

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/803

Análise de Dispersão de Medidas de Ensaio CPTu e Impacto em Comportamento e Resistência Não Drenada

Guilherme Henrique da Silva Pinto
Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima – MG, Brasil
guilherme.henrique@pimentadeavila.com.br

André de Oliveira Faria
Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima – MG, Brasil
andre.faria@pimentadeavila.com.br

Mauro Pio dos Santos Junior
Coordenador de Geotecnia, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima – MG, Brasil
mauro.junior@pimentadeavila.com.br

RESUMO: A confiabilidade das medidas de dados de ensaios é de suma importância para a correta avaliação do comportamento e definição de parâmetros de resistência dos geomateriais. O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise da confiabilidade e repetibilidade dos dados obtidos através da execução de 3 ensaios CPTu realizados em um rejeito de mineração de bauxita. Foram realizadas as análises comparativas: (i) dos dados brutos obtidos (q_t , f_s e u_2) e a dispersão observada; (ii) da classificação comportamental segundo as metodologias propostas por Roberston (1990, 2016) e Schneider *et al.* (2008); e (iii) determinação da resistência não drenada de pico, considerando as metodologias de Lunne *et al.* (1997), sendo os resultados comparados estatisticamente pela aplicação do teste *t-student*. Dentre os resultados obtidos destaca-se: (i) repetibilidade da resistência de ponta (q_t) e da poropressão (u_2), sendo obtido resultados próximos em toda a profundidade analisada; (ii) ausência de repetibilidade e impacto das medidas do atrito lateral (f_s) na determinação do comportamento, sendo que um dos ensaios apresentou medidas iguais a zero ao longo da profundidade; e (iii) a média dos valores da resistência não drenada de pico foram estatisticamente iguais (considerando o mesmo N_{kt} e o mesmo $N_{\Delta u}$).

PALAVRAS-CHAVE: CPTu, Parâmetros de resistência, Rejeitos de bauxita, Confiabilidade

ABSTRACT: The reliability of test data measurements is of paramount importance for the correct assessment of the behavior and definition of resistance parameters of geomaterials. The paper herein aims to carry out an analysis of the reliability and repeatability of the data obtained through the execution of 3 CPTu tests carried out on a bauxite mining tailings. Comparative analyzes were carried out: (i) of the raw data obtained (q_t , f_s and u_2) and the observed dispersion; (ii) behavioral classification according to the methodologies proposed by Roberston (1990, 2016) and Schneider *et al.* (2008); and (iii) determination of yield undrained shear strength, considering the methodologies of Lunne *et al.* (1997), with the results being statistically compared by applying the Student's t-test. Among the results obtained, the following stand out: (i) repeatability of tip resistance (q_t) and pore pressure (u_2), with close results being obtained throughout the analyzed depth; (ii) lack of repeatability and impact of lateral friction measurements (f_s) in determining behavior, with one of the tests showing measurements equal to zero throughout the depth; and (iii) the mean yield undrained shear strength values were statistically equal (considering the same N_{kt} and the same $N_{\Delta u}$).

KEYWORDS: CPTu, Shear strength parameters, Bauxite tailings, Reliability

1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade das medidas de engenharia é de suma importância para a avaliação assertiva do comportamento e parâmetros dos geomateriais, sejam eles solos ou rejeitos de mineração. Para realizar tal avaliação, o ensaio de piezocone se configura atualmente como uma ferramenta econômica, rápida, e de fácil

acesso nacional e internacional (Schnaid, 2009). A execução do ensaio de CPTu é normatizado segundo a norma internacional 22476-1 (ISO, 2022) e tem o seguinte princípio de realização: cravação de um cone com 10 cm² ou 15 cm² de área, com 60° no ápice e com a velocidade padrão de 2,0 cm/s. O ensaio retorna quatro medidas principais: (i) a resistência de ponta (q_c), que representa a resistência do solo à cravação do cone; (ii) o atrito lateral (f_s), que consiste na aderência do solo à luva de atrito; (iii) a poropressão de cravação (u), geralmente medida atrás do cone (u_2); e (iv) a poropressão de equilíbrio (u_0), medida em profundidades específicas por meio dos ensaios de dissipação de poropressão (DDP), os quais consistem em paradas programadas na cravação do cone e medida da dissipação do excesso de poropressão gerado.

Cabe destacar que, devido a atuação da poropressão em áreas desiguais do cone, a resistência de ponta é corrigida para a resistência de ponta total (q_t), com base na equação sugerida por Lunne *et al.* (1997), sendo: $q_t = q_c \times u_2 (1-a)$, em que o parâmetro “a” representa a razão entre as áreas do cone (usualmente igual a 0,80).

Sobre a confiabilidade das medidas do cone, Lunne *et al.* (1997) reportou que, em solos moles, o atrito lateral apresenta baixa acurácia e baixa repetibilidade. Já Robertson (1990) sugere que, para solos moles, a poropressão é o parâmetro de maior confiabilidade, visto que possui maior magnitude que a resistência de ponta e o atrito lateral. Trabalhos recentes de Cabal e Robertson (2014), bem como Mayne (2023a) exploraram tal temática, avaliando a repetibilidade para dois diferentes solos: (i) *Young Bay Mud*; e (ii) *Onsøy soft clay*, respectivamente. O resultado obtido pelos autores é apresentado na Figura 1, na qual a resistência de ponta e a poropressão se mostram idênticas em profundidade e o atrito lateral apresenta considerável dispersão, sendo obtidos diferentes perfis para o mesmo solo ensaiado sob as mesmas condições.

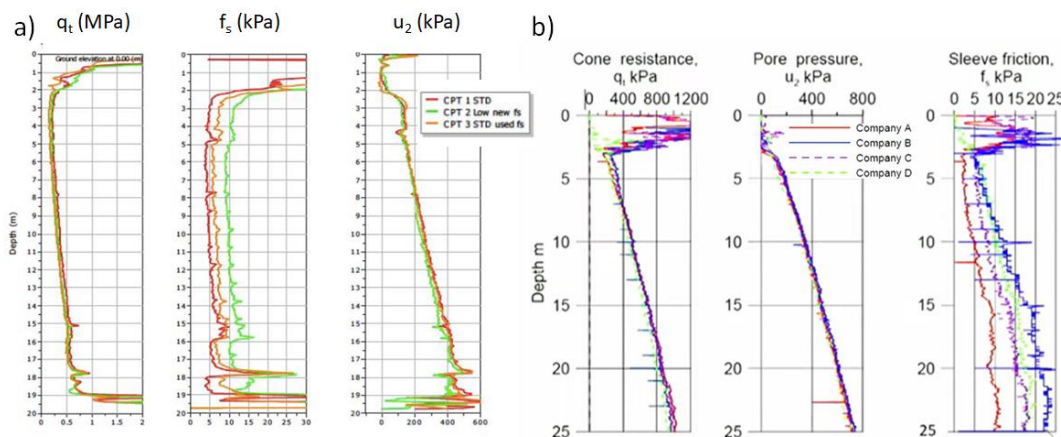


Figura 1. Repetibilidade de medidas de ensaios CPTu, adaptado de: a) Robertson e Cabal (2014); e b) Mayne (2023a).

Dessa forma, o objetivo deste artigo é avaliar a repetibilidade de ensaios de CPTu em rejeitos de mineração de bauxita depositados hidraulicamente com o enfoque em: (i) comparação dos parâmetros base medidos pelos ensaios CPTu (q_t , f_s e u_2); (ii) avaliação comportamental dos rejeitos segundo as metodologias propostas por Robertson (1990, 2016) e Schneider *et al.* (2008); e (iii) avaliação comparativa da resistência não drenada de pico considerando as metodologias propostas Lunne *et al.* (1997). No que tange aos parâmetros de resistência, os valores serão agrupados e avaliados se as médias são estatisticamente iguais ou diferentes, aplicando-se o teste *t-student* assumindo variâncias iguais e considerando um Intervalo de Confiança de 95% (IC = 95%), ou nível de significância de 5% ($\alpha = 5\%$).

2 METODOLOGIA

Para avaliar a repetibilidade das medidas dos ensaios CPTu nos rejeitos de mineração de bauxita, foram realizados três ensaios em dias consecutivos e com um raio de menos de 2,0 m de distância, sendo uma das verticais com ensaios de dissipação de poropressão. Os ensaios foram realizados com o mesmo cone e conforme procedimentos descritos na norma internacional 22476-1 (ISO, 2022).

O cone utilizado possui células independentes para a medição da resistência de ponta e do atrito lateral, sendo a capacidade da resistência de ponta de 50 MPa (50 toneladas), do atrito lateral de 1.600 kPa e da poropressão de 2.500 kPa. Sobre o fator de correção de áreas, o cone utilizado possui o fator “a” igual a 0,7901.

Considerando as máximas medidas do cone e a calibração do cone, foram obtidos os percentuais de erro em relação a capacidade máxima de medida do cone (*Full Scale Output – FSO*) apresentados na Tabela 1. Cabe destacar que para todas as medidas ensaiadas o erro relativo à medida zero (*Zero Loading*) foi nulo. Como pode ser observado na Tabela 1, o maior erro percentual é relativo ao atrito lateral.

Tabela 1. Erros obtidos para cada uma das medidas do cone.

Parâmetro	FSO (kPa)	Erro percentual do FSO	Erro da medida (kPa)
q_t	50.000	0,092%	46,00
f_s	1.600	0,196%	3,14
u_2	2.500	0,080%	2,00

3 AVALIAÇÃO COMPORTAMENTAL

Para a determinação do estado de tensões, a poropressão de equilíbrio (u_0) foi obtida a partir dos ensaios de dissipação realizados e interpolados ao longo da profundidade, sendo o perfil obtido assumido como representativo para os três ensaios. De forma similar, o peso específico foi estimado a partir do teor de sólidos médio da estrutura e utilizado na interpretação dos três ensaios. Conseqüentemente, o estado de tensões totais e efetivas será igual na interpretação dos três ensaios.

3.1 Avaliação dos parâmetros base do ensaio CPTu

A Figura 2 apresenta a comparação em profundidade dos ensaios realizados para cada um dos parâmetros medidos pelo cone. No gráfico das poropressões é apresentado os três ensaios de dissipação realizados em profundidade, com a estimativa da poropressão de equilíbrio obtida pela interpolação dos pontos existentes. Como pode ser observado, a resistência de ponta e a poropressão, apresentam considerável convergência, especialmente a partir da elevação 143,0m, visto que os dados dos ensaios se sobrepõem com perfeição em profundidade. Já para o atrito lateral, os dados dos ensaios apresentam alta dispersão, principalmente abaixo da elevação 145,0 m. Cabe destacar que o ensaio CPTu-05B apresentou valores nulos ou negativos em profundidade, destoante dos demais ensaios.

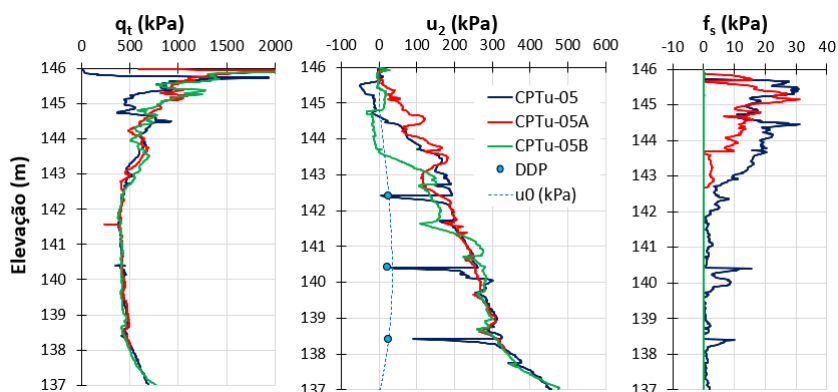


Figura 2. Avaliação comparativa em profundidade dos parâmetros base: a) q_t ; b) u_2 ; e c) f_s .

Considerando o valor médio das medidas do cone e comparando-se com o erro apresentado na Tabela 1, foram calculados os percentuais de erro da resistência de ponta, atrito lateral e poropressão para cada um dos ensaios (valor médio do parâmetro dividido pelo erro da medida apresentado na Tabela 1). Dessa forma, foram obtidos os erros apresentados na Tabela 2, sendo o maior erro percentual relativo ao atrito lateral.

Tabela 2. Erros percentuais obtidos para cada uma das medidas do cone considerando o valor médio.

Ensaio	q_t	f_s	u_2
CPTu-05	0,0042%	4,31%	0,26%
CPTu-05A	0,0038%	7,68%	0,28%
CPTu-05B	0,0037%	455,18%	0,28%

Além da comparação em profundidade, também foi realizada a comparação entre os dados a partir da elevação 143,0m entre pares de ensaios considerando todo o intervalo de dados. O resultado é apresentado na Figura 3, considerando uma linha identidade (valor do eixo das abcissas igual ao eixo das ordenadas) e uma variação de 10% positiva e negativa. Como pode ser observado, os dados de resistência de ponta e poropressão apresentaram dispersão de até 10% entre os valores para a mesma elevação, indicando a repetibilidade das medidas para todos os ensaios comparados. Já para o atrito lateral, é possível observar que os valores se mostram completamente dispersos, plotando fora do intervalo utilizado para avaliação.

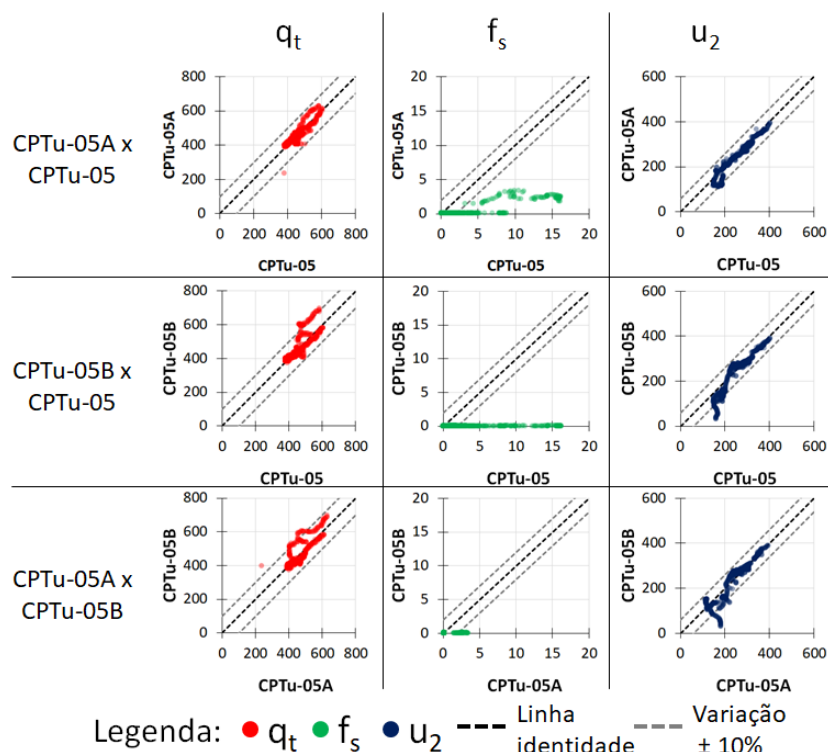


Figura 3. Análise comparativa dos parâmetros base q_t , f_s , e u_2 .

3.2 Avaliação comportamental

3.2.1 Robertson (1990) e Robertson (2016)

Os trabalhos propostos por Robertson (1990, 2016) apontam que os métodos de classificação de solo/rejeitos desenvolvidos com base no ensaio piezocone possuem um viés comportamental, refletindo as condições *in situ* do solo. Dessa forma se diferem dos sistemas de classificação desenvolvidos com base em propriedades físicas (distribuição granulométrica, limites de Atterberg etc.).

Para realizar a classificação em ambos os trabalhos, o autor utiliza de parâmetros normalizados de forma a corrigir o aumento dos parâmetros do cone com o aumento do confinamento. Sendo assim, é proposta a utilização da resistência de ponta normalizada (Q_t), resistência de ponta normalizada pela pressão atmosférica (Q_{tn}), atrito lateral normalizado (F_r) e a poropressão normalizada (B_q). Tais parâmetros podem ser calculados segundo as Equações 1 e 4. Como indicado por Robertson (2016), o expoente “n” apresentado na Equação 2 é aproximadamente igual a 1 para materiais de comportamento argiloso, como o rejeito de bauxita estudado no presente trabalho. Dessa forma, o valor de Q_t passa a ser igual a Q_{tn} para materiais argilosos.

$$Q_t = \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (1)$$

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \right) \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (2)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \times 100\% \quad (3)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (4)$$

A partir dos parâmetros normalizados, Robertson (2016) propõe o índice de comportamento I_B (*Index Behavior Type*) para classificar os geomateriais em três classes: $I_B > 32$ como materiais de comportamento de solo arenoso (*sand-like*); $22 < I_B < 32$ como materiais de comportamento silteoso (*transitional*); e $I_B < 22$ para materiais de comportamento argiloso (*clay-like*). Além disso, o autor propõe o parâmetro CD (*Contractive – Dilative*) para avaliar a resposta ao cisalhamento dos materiais, considerando uma envoltória de $OCR = 4$ para materiais de comportamento argiloso e parâmetro de estado de $-0,05$ ($\Psi = -0,05$) para materiais de comportamento arenoso. Tais índices podem ser calculados segundo as Equações 5 e 6. O ábaco proposto pelo autor é apresentado na Figura 4b.

$$I_B = 100 \frac{Q_{tn} + 10}{Q_{tn} \cdot F_r + 70} \quad (5)$$

$$CD = 70 = (Q_{tn} - 11)(1 + 0,06F_r)^{17} \quad (6)$$

3.2.1 Schneider et al. (2008)

Schneider et al. (2008) propõe uma classificação comportamental a partir de 2 ábacos, sendo um deles baseado em Q_t e F_r e outro, em complemento, baseado em Q_t e no excesso de poropressão. Neste trabalho será utilizado apenas o ábaco baseado em poropressões, visto que já serão utilizados os ábacos propostos por Robertson (1990, 2016) com base nas outras medidas do cone. Sendo assim, o Schneider et al. (2008) propõe a classificação comportamental considerando cinco classes de comportamento, sendo: (i) solos de comportamento arenoso (*essentially drained sands*); (ii) solos transicionais (*transitional soils*); (iii) solos silteosos e argilas com baixos índices de rigidez (*silts and low I_r clays*); (iv) argilas (*clays*); e (v) argilas sensíveis (*sensitive clays*). A Figura 4a apresenta o ábaco proposto pelo autor.

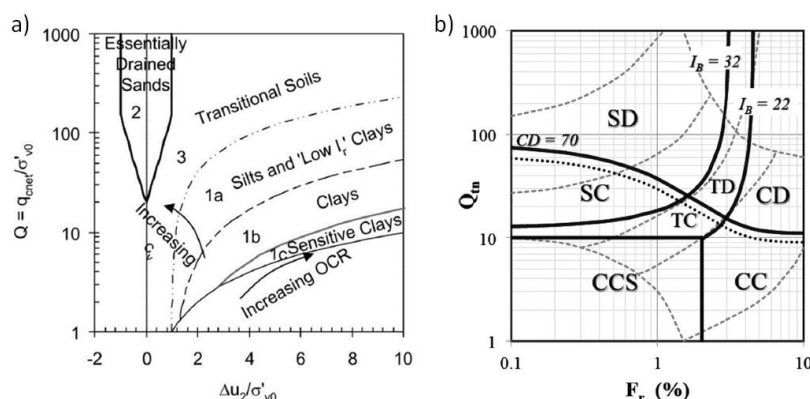


Figura 4. Ábacos de classificação comportamental propostos por: a) Schneider et al. (2008) baseado nas poropressões; e b) Robertson (2016).

3.2.1 Comparação das classificações comportamentais

A Figura 5 apresenta o resultado obtido comparando os 3 ensaios realizados para cada um dos ábacos de classificação de comportamento. Como pode ser observado na Figura 5a, utilizando a metodologia proposta por Robertson (2016), o ensaio CPTu-05 indica um material de comportamento argiloso a argila sensível. Já o ensaio CPTu-05A indica um material de comportamento majoritariamente argiloso a transicional e argila sensível. Por fim, o ensaio CPTu-05B não é plotado no ábaco visto que os valores de f_s obtidos são iguais a zero (ver Figura 2), situando-se fora do intervalo de valores sugerido pelo autor. Dessa forma, nota-se considerável inconsistência da classificação de comportamento devido aos problemas de medição do f_s .

Considerando a proposta de Schneider *et al.* (2008), a avaliação comportamental apresentada na Figura 5b indica a mesma conclusão para os três ensaios, sendo o rejeito de bauxita classificado majoritariamente como um material argiloso a transicional e argila sensível. A convergência do comportamento observada é resultante da repetibilidade da resistência de ponta e do excesso de poropressão (detalhado na Figura 2), sendo tais medidas adotadas como premissa pelo autor.

Por fim, na Figura 5c é apresentada a classificação de comportamento proposta por Robertson (1990), *apud* Mayne *et al.* (2023b). Como pode ser observado, o rejeito de bauxita é classificado como solo argiloso (região 3 do ábaco) em todos os ensaios de forma similar a proposta de Schneider *et al.* (2008), reforçando a convergência dos dados a partir da utilização da resistência de ponta e das poropressões.

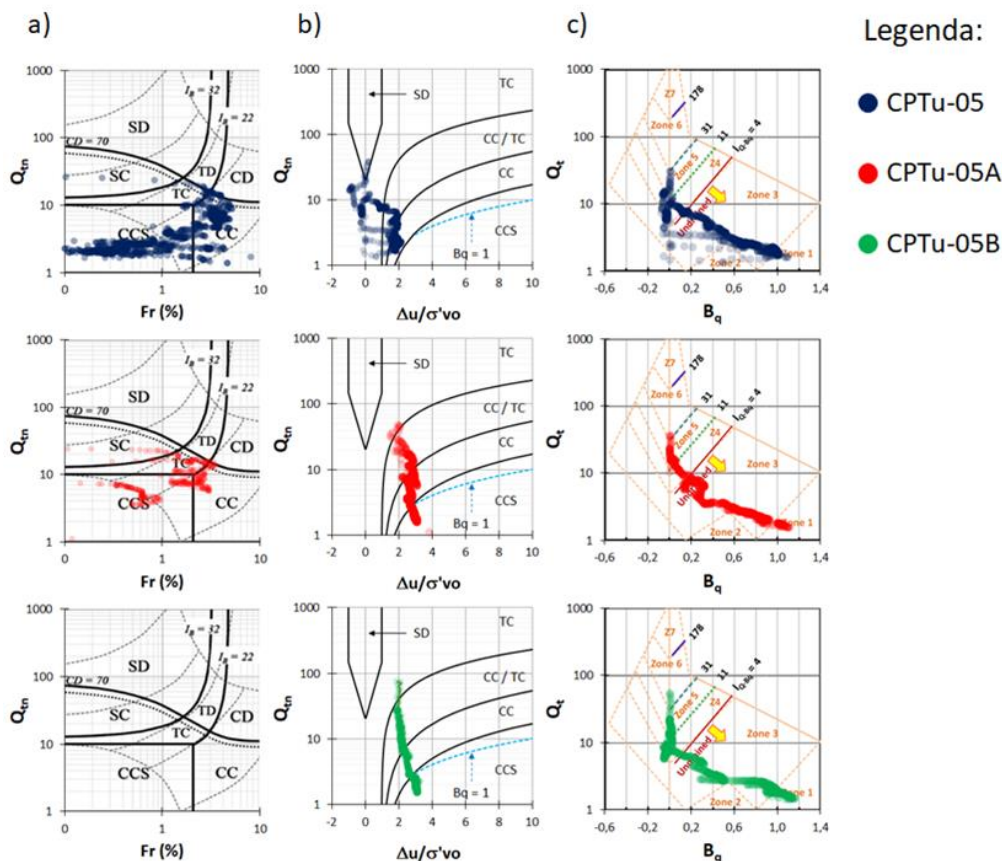


Figura 5. Ábacos de classificação comportamental: a) Robertson (2016); b) Schneider *et al.* (2008); e c) Robertson (1990) *apud* Mayne *et al.* (2023b).

5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA NÃO DRENADA DE PICO

Além das avaliações comportamentais, também foi realizada uma análise comparativa da resistência não drenada de pico (S_u) obtida para cada um dos ensaios. Para tal, foram aplicadas as Equações 7 e 8 propostas por Lunne *et al.* (1997), as quais correlacionam os dados medidos/estimados pelo cone e os fatores N_{kt} e $N_{\Delta u}$.

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (7)$$

$$S_u = \frac{u_z - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (8)$$

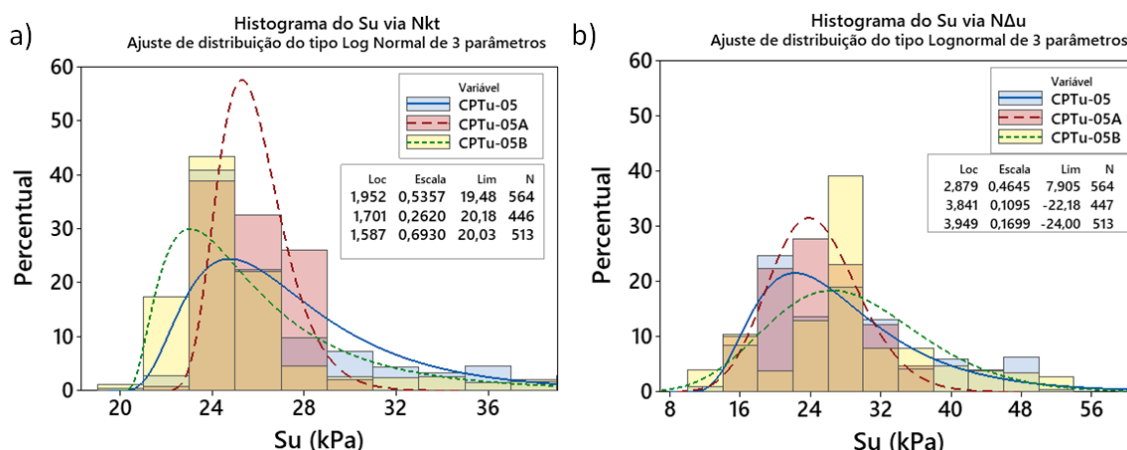
Para a estimativa dos fatores N_{kt} e $N_{\Delta u}$ existem diferentes metodologias propostas na literatura. Neste trabalho, foram adotadas as metodologias propostas por Mayne & Peuchen (2018) e Battaglio *et al.* (1981) detalhadas nas equações 9 e 10 respectivamente. Cabe destacar que foram considerados apenas os trechos dos ensaios com parâmetro B_q maior que 0,40 (i.e., com comportamento não drenado segundo Schnaid, 2009).

$$N_{kt} = 10,5 - 4,6 \ln(B_q + 0,1) \quad (9)$$

$$N_{\Delta u} = 4 + 6B_q \quad (10)$$

Aplicando as Equações 9 e 10 e utilizando os três CPTus, foram obtidos os valores médios de 11 e 9 para os parâmetros N_{kt} e $N_{\Delta u}$, respectivamente.

Os valores de S_u obtidos para cada um dos ensaios foram calculados e agrupados em histogramas, e ajustadas curvas de distribuição do tipo Lognormal de 3 parâmetros, sendo tal distribuição esperada para este tipo de parâmetro (Assis, 2020). O resultado obtido é apresentado na Figura 6 no qual pode ser observado, que os valores da moda (pico das curvas dos ajustes) para os dados de S_u obtidos via N_{kt} apresentam certa diferença, sendo o CPTu-05B o de menor valor (moda igual 23,1 kPa) e o CPTu-05A o de maior valor (moda igual a 25,3 kPa). Já para os dados de S_u obtidos via $N_{\Delta u}$ não foram observadas diferenças expressivas nos valores das modas, visto que os picos das distribuições obtidas são mais próximos quando comparado ao cenário via N_{kt} .



Visando comparar de forma quantitativa os valores obtidos da resistência não drenada de pico para cada um dos CPTus e das metodologias, foi aplicado o teste *t-student* para diferença de médias comparando-se os ensaios um a um. Como descrito por Montgomery (2000), o teste consiste na comparação de duas hipóteses sobre as médias das populações analisadas (μ_1 é a média das amostras do grupo 1 e μ_2 é a média das amostras do grupo 2), sendo:

- H_0 (hipótese nula): $\mu_1 - \mu_2 = 0$;
- H_1 (hipótese alternativa): $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$.

Dessa forma, para que a hipótese nula (H_0) seja rejeitada, o p-valor obtido no teste deve ser inferior a 0,05 (5%) para um Intervalo de Confiança de 95% (nível de significância $\alpha = 0,05$). Logo, valores de p-valor superior a 0,05 indicam que a hipótese nula deve ser aceita em detrimento da hipótese alternativa, isto é, as médias das distribuições analisadas são estatisticamente iguais.

A Tabela 3 apresenta o resultado obtido para os p-valores considerando as duas metodologias para cálculo de S_u . Como pode ser observado, todos os valores obtidos são menores que 0,05, indicando que as médias da resistência não drenada são estatisticamente iguais (sem diferença significativa). Sendo assim, pode-se considerar que os valores calculados por cada um dos CPTus em separado chegam no mesmo valor final, independente da metodologia ou *input* utilizado (resistência de ponta ou poropressão).

Tabela 3. Análise estatística de diferenças significativas, para a resistência não drenada via N_{kt} e $N_{\Delta u}$.

Ensaio Base	Ensaio comparado	p-valor (N_{kt})	p-valor ($N_{\Delta u}$)
CPTu-05	CPTu-05A	0,01	0,01
CPTu-05	CPTu-05B	0,01	0,04
CPTu-05A	CPTu-05B	0,04	0,01

6 CONCLUSÕES

Diferentes trabalhos estudaram a repetibilidade de medidas de ensaio de CPTu, sendo evidenciado problemas relativos à acurácia do atrito lateral (Lunne *et al.* 1997, Cabal & Robertson, 2014 e Mayne *et al.* 2023a). Os resultados aqui obtidos para o rejeito de bauxita em estudo convergem com os dados já apresentados em bibliografia, demonstrando que os perfis de resistência de ponta e poropressão são convergentes em profundidades e o atrito lateral apresenta uma dispersão considerável.

A partir dos dados dos CPTus, foi explorado o impacto na classificação de comportamento segundo a utilização de diferentes ábacos comportamentais. Os resultados indicaram que, para solos moles em que há acurácia de medida das poropressões, a utilização de metodologias que se baseiam em poropressão e resistência de ponta, como Robertson (1990) *apud* Mayne *et al.* (2023b) e Schneider *et al.* (2008), são mais acuradas do que os ábacos que se baseiam no atrito lateral como o de Robertson (2016).

Por fim, a avaliação da resistência não drenada de pico demonstrou que a média dos resultados obtidos são estatisticamente iguais a partir da metodologia aplicada. Dessa forma, os valores encontrados não apresentam diferenças significativas, indicando que a utilização das poropressões ou da resistência de ponta para a estimativa da resistência não drenada de pico resultam em conclusões similares.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Pimenta de Ávila pelo incentivo à publicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assis, A. P. (2020). Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice. *Soil and Rocks*, 43(3), 311-336.
- Battaglio, M., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., & Maniscalco, R. (1981). Piezometer probe test in cohesive deposits. In *Cone penetration testing and experience*. pp. 264-302 ASCE.
- Cabal, K., & Robertson, P. K. (2014). Accuracy and repeatability of CPT sleeve friction measurements. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'14)*. Las Vegas, Nevada, USA.
- International Organization for Standardization (2022). ISO 22476-1: *Geotechnical investigation and testing — Field testing — Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test*.
- Lunne, T.; Robertson, P.K. & Powell, J.J.M. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. First Edition. Abingdon: E & FNSpon Press.
- Mayne P.W. (2023a). Geo-Congress: Karl Terzaghi Lecture. disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=TBHAW7g04W0>
- Mayne P. W., Ethan, C., James, G. (2023b). *A CPT Design Parameter Manual*.
- Mayne, P. W., & Peuchen, J. (2018). *Evaluation of CPTU Nkt cone factor for undrained strength of clays*. *Cone Penetration Testing*, 423-429.
- Montgomery, Douglas C.; Runger, George C.; Calado, Verônica. (2000). *Estatística Aplicada E Probabilidade Para Engenheiros*. Grupo Gen-LTC.
- Robertson. P. K. Soil classification using the cone penetration test (1990). *Canadian Geotechnical Journal*. vol 27, n°1, pp 151-158.
- Robertson, P.K. (2016). Cone Penetration Test (CPT)-based soil behaviour type (SBTn) classification system—an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12), p.1910-1927.
- Schnaid, F. (2009). *In situ testing in geomechanics: the main tests*. CRC Press.
- Schneider, J. A., Randolph, M. F., Mayne, P. W., & Ramsey, N. R. (2008). Analysis of factors influencing soil classification using normalized piezocone tip resistance and pore pressure parameters. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134 (11), 1569-1586.