lado direito; imposição de deslocamento radial (ξ_r) na parede da cavidade, conforme detalhado na Figura 3. A extensão da fatia é definida como 100R, o que se mostrou suficiente para evitar efeitos de fronteira. A massa de solo no presente estudo é modelada considerando um modelo elastoplástico do tipo Cam Clay (Clay Plasticity - software Abaqus), que foi considerado como representativo dos dados de campo.

O modelo de expansão de cavidade pode ser considerado uma simplificação geométrica do ensaio real de piezocone, modelo originalmente proposto e verificado em Dienstmann et al. (2017) também adotado em Dienstmann et al. (2018a e 2018b) e Mafra e Dienstmann (2022). A resposta de drenagem pode ser analisada por meio da distribuição de tensões radiais e do comportamento na parede da cavidade ($r=R$). Análises comparativas diretas entre as curvas de drenagem construídas a partir de dados *in situ* e os resultados da modelagem também foram avaliadas. Os estudos demonstram o potencial de uso da solução numérica, especialmente na representação do comportamento em termos de curvas de drenagem normalizadas. Na

presente análise visou-se introduzir a variabilidade do material através de um conjunto de simulações numéricas considerando o método de Monte Carlo nas quais o ângulo de atrito foi variado respeitando a distribuição caracterizada no item 3.2. No total, 1200 valores aleatórios de ϕ foram inicialmente gerados, e um limite de 2 desvios foi aplicado, retornando 1138 pontos que foram importados para a análise numérica. Cada conjunto de dados foi simulado considerando cinco (5) diferentes velocidades de expansão, totalizando 5690 resultados que foram utilizados para análise da dispersão no espaço $V \times U$ e $V \times Q$. A Equação 3, proposta em Dienstmann et al. (2018b) foi utilizada para converter os dados de tensão radial e poropressão em resistência mobilizada no piezocone.

$$q_c = \sigma_r' (1 + \tan \delta / \tan \alpha) / (1 - \tan \delta \tan \alpha) + u \quad (3)$$

onde α é metade do ângulo da ponta do cone (valor usual $60^\circ/2=30^\circ$), δ é o atrito de interface considerado como o ângulo de atrito do solo, σ_r' e u são respectivamente a tensão radial efetiva e a poropressão gerada na parede do cilindro em expansão.

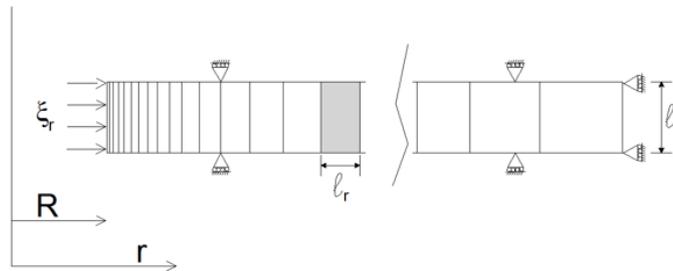


Figura 3. Modelo geométrico expansão de cavidade (fora de escala) - adaptado de Dienstmann et al. (2017)

Em resumo, o conjunto de parâmetros considerado foi: raio do cilindro de 0,0178m; tensão inicial de 100kPa; distribuição inicial de poropressão de 50kPa seguindo distribuição proposta em Dienstmann et al. (2017) com raio de influência de 5R; ângulo de atrito (ϕ) variável (log-normal, com média= $30,1^\circ$ e COV de 15,7% - convertido para coeficiente de atrito $M=6\sin\phi/(3-\sin\phi)$); índice de compressão (λ) de 0,045; índice de recompressão (κ) de 0,009; permeabilidade (k) de $1,5e-7$ m/s; índice de vazios (e_0) de 1,2.

A Figura 4 fornece uma visualização 3D da análise de MC ilustrando a variação em q_c/q_{cUD} para as cinco velocidades avaliadas. A figura revela um aumento na dispersão quando as velocidades normalizadas são reduzidas (aumentando a drenagem), com uma amplitude máxima de q_c/q_{cUD} variando de 1,5 a 3,4 em velocidades normalizadas $V=0,00001$. O conjunto de resultado também são apresentados na Figura 5, que mostra linhas probabilísticas para o comportamento médio, mínimo e máximo, bem como a dispersão dos dados de campo.

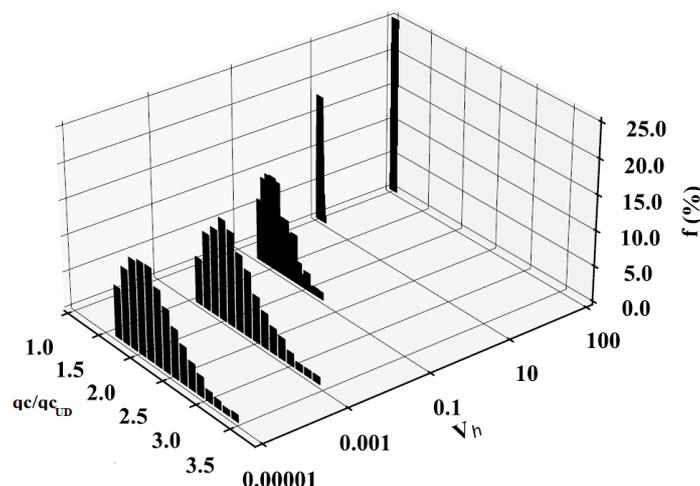


Figura 4. Distribuição espacial de $V \times Q \times$ frequência de dados - adaptado de Dienstmann et al., (2024)

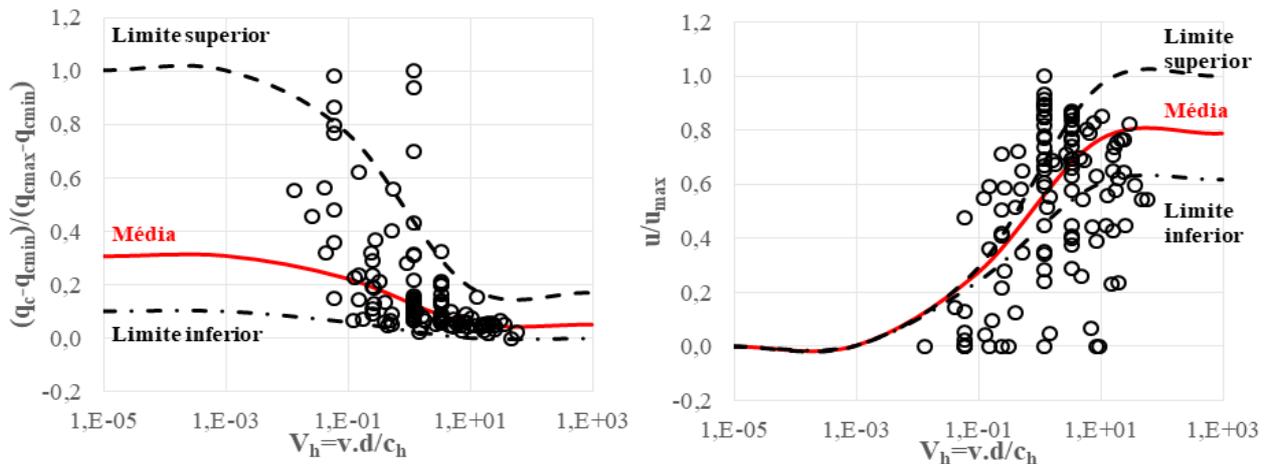


Figura 5. Curvas teóricas características de drenagem considerando a variabilidade de dados – adaptado de Dienstmann et al. (2024).

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo apresentar a influência da variabilidade dos dados na interpretação do comportamento de drenagem por meio das curvas características de drenagem ($V \times Q$ e $V \times U$). Nesse sentido, a caracterização estatística do depósito por meio da análise de ensaios de piezocone foi apresentada e utilizada em uma abordagem numérica. A caracterização estatística compreendeu a definição da média, COV, e Funções de Densidade de Probabilidade. A aplicação numérica consistiu na modelagem da penetração do piezocone como uma expansão de cavidade introduzindo a variabilidade inerente do solo em uma abordagem de Monte Carlo através da qual foram definidos limites teóricos para as curvas características de drenagem ($V \times U$ e $V \times Q$). Os limites teóricos probabilísticos de comportamento, caracterizados pela aplicação de MC, podem ser utilizados para estabelecer de forma mais assertiva os limites de velocidades a serem executadas em campo para estabelecer ensaios totalmente drenados e não drenados.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro e de infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bedin, J. (2010). *Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração*, 207 p, Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Carraro, J. A., Prezzi, M. (2007) A new slurry-based method of preparation of specimens of sand containing fines. *ASTM. Geotechnical Testing Journal*, v. 31, n. 1.
- DeJong, J.T, and Randolph, M.F (2012). “Influence of Partial Consolidation during Cone Penetration on Estimated Soil Behavior Type and Pore Pressure Dissipation Measurements.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000646, 777-788.
- Dienstmann, G., Maghous, S. and Schnaid, F. (2017). Theoretical analysis and finite element simulation for nonlinear poroelastic behavior of cylinder expansion in infinite media under transient pore-fluid flow conditions. *International Journal of Geomechanics*. 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000834, 1-19.

- Dienstmann, G.; Schnaid, F. ; Maghous, S. ; DeJong, J. (2018a). Piezocone Penetration Rate Effects in Transient Gold Tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(2):04017116.
- Dienstmann, G., Maghous, S. and Schnaid, F. (2018b) Assessment of Rate Effects in Piezocone Tests from Poroelastic Cavity Expansion Analysis. *Soils and Rocks*, 41(3): 319-332.
- Dienstmann, G., Ziesmann, N., Meier, A. L., & de Campos, J. P. (2023). Análise da variabilidade inerente através de em ensaios de piezocone: aplicação a resíduos de mineração. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 16(11), 28547–28564. <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.11-227>
- Dienstmann G., Perini L., Meier A.L., Ziesmann N. and Campos J.P. (2024) Incorporating inherited variability into drainage effect analysis of piezocone tests in gold tailings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Geotechnical Engineering*, <https://doi.org/10.1680/jgeen.23.00082>
- Klahold, P.A. (2013). *Interpretação de ensaios de campo em solos com Permeabilidade intermediária*, 105 p, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Kulhawy, F.H. and P.W. Mayne (1990) *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*, Report EPRI EL6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., 1990, 306 pp.
- Liu, C.N., Chen, C.H., (2010). Spatial correlation structures of CPT data in a liquefaction site. *Engineering Geology* 111 (2010) 43–50.
- Mafra, V. and Dienstmann, G (2022). "Cavity expansion solutions applied to help assess the partial drainage behavior characterization of the piezocone test. *Computers and Geotechnics* 152: 105017.
- Mayne, P.W. and Campanella, R.G., “Versatile Site Characterization by Seismic Piezocone,” *Proceedings, 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 2 (Osaka), Millpress, Rotterdam, The Netherlands, 2005, pp. 721–724.
- Nierwinski, H.P. (2019). *Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de mineração*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
- 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, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Phoon, K.K. and Kulhawy F.H. (1999) Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal* 36: 612–624.
- Reid, D.; Fanni, R. and Fourie, A. (2021) Effect of Tamping Conditions on the Shear Strength of Tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(6). <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0269>.
- Schnaid, F., Lehane, B. M., and Fahey, M. (2004). “In situ test characterization of unusual geomaterials.” *Proc., 2nd International Conference on Site Characterization*, vol. 1, Millpress, Rotterdam, Netherlands.
- Schnaid, F., Dienstmann, G., Odebrecht, E. and Maghous, S. (2020) A simplified approach to normalisation of piezocone penetration rate effects. *Geotechnique*, 70(7): 630-635. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.T.033>.
- Senneset, K., R. Sandven, T. Lunne, T. By, and T. Amundsen, (1988) “*Piezocone Tests in Silty Soils, Penetration Testing 1988*, Vol. 2, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1988, pp. 955–974.
- Senneset, K., R. Sandven, T. and Janbu, N. (1989) “Evaluation of Soil Parameters from Piezocone Tests,” *Transportation Research Record 1235*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C, pp. 24–37
- Sosnoski, J. (2016). *Interpretação de ensaios de CPTU e DMT em solos com permeabilidade intermediária*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Dissertação de Mestrado.
- Villavicencio, A. G., Breul, P., Bacconnet, C., Boissier, D. & Espinace, A.R. (2011) Estimation of the Variability of Tailings Dams Properties in Order to Perform Probabilistic Assessment. *Geotechnical and Geological Engineering* volume 29, pages 1073–1084