

Identificação de Solo Orgânico a partir de Ensaio CPTu e Ensaio Geofísico

Vitor Ferreira Junqueira

Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila, Nova Lima, Brasil, vitor.ferreira@pimentadeavila.com.br

Fabiana Aparecida Blanco

Engenheira Geotécnica, Pimenta de Ávila, Nova Lima, Brasil, fabiana.blanco@pimentadeavila.com.br

RESUMO: O presente estudo aborda a identificação de estratos de solo orgânico por meio de ensaios de campo, destacando a relevância dessa determinação para garantir a estabilidade de estruturas. Um ensaio tradicionalmente utilizado é o de Piezocone com medida de poropressão (CPTu), que pode enfrentar desafios em regiões onde a presença de solo orgânico é heterogênea, associado a atividades antrópicas na região. Diante dessa complexidade, o estudo propõe a complementação do ensaio CPTu com ensaios geofísicos para obter uma análise mais abrangente. A metodologia adotada envolveu a realização de ensaios CPTu e geofísicos ao longo da crista de um maciço. Quatro ensaios CPTu foram realizados conforme as normas da ABNT NBR 12069:1991, enquanto um ensaio geofísico foi conduzido por caminhamento elétrico, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 15935:2011. Para a identificação do solo orgânico nos ensaios CPTu, foram considerados parâmetros como resistência de ponta normalizada (q_t), razão de atrito normalizada (F_r), geração de poropressão normalizada (B_q) e índice de classificação comportamental (I_c) de acordo com Robertson (2010). Já nos ensaios geofísicos, o solo orgânico foi identificado através de baixos valores de resistividade (0 a 150 Ohms.m), indicativos de materiais orgânicos deteriorados. Os resultados obtidos revelaram uma concordância satisfatória entre os métodos em algumas verticais. Por exemplo, na primeira vertical estudada, ambos os ensaios identificaram o solo orgânico entre elevações específicas, corroborando as características comportamentais esperadas do material. No entanto, em outras verticais, houve divergências, como na quarta vertical, onde o ensaio CPTu identificou a presença de solo orgânico, enquanto o ensaio geofísico não. Essas divergências foram atribuídas às condições de saturação do solo orgânico durante a realização dos ensaios, evidenciando a importância de considerar fatores temporais e ambientais na interpretação dos resultados. Em suma, o estudo destaca a complementaridade dos métodos CPTu e geofísicos na identificação precisa de solo orgânico em projetos geotécnicos, ressaltando a importância de uma abordagem integrada para uma avaliação mais robusta da subsuperfície.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio CPTu, Ensaio de Eletroresistividade, Solo Orgânico, Ensaios de Campo.

ABSTRACT: The present study addresses the identification of organic soil layers through field tests, emphasizing the relevance of this determination in ensuring the stability of structures. A commonly used test is the Piezocone with pore pressure measurement (CPTu), which may face challenges in regions where the presence of organic soil is heterogeneous, often due to anthropogenic activities. Given this complexity, the study proposes complementing CPTu with geophysical tests to obtain a more comprehensive analysis. The adopted methodology involved conducting CPTu and geophysical tests along the crest of a massif. Four CPTu tests were conducted according to ABNT NBR 12069:1991 standards, while a geophysical test was conducted using electrical sounding, following ABNT NBR 15935:2011 guidelines. For the identification of organic soil in CPTu tests, parameters such as normalized tip resistance (q_t), normalized friction ratio (F_r), normalized pore pressure generation (B_q), and Behavioral Classification Index (I_c) according to Robertson (2010) were considered. In geophysical tests, organic soil was identified through low resistivity values (0 to 150 Ohms.m), indicative of deteriorated organic materials. The results obtained revealed satisfactory agreement between the methods in some verticals. For example, in the first vertical studied, both tests identified organic soil between specific elevations, corroborating the expected behavioral characteristics of the material. However, in other verticals, there were discrepancies, such as in the fourth vertical, where the CPTu test identified the presence of organic soil while the geophysical test did not. These discrepancies were attributed to the saturation conditions of the organic soil during the tests, highlighting the importance of considering temporal and

environmental factors in interpreting the results. In summary, the study emphasizes the complementarity of CPTu and geophysical methods in accurately identifying organic soil in geotechnical projects, underscoring the importance of an integrated approach for a robust subsurface evaluation.

KEYWORDS: CPTu Test, Electrical resistivity survey, Organic Soil, Field Tests.

1 INTRODUÇÃO

O mapeamento amplo dos materiais presentes no subsolo é crucial em diversos projetos geotécnicos, abrangendo desde fundações de edifícios até a construção de infraestrutura de transportes e barragens de rejeito de mineração. Solos com características diferenciadas, como solos orgânicos, podem apresentar desafios significativos devido à sua baixa capacidade de suporte, alta compressibilidade e mudança de comportamento ao longo do tempo. Esses solos podem afetar a integridade estrutural de fundações, taludes e outros elementos construtivos.

Nesse contexto, os ensaios de Piezocone (CPTu – *Cone Penetration Test with porepressure measure*) emergem como alternativa de ensaio *in-situ*, devido à sua capacidade de ser utilizado tanto para a classificação comportamental de solos quanto para a estimativa de parâmetros geotécnicos baseada em métodos empíricos.

Atualmente, a maior parte da pesquisa publicada no campo da aplicação do CPTu se concentra em solos minerais. Contudo, as correlações existentes baseadas no ensaio para argilas minerais não capturam adequadamente o comportamento de argilas orgânicas e turfas em comparação com outros tipos de solo. Nesse contexto, Lengkeek (2022) propôs um avanço na identificação de materiais orgânicos com uma revisão do ábaco de classificação comportamental SBT proposto por Robertson (2016). Conforme observado pelo autor, os solos orgânicos frequentemente apresentam valores razão de atrito normalizada (Fr) acima de 10%, fora, portanto, do ábaco comportamental proposto em 2016 por Robertson.

No presente estudo, apresenta-se um estudo de caso de um maciço de uma barragem de rejeitos de mineração onde se verifica a existência de vários bolsões de material orgânico dispersos na matriz argilosa da fundação. Essa condição é resultado da atividade antrópica na região, incluindo a lavra e a deposição de estéril argiloso, juntamente com resíduos de vegetação desmatada e solo orgânico superficial removido. Assim, a fundação da estrutura analisada é caracterizada por uma distribuição totalmente aleatória de material orgânico, o que dificulta substancialmente sua identificação e mapeamento precisos.

Para identificar de forma abrangente os bolsões de matéria orgânica na região, foi realizado um ensaio geofísico utilizando o método da eletrorresistividade na crista do maciço em estudo. As leituras históricas de piezômetros instalados em materiais orgânicos na área indicam que esses piezômetros registram aumento de carga durante o período chuvoso, demonstrando que o material orgânico frequentemente se encontra saturado, ao contrário da matriz argilosa circundante. Diante disso, o ensaio geofísico com caminhamento geoeletrico pelo método da eletrorresistividade apresenta-se como uma alternativa valiosa para a identificação de materiais em condição saturada, permitindo, assim, o mapeamento abrangente dos bolsões de matéria orgânica existentes na fundação do maciço.

Nesse contexto, pretende-se comparar os resultados obtidos em quatro verticais de ensaios Cone de Penetração com Piezocone (CPTu) e em uma poligonal de ensaio geofísico realizado por caminhamento elétrico, utilizando o método da eletrorresistividade. O objetivo é analisar a fundação de um maciço que é composta por uma matriz argilosa composta com bolsões de material orgânico. Essa comparação busca avaliar a eficácia na identificação e mapeamento de materiais orgânicos na estrutura investigada, apontando as vantagens e limitações de cada ensaio.

2 METODOLOGIA

Para a realização do trabalho, foi considerado um banco de dados composto por 4 (quatro) ensaios CPTu realizados ao longo da crista de um maciço, conforme ABNT NBR 12069:1991 e ASTM D6067/D6067M-17, e 1 (um) ensaio geofísico conduzido por caminhamento elétrico ao longo da mesma crista, conforme ABNT NBR 15935:2011. O ensaio geofísico foi executado pelo método geoeletrico da eletrorresistividade, com a técnica de imageamento elétrico e arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento de 10 metros entre os eletrodos. A Figura 1 um croqui esquemático com a localização dos ensaios executados. Por questões de confidencialidade dos dados utilizados, não estão sendo apresentadas coordenadas dos ensaios de campo realizados.



Figura 1. Croqui esquemático com a localização dos ensaios realizados.

A identificação do solo orgânico por meio dos ensaios CPTu disponíveis no banco de dados estudado foi feita por meio da avaliação de alguns parâmetros que caracterizam o comportamento do material. O primeiro parâmetro estudado é a resistência de ponta normalizada (q_t), que se caracteriza por apresentar valores abaixo de 2,5 MPa na matriz argilosa circundante aos bolsões de matéria orgânica, característica essa que não é alterada no interior dos bolsões. A presença de raízes, fibras vegetais ou material orgânico em estágios de decomposição maiores podem ocasionar pequenas variações no parâmetro aferido, contudo, para identificar o material, considerou-se a premissa de $q_t \leq 2,5$ MPa.

Conforme pontuado por Lengkeek (2022), a razão de atrito normalizada (F_r) costuma apresentar valores acima de 10% em solos de origem orgânica, geralmente associado à presença de fibras de vegetação e às características compressivas desse tipo de material. A título de identificação do material, considerou-se como premissa de que valores de F_r elevados, por vezes acima de 10%, estão associados à presença de material orgânico.

O terceiro parâmetro utilizado na identificação do solo orgânico é a razão de poropressão normalizada (B_q) maior do que 0. A matriz argilosa mineral existente ao redor dos bolsões de matéria orgânica não possui a característica de geração de poropressão significativa na cravação do Piezocone, ao contrário de algumas regiões em que se identifica a presença de matéria orgânica, o que pode estar associada à degradação do material orgânico e consequente geração de poropressão no cisalhamento.

Índice de classificação comportamental (I_c), de Robertson (2010), maior do que 3,6. A alta compressibilidade do material orgânico associado confere aos bolsões uma razão de atrito normalizada (F_r) valores acima de 10%, o que faz com que os valores I_c (Robertson, 2010) sejam, geralmente, acima de 3,6. Cabe ressaltar que há uma limitação extensiva à classificação comportamental proposta por Robertson no que tange solos de origem orgânica. Sendo assim a variabilidade comportamental desse parâmetro é constatada nas verticais em estudo. Visando mitigar a limitação na classificação comportamental do material, foi considerado, como análise complementar, uma classificação orgânica no ábaco SBT proposto por Lengkeek (2022) apud Robertson (2016).

Para a identificação do solo orgânico nos ensaios geofísicos, foi considerado que este tipo de material está geralmente associado a baixos valores de resistividade elétrica, tipicamente variando entre 0 e 150 Ohms.m. Esse comportamento de baixa resistividade pode ser explicado por várias características intrínsecas do solo orgânico: (i) composição do material: solos orgânicos são predominantemente compostos por matéria orgânica em decomposição, como restos de plantas e outros materiais biológicos, o que contribui para uma maior retenção de água e eletrólitos, reduzindo a resistividade; (ii) textura e estrutura: em comparação com solos minerais, o solo orgânico possui uma textura mais macia e porosa, permitindo a presença de espaços intersticiais maiores, que são facilmente preenchidos com água e eletrólitos. A presença de água nos poros do solo diminui significativamente a resistividade, uma vez que a água é um bom condutor de eletricidade, especialmente quando contém sais dissolvidos.

A utilização desses valores baixos de resistividade como indicativo da presença de solos orgânicos permite uma identificação mais precisa e eficaz desses materiais em estudos geofísicos. Por meio da análise dos dados de resistividade, é possível mapear a distribuição e a extensão dos bolsões de solo orgânico na área de estudo.

3 RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos, foi possível realizar uma análise comparativa entre os dados obtidos nos ensaios de campo conduzidos na crista do maciço estudado, e compreender como as informações fornecidas por cada um desses ensaios se tornam valiosas na identificação do solo orgânico.

Na primeira vertical estudada, verificou-se que o solo orgânico foi identificado satisfatoriamente no ensaio CPTu entre as elevações de 188,5 m e 181,0 m, conforme evidenciado pela correspondência com os padrões de comportamento característicos do material, como descrito no item 2. Nessas elevações, constatou-se uma geração de poropressão na cravação, I_c de Robertson por vezes maior que 3,6, B_q maior do que 0, F_r por vezes maior que 10% e q_t majoritariamente menor do que 2,5 MPa.

Por outro lado, no ensaio geofísico, toda a zona abaixo da elevação de 187,0 m apresentou valores de resistividade inferiores a 150 Ohms.m. Considerando que o material abaixo da elevação de 181,0 m é um solo de fundação saturado, conclui-se que o material orgânico foi identificado no ensaio geofísico entre as elevações de 187,0 m e 181,0 m.

Ao analisar os resultados do ensaio CPTu, nota-se que a identificação do solo orgânico envolve diversos parâmetros do ensaio, tais como a resistência do material ao cisalhamento, o atrito lateral entre o cone e o material, bem como a geração de poropressão durante a cravação, ao passo que no ensaio geofísico, a identificação é realizada considerando apenas a sua condição de saturação. Essa diferença de abordagem explica o fato de que, na vertical 1, a espessura do material orgânico é maior no ensaio CPTu em comparação com o ensaio geofísico. No entanto, é importante ressaltar que ambos os ensaios identificaram de forma satisfatória a presença do material estudado. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.

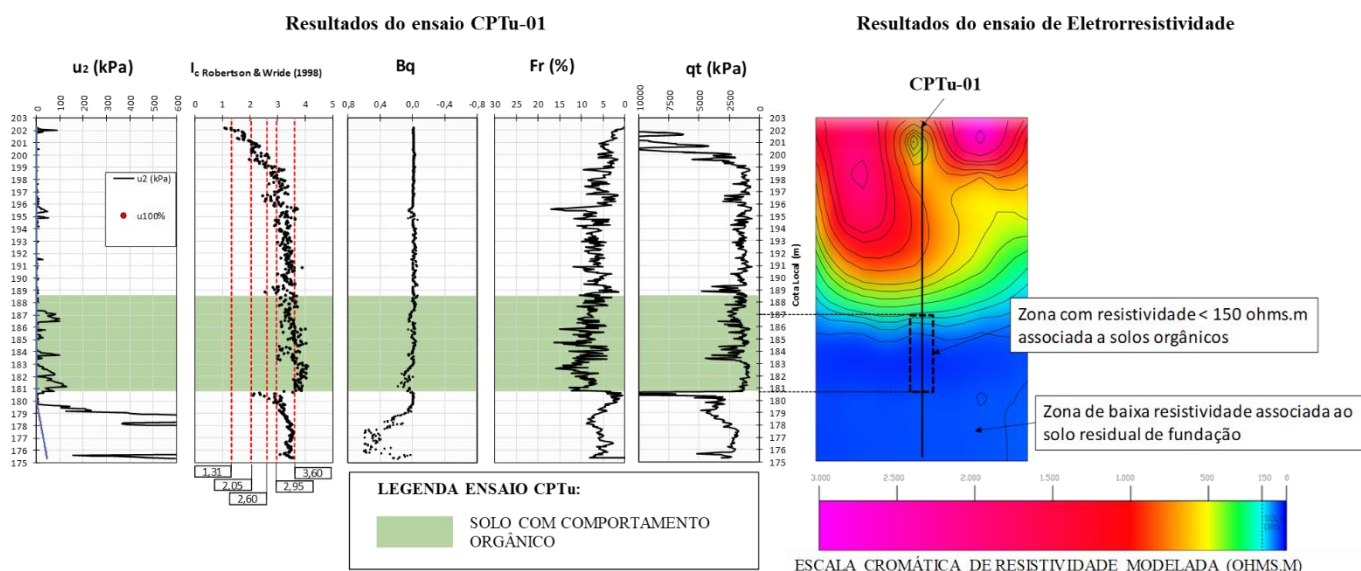


Figura 2. Resultados dos ensaios CPTu e de Eletrorresistividade na vertical 1.

Na segunda vertical estudada, verificou-se que o solo orgânico foi identificado no ensaio CPTu em duas regiões sendo a primeira compreendida entre as elevações 194,0 m e 198,0 m e a segunda entre as elevações 186,0 m e 191,0 m, conforme evidenciado pela correspondência com os padrões de comportamento característicos do material, como descrito no item 2. Nessas elevações, constatou-se uma significativa geração de poropressão na cravação, I_c de Robertson por vezes maior que 3,6, B_q maior do que 0, F_r por vezes maior que 10% e q_t majoritariamente menor do que 2,5 MPa.

Já no ensaio geofísico, foi identificada uma zona de baixa resistividade entre as elevações 186,0 m e 194,0 m, sendo ela, portanto, associada a presença do solo orgânico entre essas elevações. Conforme explicado anteriormente, a identificação do solo orgânico por meio do ensaio CPTu envolve diversos parâmetros do ensaio, ao passo que no ensaio geofísico, a identificação é realizada considerando apenas a sua condição de saturação. Essa diferença de abordagem explica o fato de que, na vertical 2, as regiões identificadas como material orgânico são ligeiramente diferentes. No entanto, é importante ressaltar que, mais uma vez, ambos os

ensaios identificaram satisfatoriamente a presença do material de interesse. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3.

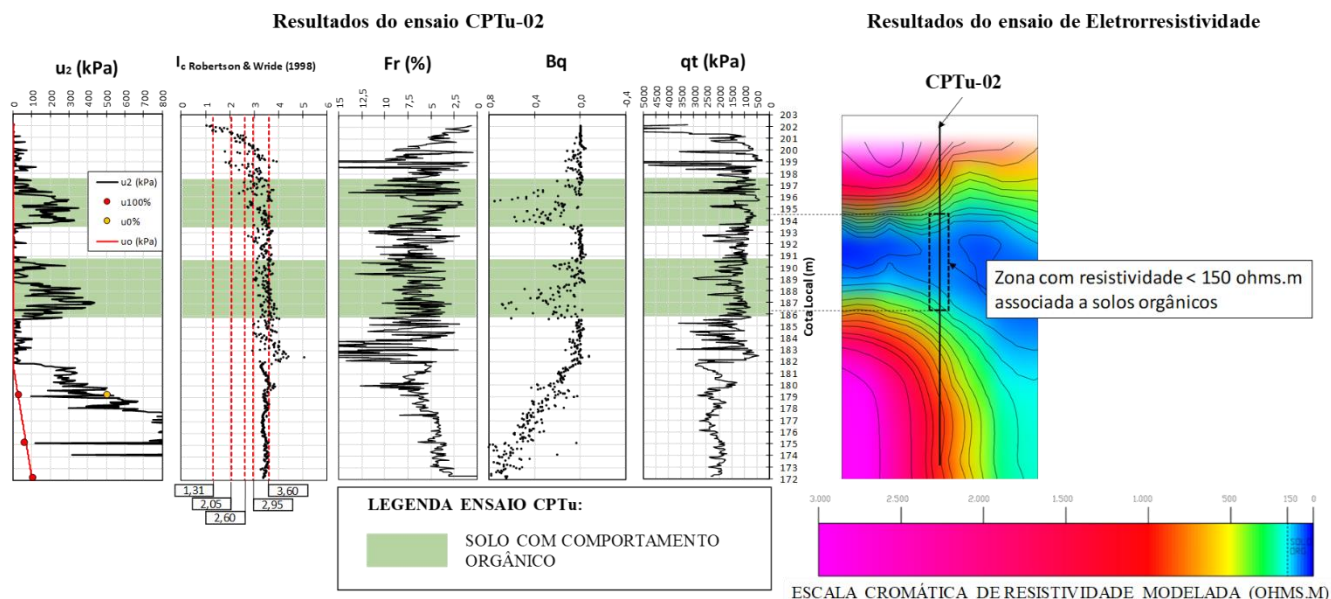


Figura 3. Resultados dos ensaios CPTu e Geofísico na vertical 2.

Na terceira vertical estudada, verificou-se uma aderência satisfatória entre os dois ensaios. O solo orgânico foi identificado no ensaio CPTu entre as elevações 198,0 m e 182,0 m, conforme evidenciado pela correspondência com os padrões de comportamento característicos do material, descritos no item 2. Já no ensaio geofísico, o solo orgânico foi identificado entre as elevações 199,0 m e 182,0 m.

Essa correlação pode ser explicada pelo fato de que, durante a época em que o ensaio geofísico foi conduzido, todo o material orgânico presente nessa vertical demonstrava uma saturação considerável. Esse estado de saturação foi fundamental para que o ensaio geofísico conseguisse delimitar o material orgânico de maneira satisfatória. Essa conclusão é corroborada pelo ensaio CPTu realizado, que confirmou a precisão da delimitação do material orgânico. A Figura 4 apresenta os resultados obtidos.

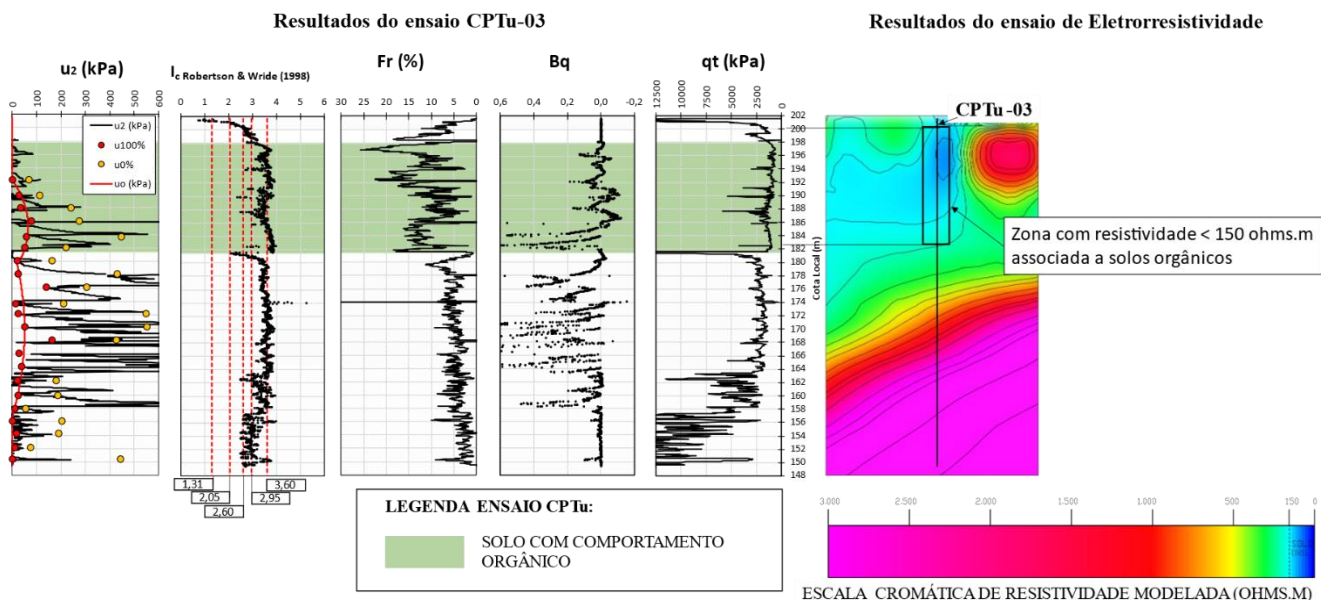


Figura 4. Resultados dos ensaios CPTu e Geofísico na vertical 3.

Na quarta vertical estudada, observou-se uma divergência entre os resultados obtidos nos ensaios. No ensaio CPTu foi possível identificar uma região com a presença de solo orgânico entre as elevações 185,5 m

e 182,0 m. Já no ensaio geofísico, não foi identificada a presença de material orgânico na vertical estudada. Essa discrepância pode ser explicada pelo fato de que, durante a época em que o ensaio geofísico foi conduzido, todo o material orgânico presente nessa vertical não estava saturado. Esse estado foi fundamental para que o ensaio geofísico não conseguisse delimitar o material orgânico de maneira satisfatória. A Figura 5 apresenta os resultados obtidos.

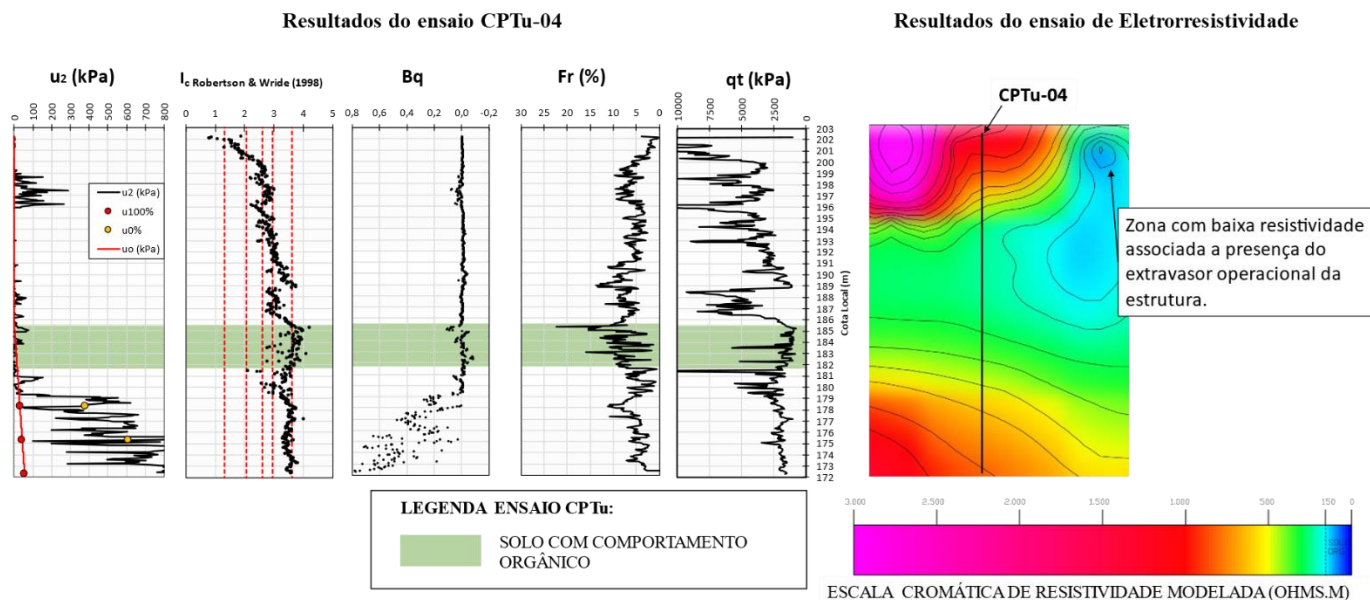


Figura 5. Resultados dos ensaios CPTu e Geofísico na vertical 4.

Os resultados dos quatro ensaios CPTu realizados foram plotados no ábaco de classificação comportamental SBT de Lengkeek (2022), com base em Robertson (2016), com o objetivo de identificar o material através do ensaio CPTu. Conforme mostrado na Figura 7, todas as áreas estudadas foram predominantemente classificadas como turfa, um material orgânico altamente decomposto. Essa classificação está em concordância com a análise de parâmetros realizada em cada vertical.

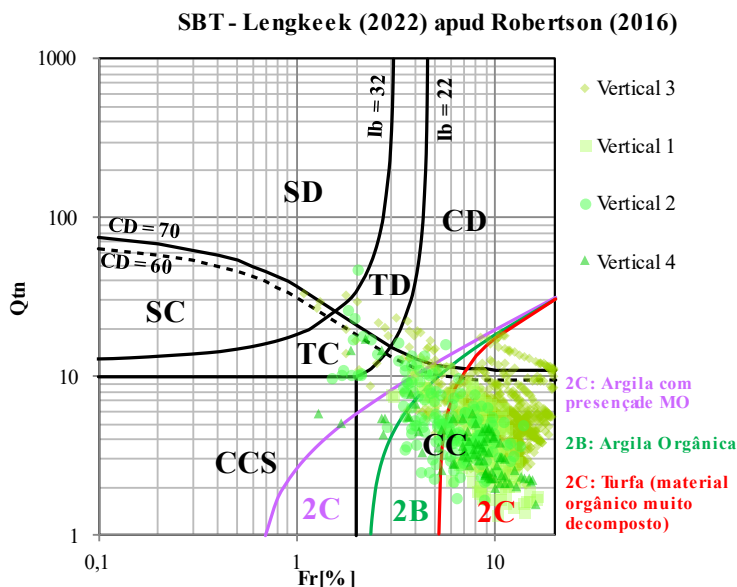


Figura 6. Ábaco de classificação comportamental SBT (Lengkeek, 2022 apud Robertson, 2016) com o resultado dos quatro ensaios CPTu realizados nos bolsões de matéria orgânica.

Com base nas metodologias adotadas e nos resultados obtidos, foi possível identificar a presença de solo orgânico ao longo do maciço, utilizando-se dados do ensaio de Eletroresistividade. As áreas com resistividade

inferior a 150 Ohms.m foram destacadas e isoladas para uma análise mais detalhada da distribuição do material de interesse. A partir dos resultados, foi possível mapear uma série de bolsões de material orgânico dispersos ao longo da fundação do maciço, em regiões não detectadas pelos ensaios CPTu, que foram executados em apenas quatro verticais. Os resultados são apresentados na Figura 7.

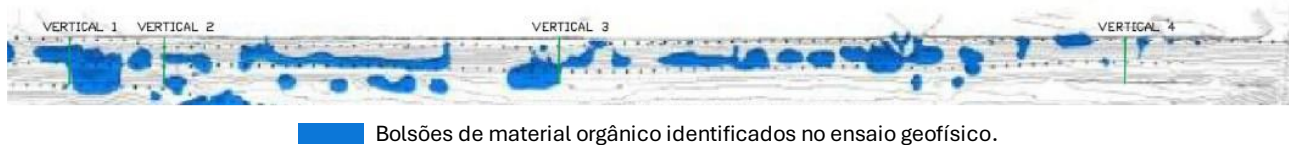


Figura 7. Bolsões de material orgânico identificados no ensaio geofísico pelo método da eletrorresistividade.

4 CONCLUSÕES

A análise conduzida no presente estudo lança luz sobre a identificação de estratos de solo orgânico no âmbito de projetos geotécnicos, especialmente considerando os desafios apresentados pela identificação desses materiais quando sua distribuição se dá de forma heterogênea, como é o caso do maciço de barragem de rejeitos de mineração estudado, onde se verifica a existência de vários bolsões de material orgânico dispersos na matriz argilosa da fundação, resultado da atividade antrópica na região, incluindo a deposição de estéril argiloso juntamente com resíduos de vegetação desmatada e solo orgânico superficial removido.

Por meio de uma análise comparativa de ensaios de Piezocone com medida de poropressão (CPTu) e um levantamento geofísico, foram obtidas informações valiosas sobre a presença e a extensão do solo orgânico em um maciço.

A integração dos métodos CPTu e geofísicos mostrou-se fundamental para mapear a distribuição do solo orgânico ao longo da fundação do maciço. A partir dos dados do levantamento geofísico, foram delineadas e isoladas zonas com valores de resistividade abaixo de 150 Ohms.m, oferecendo uma compreensão refinada da distribuição espacial do material orgânico. Essa abordagem integrada não apenas aprimora a precisão da caracterização do solo, mas também destaca a natureza complementar dessas técnicas investigativas em avaliações geotécnicas.

Os resultados destacam a importância de adotar uma abordagem multifacetada para a identificação do solo, especialmente em regiões suscetíveis a atividades antrópicas que possam impactar a composição e o comportamento do solo. Ao transcender as limitações de metodologias individuais, o estudo demonstra a eficácia da integração de CPTu e levantamentos geofísicos para superar os desafios associados às condições heterogêneas do solo.

Em conclusão, este estudo enfatiza a importância de uma abordagem integrada em investigações geotécnicas, na qual a aplicação de ensaios CPTu e geofísicos oferece uma compreensão abrangente da composição e do comportamento do solo. Em áreas com características semelhantes, o ensaio geofísico pode ser utilizado como um mapeamento inicial de materiais de interesse, sendo complementado por campanhas de ensaios CPTu onde se identifica potencial presença de solo orgânico.

Ao aprimorar a capacidade de identificar e caracterizar estratos de solo orgânico, esta pesquisa contribui para o avanço das práticas de engenharia geotécnica, aprimorando, em última análise, a confiabilidade e a segurança de projetos de infraestrutura em diversos ambientes.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todo o suporte dado pela Pimenta de Ávila Consultoria Ltda. para o desenvolvimento do trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). NBR 12069. Solo – Ensaio de penetração de cone in situ (CPT). Rio de Janeiro, 1991.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). NBR 15935. Investigações ambientais – Aplicação de métodos geofísicos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASTM D6067/D6067M-17 – Standard Practice for Using the Electronic Piezocone Penetrometer Tests for Environmental Site Characterization and Estimation of Hydraulic Conductivity.
- ISO14688-1 2017. Geotechnical investigation and testing Identification and classification of soil - Part 1: Identification and description. International Organization for Standardization.
- ISO14688-2 2017. Geotechnical investigation and testing Identification and classification of soil - Part 2: Principles for a classification. International Organization for Standardization.
- Kulhawy, F. H. & Mayne, P. W. 1990. Manual on estimating soil properties for foundation design.; Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA); Cornell Univ., Ithaca, NY (USA). Geotechnical Engineering Group.
- Lengkeek, H. J. 2022. CPT-based classification and correlations for organic soils. 4TU.ResearchData.
- Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M., 1997. Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic, EF Spon/Taylor & Francis Publ., New York, 1997, 312 pp.
- Mayne, P. W. 2014. Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests. Proceedings, 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing.
- Robertson, P.K., 1990. Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 27(1): 151-158.
- Robertson, P.K., 2009. CPT interpretation – a unified approach, Canadian Geotechnical Journal, 46: 1-19
- Robertson, P. K; Cabal, K. L. *Guide to Cone Penetration Testing*. 7 ed. Signal Hill, CA (USA): Gregg Drilling and Testing Inc., 2022. 156 p.
- Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and Greig, J., 1986. Use of Piezometer Cone data. In-Situ'86 Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering, GSP 6 , ASCE, Reston, VA, Specialty Publication, SM 92, pp 1263-1280.
- Robertson, P.K. Soil Behaviour Type from the CPT: an update. Signal Hill, CA (USA): Gregg Drilling and Testing Inc., 2010. 8 p.
- Robertson, P. K. 2016. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update. Canadian Geotechnical Journal, 53, 1910–1927.
- 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, 1569–1586.