

Aplicabilidade de ensaios CPTu e metodologias para avaliação de susceptibilidade a mobilização não drenada em solos residuais de Congonhas-MG

Wanessa Alves Silva

Engenheira civil, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, wanessa.as@hotmail.com

Maria Raquel Damaceno

Geóloga, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, mariaraqueldama@gmail.com

Maria Eduarda Fernandes Borba

Engenheira civil, Tractebel, Belo Horizonte, Brasil, dudafb22@gmail.com

Marcio Fernandes Leão

Geólogo, Tractebel/UFV, Belo Horizonte, Brasil, marcio.leao@tractebel.engie.com

RESUMO: A mobilização não drenada é um conceito aplicável às argilas e pode ser definida como o comportamento de solos argilosos moles e saturados sob condições em que não haja drenagem apropriada dos excessos de poropressão positiva. Tal situação ocorre quando não há tempo suficiente para que esse excesso seja dissipado, como por exemplo, na aplicação de um carregamento rápido sobre materiais argilosos de consistência mole e saturados. O Quadrilátero Ferrífero apresenta espessos perfis de alteração de unidades geológicas cujo produto granulométrico é normalmente a argila, o artigo objetiva discutir o comportamento associado a um solo residual originado do perfil de alteração do xisto constituinte do Grupo Nova Lima na região de Congonhas-MG por meio de metodologias aplicadas a ensaios CPTu executados. A partir dos resultados obtidos, relacionou-se que um dos principais fatores que condicionam a ocorrência da mobilização não drenada nesse solo residual é a granulometria predominantemente argilosa, que implica um comportamento de elevada plasticidade, baixa resistência mecânica e alta porosidade. Com base no estudo apresentado, espera-se contribuir para uma utilização mais assertiva das metodologias já comumente empregadas na determinação de parâmetros por meio de ensaios do tipo CPTu, agora aplicadas ao comportamento de solos residuais tropicais.

PALAVRAS-CHAVE: CPTu, Solos tropicais argilosos, Quadrilátero Ferrífero.

ABSTRACT: Undrained mobilization is a concept applicable to clays and can be defined as the behavior of clayey, soft and saturated soils under conditions in which there is no deviation from excess positive pore pressure. This situation occurs when there is not enough time for this excess to be dissipated, as for example, when applying a rapid load to soft and saturated clayey materials. The Iron Quadrangle presents deep alteration profiles of geological units whose granulometric product is normally clay, the objective article discusses the behavior associated with a residual soil originating from the alteration profile of the shale constituent of the Nova Lima Group in the Congonhas-MG region through of methodologies applied to CPTu tests performed. From the results obtained, it was reported that one of the main factors that condition the occurrence of undrained mobilization in this residual soil is the predominantly clayey particle size, which implies a behavior of high plasticity, low mechanical resistance and high porosity. Based on the study presented, we hope to contribute to a more assertive use of methodologies already commonly used in determining parameters through CPTu type tests, now applied to the behavior of tropical residual soils.

KEYWORDS: CPTu, Tropical clayey soils, Quadrilátero Ferrífero.

1 INTRODUÇÃO

O parâmetro de estado (ψ) de Jefferies e Been (2016) é definido como a medida do desvio entre o índice de vazios atual do solo e o índice de vazios no estado crítico, considerando a tensão vertical à qual o solo está submetido. A utilização do parâmetro de estado (ψ) para classificação de solos como contráteis ou dilatantes é amplamente difundida, muitas vezes sem distinção do tipo de material no qual a metodologia está sendo aplicada. Entretanto, a utilização do parâmetro de estado (ψ) é recomendada somente para solos arenosos, para as argilas a razão de sobre adensamento, ou *over consolidation ratio* (OCR) em inglês, é a escolha lógica para tal avaliação (Jefferies e Been, 2016).

Mayne et al. (2017) sugere avaliar o comportamento de solos argilosos através a razão de sobre adensamento aparente, ou *yield stress ratio* (YSR) em inglês. O YSR é calculado tendo como base o *CPT net resistance* (q_n) e o índice de comportamento do solo (I_c). Para classificar o material como contrátil ou dilatante, Mayne e Sharp (2019) propõem uma equação para calcular o YSR na linha de estado crítico (YSR_{CSL}). Essa equação gera um limiar crítico que divide o gráfico em duas zonas de classificação, contrátil à esquerda e dilatante à direita da curva. Mayne e Sharp (2019) ainda evidenciam que materiais com $YSR < 1$ indicam solos inconsolidados, sendo um alerta para solos com um maior risco de instabilidade e falhas.

Robertson (2016) separa os solos em contráteis e dilatantes a partir do parâmetro CD. Esse parâmetro pode ser calculado tendo como base a resistência de ponta do cone normalizada (Q_{tn}) ou a resistência de ponta do cone normalizada equivalente a areia limpa ($Q_{tn,cs}$), em conjunto à razão de atrito normalizada (F_r). Em seu estudo, Mayne et al. (2023) utiliza a resistência de ponta do cone normalizada equivalente a areia limpa ($Q_{tn,cs}$) para tal avaliação, entretanto, o cálculo de $Q_{tn,cs}$ para materiais silto-argilosos, argilo-siltosos e argilosos não é possível, pois a metodologia de correção não se aplica para esses materiais (Robertson e Wride, 1998).

Jefferies e Been (2016) definem que materiais com $\psi > -0,05$ são contráteis. Mayne e Sharp (2019) definem que materiais com $YSR < YSR_{CSL}$ são contráteis. Robertson (2016) define que materiais com CD abaixo de 70 são contráteis. Tais limites foram adotados neste trabalho

Desta forma, é de grande importância compreender a tendência de mudança de volume de um solo durante o cisalhamento para analisar sua susceptibilidade à mobilização não drenada. Tal comportamento depende do índice de vazios inicial e da tensão aplicada ao solo (DAS, 2019). Solos fofos e moles contraem durante carregamentos drenados, enquanto solos densos e compactos dilatam até atingir o estado crítico. Solos contráteis geram excesso de poropressão positiva durante carregamentos não drenados, reduzindo as tensões efetivas e a sua resistência ao cisalhamento (CASAGRANDE, 1975 *apud*. SANTOS JUNIOR, 2021; FREIRE NETO, 2009).

Mayne et al. (2023) apresenta um estudo de caso comparando metodologias gráficas para avaliar a susceptibilidade à liquefação de diferentes materiais arenosos. O presente trabalho se propõe a replicar tal estudo adequando as metodologias de avaliação para solos argilosos, quando necessário. Desse modo, foi avaliado o comportamento esperado para solos tropicais argilosos durante uma ruptura por cisalhamento, classificando-os como contráteis ou dilatantes, utilizando metodologias gráficas baseadas em correlações com ensaios do tipo CPTu.

Dado que esse fenômeno ocorre em solos argilosos e o Quadrilátero Ferrífero apresenta espessos perfis de alteração de unidades geológicas cujo produto granulométrico é normalmente a argila, o artigo objetiva discutir o comportamento associado a um solo residual originado do perfil de alteração do xisto constituinte do Grupo Nova Lima na região de Congonhas-MG a partir de metodologias para interpretação de ensaios CPTu por meio da metodologia similar ao realizado por Mayne et al. (2023), tendo como base as metodologias de Mayne e Sharp (2019) e Jefferies e Been (2016).

2 METODOLOGIA

Inicialmente foi escolhida uma área caracterizada pela ocorrência de solos residuais de xisto do Grupo Nova Lima, na região de Congonhas (MG). Essa etapa foi apoiada na fundamentação bibliográfica e o mapa geológico de Congonhas, folha parcial de: SF.23-X-A-VI-1, na escala de 1:50.000. Posteriormente, foram selecionados cinco ensaios CPTus realizados nesse material.

A escolha de relacionar os resultados obtidos com o CPTu para esse solo argiloso de uma porção do Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas), diz respeito do quão expressivo e representativo são os solos de alteração dessa unidade geológica no contexto estratigráfico do Quadrilátero Ferrífero (QF), que é

uma das mais importantes províncias metalogenéticas do país, responsável por hospedar importantes mineralizações de ferro e ouro. Ademais, de acordo com DORR II, 1969, o Grupo Nova Lima ocupa maior área de afloramento no Supergrupo Rio das Velhas, com uma espessura total estimada de 4000 metros.

O Supergrupo Rio das Velhas, subdivido nos Grupos Nova Lima e Maquiné, abrange rochas menos resistentes aos processos erosivos e rochas mais resistentes à erosão, respectivamente. Em cada um desses grupos apresentados, ocorrem unidades rochosas com diferentes níveis de resistência no processo pedogenético, e para o caso do Grupo Nova Lima, os xistos e filitos possuem resistência mediana. Por isso a propensão de formar espessos perfis de solos oriundos da ação do intemperismo, seja físico ou químico.

No contexto geológico regional apresenta características de metamorfismo de grau baixo ou fácies xisto verde (zona da clorita), sendo esse entedimento de suma importância, pois quanto menor o grau metamórfico menos isotrópico é o material, e na condição do solo saprolítico do xisto ocorre elevada heterogeneidade, pela diversidade da disposição dos seus planos de anisotropia. Isso se deve às feições reliquias presentes nos solos residuais, que no xisto é representado pela xistosidade.

Condicionado a esse fator da anisotropia, pode haver diferentes valores das suas propriedades em cada direção como: o módulo de deformação, resistência, permeabilidade, por exemplo, conforme aborda Hundson & Harrison (1997). Por isso, é importante ressaltar que os resultados aqui apresentados pelo CPTu não tem propensão de ocorrer de forma homogênea e previsível em todo perfil de solo saprolítico do xisto do Grupo Nova Lima, uma vez que fatores como composição mineralógica, textura, porosidade e entre outros, influenciam nas respostas obtidas por meio de ensaios como o CPTu.

Por fim, os resultados foram tratados seguindo a metodologia proposta por Mayne at al. (2023), tendo como base as metodologias de Mayne e Sharp (2019) e Jefferies e Been (2016).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O aspecto do solo aqui citado, perfaz horizonte de algumas dezenas de metros de alteração, com coloração que varia de marrom a rosado, com a xistosidade preenchida por grãos de quartzo. Porém, a composição mineralógica é variada, podendo ocorrer na fração areia minerais micáceos, e na fração argila ocorrer argilominerais não expansíveis, como exemplo micas de granulação fina.

Foi identificado que a granulometria predominante desse solo é na fração argila com contribuição secundária arenosa, condicionado à resposta que foi obtida por meio dos ensaios de CPTu, possui porções com alta plasticidade, característica essa que é conferida por meio do processo de formação de solos tropicais levando a união entre as partículas. Segundo Vaughan (1985), essa cimentação proporciona ao solo, dentre outros fatores, a presença de coesão (c') bem como o comportamento mais plástico a maiores tensões.

Os gráficos de resistência de ponta (q_t), atrito lateral (f_s), poropressão (u_2) e índice de comportamento do solo (I_c) estão apresentados para os cinco ensaios CPTu são apresentados nas Figuras 1, 2 e 3. De acordo com o índice de comportamento do solo (I_c) proposto por Robertson e Wride (1998), o material ensaiado foi classificado como argiloso, com exceção do material do furo CPTu-02, que foi classificado como silto-argiloso.

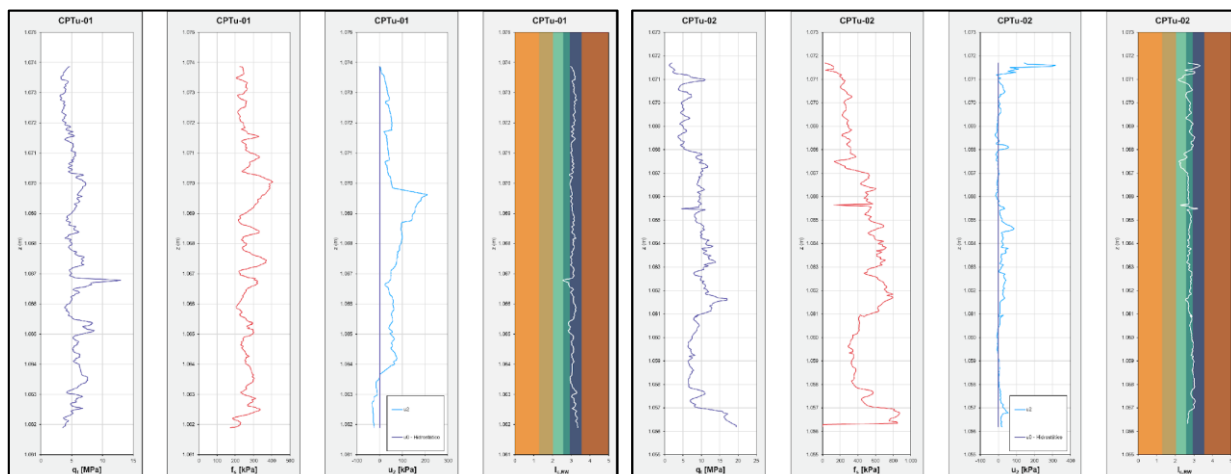


Figura 1. Principais perfis do CPTu-01 e do CPTu-02 executados em solo residual jovem de xisto na região de Congonhas-MG.

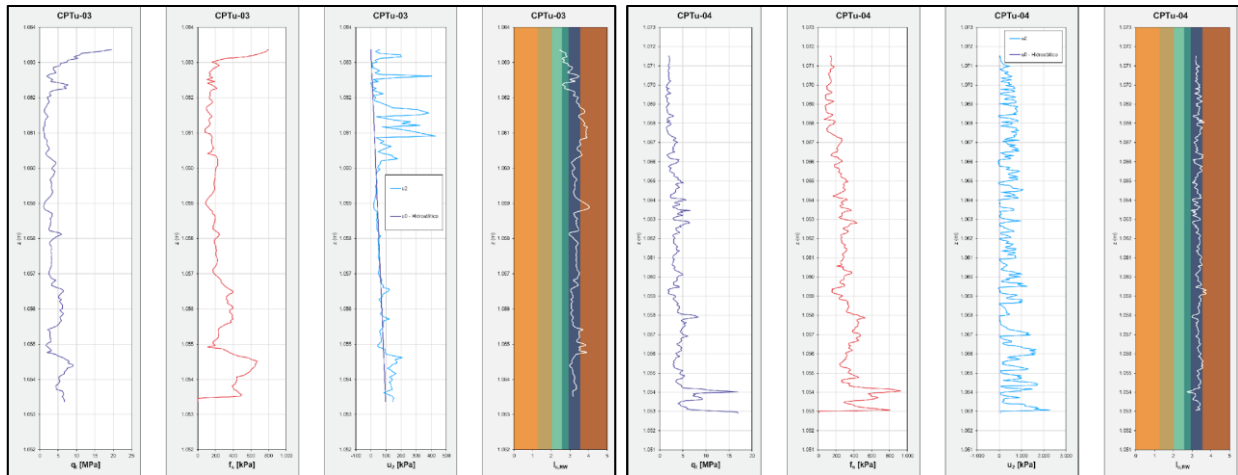


Figura 2. Principais perfis do CPTu-03 e do CPTu-04 executados em solo residual jovem de xisto na região de Congonhas-MG.

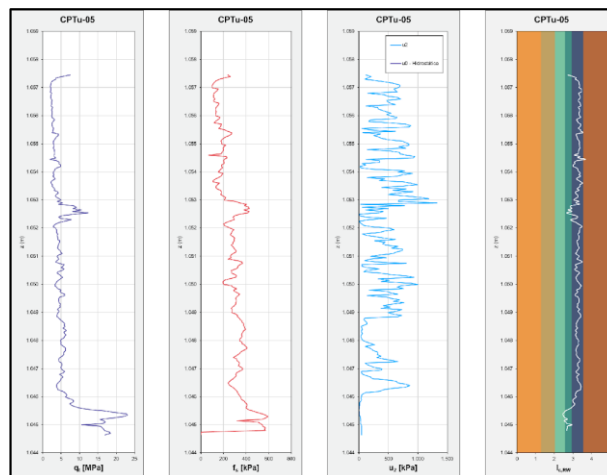


Figura 3. Principais perfis do ensaio CPTu-05 executado em solo residual jovem de xisto na região de Congonhas-MG.

As metodologias para avaliação de comportamento contrátil ou dilatante foram aplicadas aos 5 furos apresentados acima. As linhas pontilhadas presentes nos gráficos de classificação evidenciam o limiar crítico que os separam em zonas de classificação contrátil ou dilatante. Jefferies e Been (2016) definem que materiais com $\psi > -0,05$ são contráteis, ou seja, os materiais localizados à direita da linha pontilhada são classificados como contráteis. Mayne e Sharp (2019) definem que materiais com $YSR < YSR_{CSL}$ são contráteis e Robertson (2016) define que materiais com CD abaixo de 70 são contráteis, ou seja, para ambas a metodologias, os materiais localizados à esquerda da linha pontilhada são classificados como contráteis. Ainda estão apresentados os ábacos de classificação (SBTn – *Normalized soil behaviour type*) pela metodologia de Robertson (2016), sendo ela a única metodologia exclusivamente gráfica dentre as quatro utilizadas no presente estudo.

A figura 4 apresenta os gráficos de classificação do furo CPTu-03. Partindo da observação do ábaco proposto por Robertson (2016), evidencia-se que o comportamento do solo residual de xisto varia entre contrátil e dilatante, tendendo à classificação *CC* (*clay-like contractive*), em português comportamento de argila contrátil. As metodologias plotadas ao longo da profundidade permitem observar quais camadas de solo apresentam comportamento contrátil ou dilatante e, através delas, ainda pode-se obter um valor percentual do solo que apresentou cada um dos comportamentos. Pela metodologia de Robertson (2016), desta vez plotada ao longo da profundidade, tem-se que 70% do material ensaiado para este furo apresentou

comportamento contrátil. Segundo o gráfico de YSR, 56% do solo apresentou comportamento contrátil. Analisando o gráfico do parâmetro de estado (ψ), metodologia que deveria ser aplicada unicamente à solos arenosos, tem-se que o solo ensaiado apresenta um percentual de apenas 29% para comportamento contrátil.

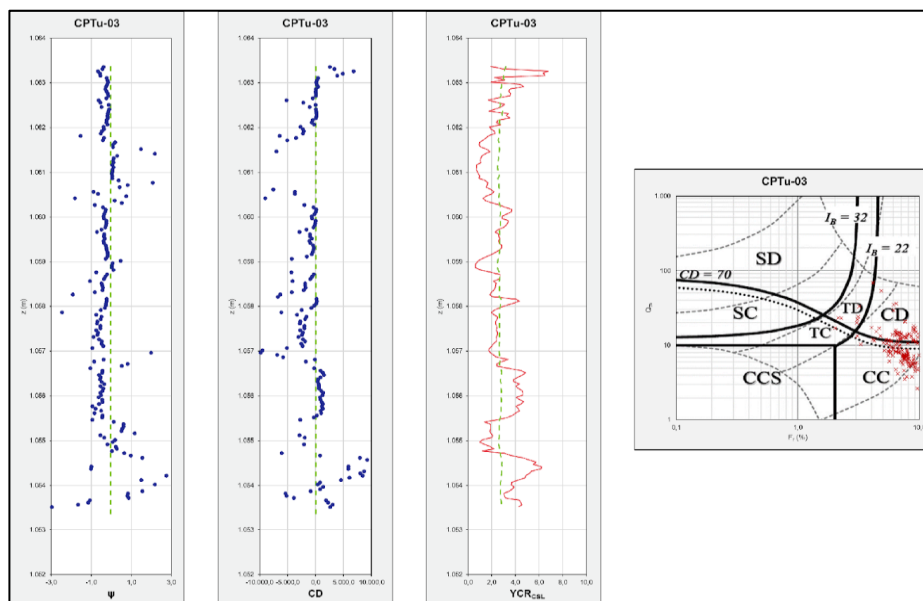


Figura 4. Metodologias gráficas para avaliação de comportamento contrátil ou dilatante, aplicadas ao furo CPTu-03.

Estas mesmas metodologias foram aplicadas para os demais furos. As figuras 5 e 6 apresenta os gráficos para avaliação de comportamento contrátil ou dilatante de cada um dos furos. A Tabela 1 apresenta um quadro resumo com os percentuais de pontos que apresentaram comportamento contrátil para cada um dos 5 furos citados anteriormente.

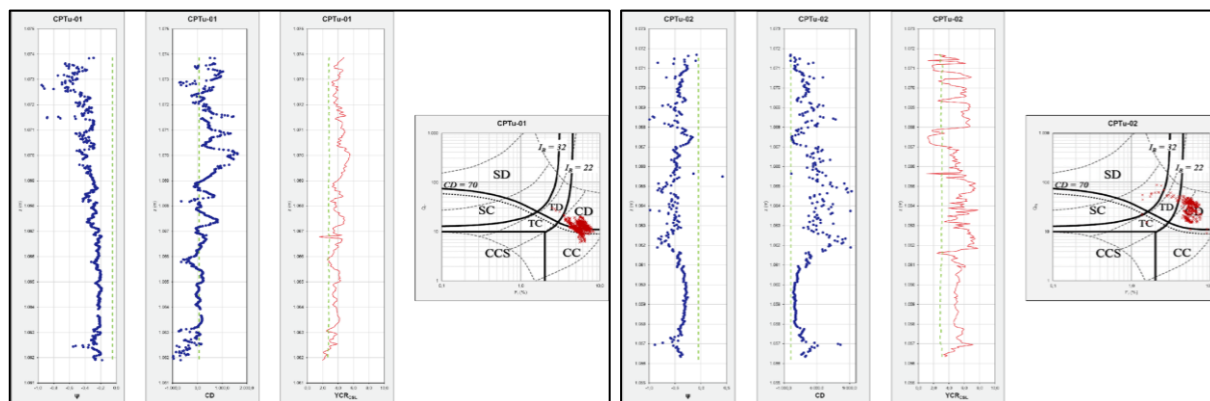


Figura 5. Metodologias gráficas para avaliação de comportamento contrátil ou dilatante, aplicadas ao furo CPTu-01 e CPTu-02.

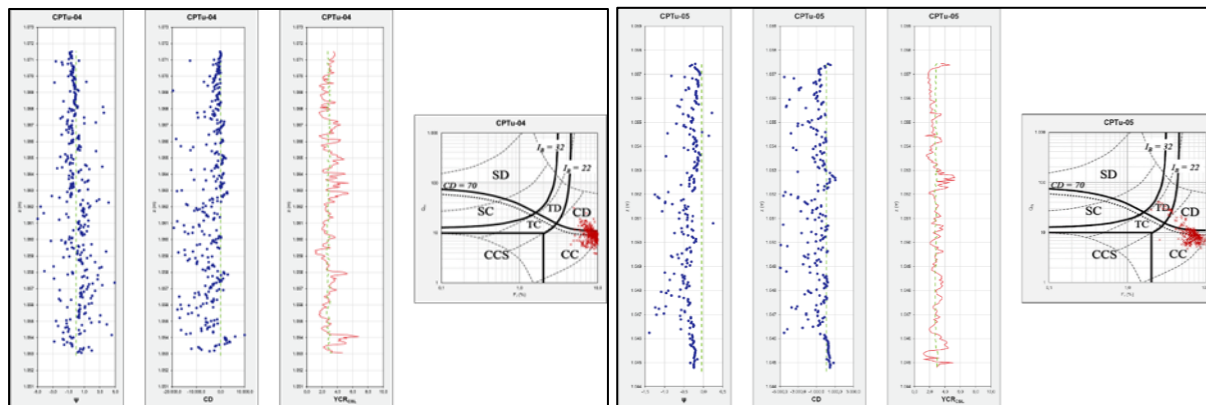


Figura 6. Metodologias gráficas para avaliação de comportamento contrátil ou dilatante, aplicadas ao furo CPTu-01 e CPTu-02.

Tabela 1. Percentual de pontos que apresentaram comportamento contrátil.

Metodologia	CPTu-01	CPTu-02	CPTu-03	CPTu-04	CPTu-05
I_c	Argiloso	Silto-argiloso	Argiloso	Argiloso	Argiloso
ψ – Jefferies e Been (2016)	0%	1%	29%	45%	5%
YSR – Mayne e Sharp (2019)	5%	10%	56%	50%	53%
CD – Robertson (2016)	38%	1%	70%	81%	81%
SBTn – Robertson (2016)	CD e CC	CD	CC e CD	CC e CD	CC

A partir dos resultados é possível concluir que a metodologia de Robertson é a mais conservadora dentre as aplicadas no presente estudo. Ainda se evidencia que o uso do parâmetro de estado (ψ) para avaliar materiais silto-argilosos, argilo-siltosos e argilosos pode levar a uma superestimação das condições de solos com alto potencial para se mobilizar de forma não-drenada e, conseqüentemente, levar a erros de projeto e a falhas de estruturas geotécnicas.

4 CONCLUSÃO

As metodologias aplicadas para compreensão do CPTu indicam tratativas distintas frente aos resultados para os solos residuais. Considerando que os ensaios CPTus são métodos semi-diretos e que não permitem coleta de amostras, mesmo que possam ser executados ensaios em camadas pré-definidas, os resultados necessitam de confronto com as características intrínsecas dos materiais geológicos, bem como a gênese. Ressalta-se que os materiais aqui analisados exibem elevada anisotropia frente a preservação de estruturas reliquias, porém a avaliação por mais de uma metodologia para o ensaio CPTu permite o desenvolvimento do poder de decisão de um projeto considerando o nível de conhecimento desse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, R.S. et al. Caracterização do xisto como material de construção. Disponível em: <file:///C:/Users/fh6312/Downloads/RSBCXC_CIAV2013_7ATP.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2024.
- DAS, B. M. (2019). Fundamentos de engenharia geotécnica. *Cengage Learning*, São Paulo, 2019.
- FREIRE NETO, J. P. (2009). Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade. 2009. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3232>. Acesso em 02 de fevereiro de 2022.
- JEFFERIES, M., BEEN, K. (2016) Soil liquefaction – A Critical State Approach. 2ª ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016. 690 p.

- LAMOUNIER, Wanderson Lopes et al. *As Correlações entre Geologia e Distribuição da Cobertura Vegetal e Uso do Solo na Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero-MG*. Disponível em: <<http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/7/0421.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- LOBATO, Lydia Maria. et al. *Geologia do Quadrilátero Ferrífero-Integração e Correção Cartográfica em SIG*. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/wp-content/uploads/2013/09/nota_exPLICATIVA_qf.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2024.
- MAYNE, P. W., STYLER, M., WOELLER, D. J., SHARP, J. (2017) Identifying contractive soils by CPT material index for flow liquefaction concerns. *GeoOttawa 2017*. Canadian Geotechnical Society.
- MAYNE, P. W., SHARP, J. (2019) CPT Approach to evaluating flow liquefaction using Yield Stress Ratio. *Tailings and Mine Waste 2019*.
- MAYNE, P. W., CARGILL, E., GREIG, J. (2023) The cone penetration test: Better information better decisions. *1ª ed. ConeTec*.
- ROBERTSON, P. K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — An update. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 53, n. 12, p. 1910– 1927, 2016. Disponível em: <<https://www.cptrobertson.com/PublicationsPDF/Robertson%20Updated%20SBT%20CGJ%202016.pdf>>. Acesso em: 17 de janeiro de 2024.
- ROBERTSON, P. K.; WRIDE, C. E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 35, n. 3, p. 442–459, 1998. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/254226691>>. Acesso em: 25 de novembro de 2021.
- ROCHA, Breno Padovezi (2018) *CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE SOLOS TROPICAIS NÃO SATURADOS POR MEIO DE ENSAIOS DE CAMPO*. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP.
- SANTOS JUNIOR, M. P.; RIBEIRO, S. G. S. (2018) Uso da distribuição Log-Normal de três parâmetros da razão de resistência não drenada de pico em análise probabilística de liquefação estática em barragens de rejeito. *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano COBRAMSEG*, 2018.
- SILVA, Fabiano Reis (2007) *A PAISAGEM DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG: POTENCIAL PARA O USO TURÍSTICO DA SUA GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA*. Dissertação de Pós-Graduação, Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais / UFMG, 46 p.