

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/499

Avaliação da Ocorrência de Drenagem Parcial nos Ensaios de CPTu em Rejeito de Minério de Ferro

Rafaela de Carvalho Saar

Discente do Programa de Pós Graduação, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, rafaela.saar@coc.ufrj.br

Lucas Pacheco Borges dos Santos

Discente do Programa de Pós Graduação, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, lucas.santos@coc.ufrj.br

Márcio de Souza Soares Almeida

Professor Titular, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, almeida@coc.ufrj.br

Bruno Guimarães Delgado

Diretoria de Geotecnia, Vale, Belo Horizonte, Brasil, bruno.delgado@vale.com

RESUMO: A resistência não drenada é um parâmetro chave em projetos geotécnicos. Um ensaio, já bem difundido, para a sua obtenção é o de piezocone (CPTu). Entretanto, a depender da velocidade de penetração, dada a natureza do material, poderá ser identificado um comportamento drenado ou não drenado, devendo-se evitar a ocorrência de drenagem parcial, pois a interpretação dos resultados torna-se complexa. O presente trabalho avaliou as condições de drenagem dos ensaios CPTu de uma barragem de rejeitos do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais, com foco na ocorrência ou não de drenagem parcial por meio de ensaios de dissipação de poropressão. Os resultados revelaram o comportamento monotônico da geração de poropressão com o tempo e excessos de poropressão inicialmente positivos para a grande maioria das curvas de dissipação. A exceção ocorreu nos materiais classificados como areia siltosa a silte arenoso, que apresentaram um comportamento discrepante e tiveram valores de t_{50} menores que 30 s, o que sugere a ocorrência de drenagem parcial, conforme literatura.

PALAVRAS-CHAVE: CPTu, Rejeito, Permeabilidade Intermediária, Poropressão, Drenagem Parcial.

ABSTRACT:

Undrained resistance is a key parameter in geotechnical projects. Piezocone (CPTu) testing is a widespread way of obtaining it. However, depending on the penetration speed and the nature of the material, drained or undrained behavior can be identified, and partial drainage should be avoided, as the interpretation of the results becomes complex. This study evaluated the drainage conditions of the CPTu tests of a tailings dam in the Iron Quadrangle in Minas Gerais, focusing on the occurrence or not of partial drainage by means of pore pressure dissipation tests. The results revealed monotonic behavior of pore pressure generation with time and initially positive pore pressure excesses for most of the dissipation curves. The exception was the materials classified as silty sand to sandy silt, which showed a discrepant behavior and had t_{50} values of less than 30 s, which suggests the occurrence of partial drainage according to literature.

KEYWORDS: CPTu, Tailings, Intermediate Permeability, Pore Pressure, Partial Drainage.

1 INTRODUÇÃO

Pela riqueza descritiva e contínua do perfil do subsolo, o ensaio de piezocone (CPTu, *piezocone penetration test*), até então muito empregado em investigações de solos, em geral, e projetos de fundações, vem sendo vastamente utilizado na investigação geotécnica de rejeitos de mineração. Uma de suas grandes vantagens é o perfilamento do comportamento característico das camadas de atravessamento frente a comparação do atrito de ponta (q_c), com o atrito lateral (f_s) e a poropressão (u_2), com taxa de penetração de 20 mm por segundo e baixa perturbação do entorno do pré-furo. A estimativa de parâmetros, ainda que de forma

indireta, garante ao ensaio um dos melhores custos-benefícios do mercado. O resultado, para além da economia no custo das investigações, permite estabelecer relações com o potencial de liquefação a partir das camadas, além de possibilitar identificar a presença de água com satisfatória precisão.

A interpretação de solos e materiais com permeabilidade intermediária, contudo, não é trivial e pode variar com a profundidade, plasticidade e tamanho dos grãos. Os rejeitos, segundo Vick (1990), podem apresentar coeficientes de permeabilidade que variam de 10^{-4} a 10^{-9} m/s em função também do método de deposição.

Segundo Schnaid et. al. (2021), quando a condutividade hidráulica do material está entre 10^{-5} e 10^{-8} m/s, os efeitos de drenagem parcial devem ser verificados com atenção, ainda que a conclusão da análise seja alterar a velocidade padronizada de penetração do ensaio ou aplicar correção dos resultados considerando a interferência da dissipação parcial da poropressão durante o cisalhamento. A depender da técnica implementada para disposição do rejeito, da distribuição granulométrica e da distância até a praia de deposição, podem ocorrer zonas de permeabilidades diversas num mesmo reservatório (Vick, 1990). Naturalmente, devido a segregação hidráulica, similarmente ao que ocorre em ensaios de sedimentação, tende-se a criar regiões de material mais granular, de maior peso específico, próximo ao ponto de despejo e, mais distante, material mais fino de menor peso específico.

O ensaio de palheta, também conhecido como *Vane Test*, embora seja a investigação *in situ* mais indicada para estimar o parâmetro S_u (resistência não drenada), em caso de drenagem parcial, também tem seu resultado prejudicado (Schnaid et al., 2021). Além disso, observa-se que para esse intervalo onde identifica-se a drenagem parcial, com o aumento da velocidade de rotação, o torque reduz (Hlenka, 2012). De modo geral, a taxa de penetração ou solicitação dos ensaios CPTu, DMT, Vane Test e outros, influenciam diretamente nas medidas e, conseqüentemente, nos parâmetros, sendo esses determinantes no processo de tomada de decisões relacionada à análise de estabilidade, de tensão e de deformações em condições de carregamento diversas.

O presente trabalho utiliza uma campanha de investigação realizada em estrutura alteada sob rejeito de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais, Brasil. O propósito deste estudo é avaliar a qualidade dos dados do CPTu, com ensaio de dissipação de poropressão, utilizando a prática recomendada pela norma. De acordo com a análise dos resultados e com base na literatura, estabeleceu-se critérios de uso e descarte para intervalos em que ocorrem a drenagem parcial, ocorrências particulares que prejudicam a interpretação do comportamento e uso de correlações consagradas.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização da Proposta

Inicialmente ocorre a análise do comportamento do rejeito e sua resposta, em condição de drenagem, durante o ensaio CPTu, conforme Schneider et. al (2008). Em posse dos dados de dissipação, busca-se comparar os valores de condutividade hidráulica pela correlação de Parez e Fauriel (1988) e empregá-los em intervalos de classificação validados pela literatura. Na sequência, utiliza-se da velocidade de cravação normalizada, conceito bem desenvolvido por Finnie e Randolph (1994), para discutir os resultados deste trabalhos com outras bibliografias do tema. Ao final, apresenta-se as considerações de Robertson (2012) e DeJong e Randolph (2012) diante dos dados desenvolvidos para conclusão da hipótese de drenagem parcial.

2.1.1 Avaliação da condição de drenagem do ensaio – Schneider et al. (2008)

No intuito de diferenciar a penetração do cone em solicitação drenada, não drenada e parcialmente drenada, Schneider et. al (2008) considera a normalização da resistência de ponta e da poropressão como parte da solução analítica para classificação de comportamento. O estudo de Schneider et. al (2008) utiliza banco de dados de diferentes argilas, depósitos de areia homogêneos e siltes para calibração da metodologia. Dentro do espaço Q_{tn} versus U_2 (Figura 1), o autor estabelece intervalos de classificação.

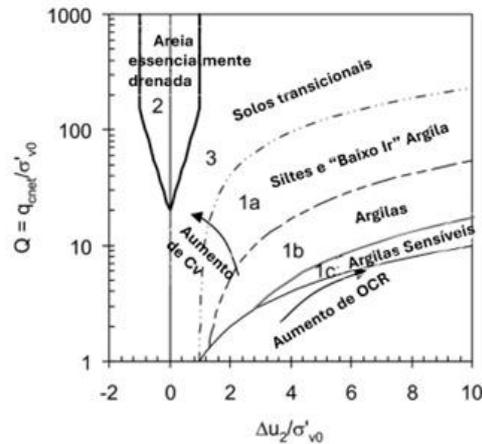


Figura 1. Proposta de Schneider (2008) para classificação de solos a partir do resultado do piezocone

A partir dessa referência, considera-se as Equações (1) e (2), correspondentes a Q e B_q , respectivamente, para localizar os intervalos de dados.

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

$$B_q = \frac{\Delta u_z}{\sigma'_{v0}} \frac{1}{Q} \quad (2)$$

2.1.2 Condutividade Hidráulica - Método de Perez e Fauriel (1988)

O ensaio de dissipação é realizado através de interrupção da cravação do piezocone em uma dada profundidade durante o período necessário até que seja atingida 50% da redução do excesso de poropressão (Schnaid e Odebrecht, 2012). Através dessa análise, é possível estimar os coeficientes de adensamento horizontal e a condutividade hidráulica (k). Para estabelecer a permeabilidade horizontal do solo, a Equação 3 utiliza o t_{50} dos ensaios de dissipação do CPTu:

$$k = \left(\frac{1}{251 t_{50}} \right)^{1,25} \quad (3)$$

Solos que apresentam coeficiente de permeabilidade “ k ” entre 10^{-3} e 10^{-6} m/s têm probabilidade de apresentar comportamento de drenagem parcial em ensaios de CPTu realizados com velocidade padrão, segundo Lunne *et al.*, (1997), Bedin (2006) e Schnaid *et al.* (2004).

2.1.3 Velocidade Normalizada – Finnie e Randolph (1994)

Para uma avaliação da ocorrência de drenagem parcial em materiais transicionais entre areias e argilas, através de ensaios de campo, deve-se observar a combinação entre a velocidade do ensaio (v), o diâmetro da sonda (d), bem como as características do material, como por exemplo o coeficiente de adensamento vertical (c_v). Tais variáveis são agrupadas genericamente como Velocidade Normalizada (Equação 4):

$$V_v = vd/c_v \quad (4)$$

Tal abordagem pode ser utilizada tanto para uma seleção das velocidades pré-ensaio, como também para a correção de resultados pós-ensaios padronizados.

3 RESULTADOS

Ao utilizar a classificação de comportamento à solicitação de cravação do CPTu proposta por Schneider *et. al* (2008), localiza-se a nuvem de dados majoritariamente nas regiões definidas como 1a, 1b e 3, conforme

observado na Figura 2. Sendo essas zonas definidas com o desempenho similar ao de materiais siltsos, argilosos e transicionais, respectivamente. Cabe destacar que a concentração de resultados, sobretudo do CPTu-010 e CPTu-015, se situaram sob classificação transitória, zona 3. Segundo Schneider et. al (2008), ampla variedade de solos se enquadram como transicionais e, nestes casos, requiere-se avaliações adicionais, como ensaios de dissipação, variação da taxa, amostragem e, até mesmo, reavaliação da classificação pela razão de atrito, usual para CPT. Neste trabalho explora-se com mais profundidade a primeira requisição.

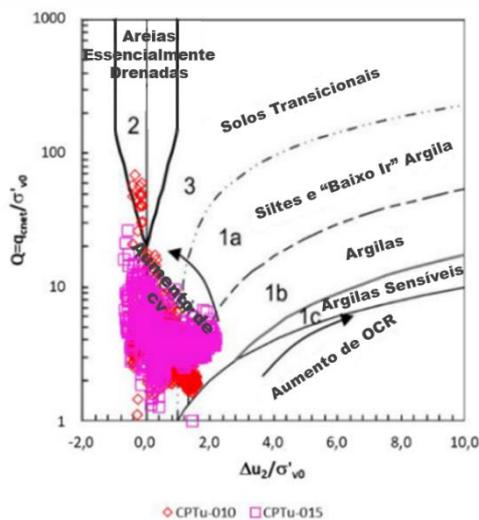


Figura 2. Classificação por comportamento drenado, não drenado e parcialmente drenado nos CPTus 010 e 015 pela metodologia de Schneider et. al (2008).

Atribui-se ao zoneamento 3 a baixa precisão de confiabilidade para correlações usuais que utilizem como premissa dados puramente drenados ou não drenados.

A partir dos ensaios de dissipação foi determinado o t_{50} e através da proposição de Parez e Fauriel (1988), os resultados processados se concentraram entre o intervalo de comportamento de argila a areia siltsosa ou silte arenoso (Figura 3), sobretudo na faixa do silte. Permitindo assim, a estimativa do coeficiente de permeabilidade horizontal do rejeito e comparação com valores definidos na bibliografia como de permeabilidade intermediária e, conseqüentemente, susceptíveis à ocorrência de drenagem parcial durante a realização dos ensaios.

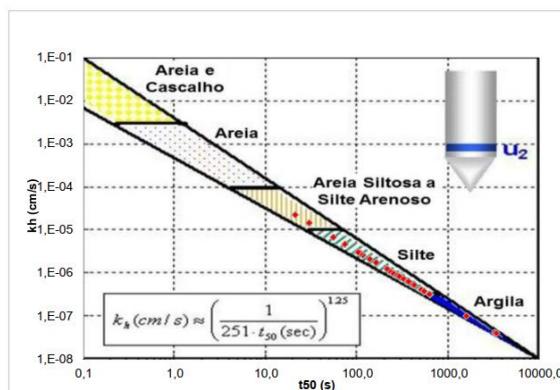
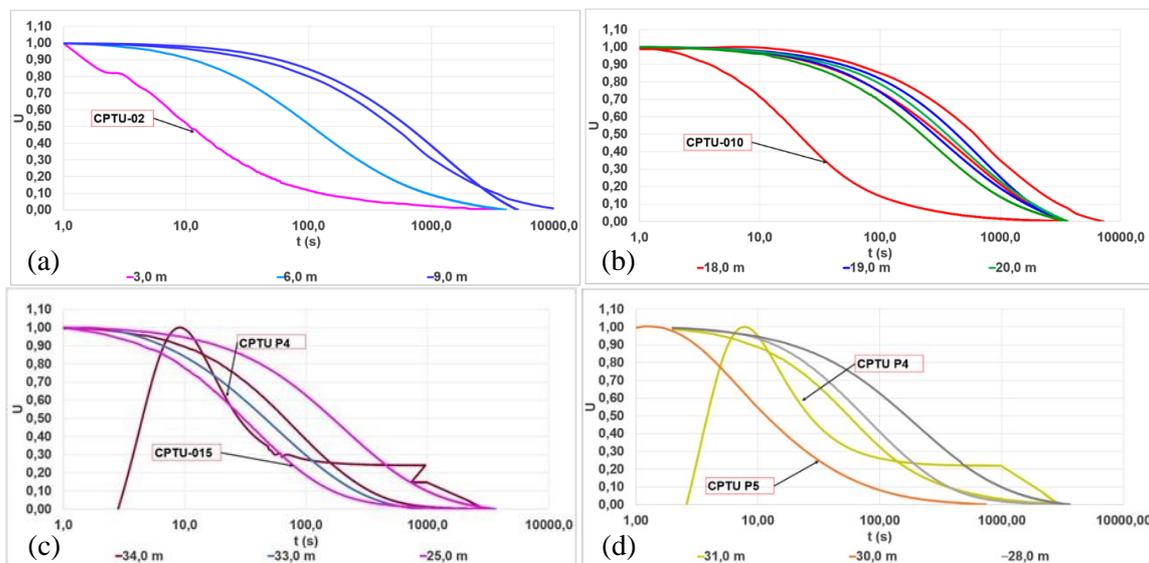


Figura 3. Permeabilidades em gráfico obtidas através da metodologia de Parez e Fauriel (1988) - Valores calculados da permeabilidade horizontal.

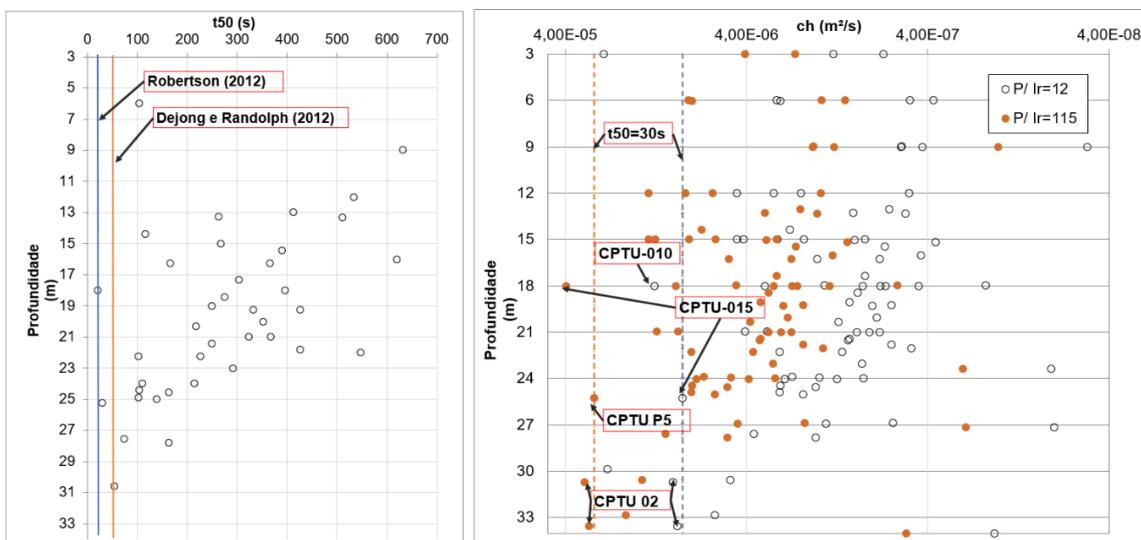
As Figuras 4, de (a) a (d) ilustram todas as curvas oriundas dos ensaios de dissipação, agrupadas por profundidade. No geral, as curvas mostram um decréscimo monotônico da poropressão, sendo que em alguns casos ocorre um declínio imediato na medição inicial, antes do início da dissipação. Nesse contexto, destacam-se algumas curvas com comportamento diferente em relação às outras e que corroboram com os ensaios que

se apresentaram na faixa areno siltosa a silto arenosa, como demonstrado na Figura 2 e 3. Nos CPTus 02, 010, 015 e P5 é observada uma redução maior da poropressão em um tempo reduzido, quando comparada às demais curvas da amostragem. Já no CPTu P4, para 31 e 34 metros de profundidade, notou-se uma poropressão inicial inexistente e posterior subida, para uma grande dissipação ao final.



Segundo Robertson (2012) valores de t_{50} acima de 30 segundos, podem indicar condição não drenada, para o ensaio executado dentro do padrão. Por outro lado, para DeJong e Randolph (2012) deve ser considerado um valor de 50 s para que o ensaio ocorra em condições totalmente não drenadas.

Conforme a Figura 5a, em alguns ensaios, o tempo para a dissipação de 50% da poropressão ficou abaixo de 30 s e 50 s, isto indicaria a ocorrência de drenagem parcial. Já na Figura 5b, estão representados os coeficientes de adensamento horizontal que foram calculados para índices de rigidez de 12 e 115. Ressalta-se que, os resultados dos ensaios triaxiais e ensaios de palheta permitiram correlação para definir limite mínimo e máximo do índice de rigidez. Observa-se que os pontos destacados são os mesmos apresentados como fora do padrão esperado da curva de dissipação, ou seja, de comportamento desigual aos dos demais pontos ensaiados fora da faixa de permeabilidade para materiais transicionais.



Figuras 5 (a) Tempo para a dissipação de 50% da poropressão versus profundidade e (b) coeficiente de adensamento horizontal para t_{50} de 30 s versus profundidade.

As velocidades normalizadas ficaram abaixo de 75 ($V < 75$) para os ensaios que, para a estimativa de Parez e Fauriel (1988) e Finnie e Randolph (1994), apresentaram a possibilidade de ocorrência de drenagem parcial, assim como para a proposta de Schneider (2008). Tal resultado converge com os encontrados por Almeida et. al (2011) para rejeitos de minério de ferro, no qual foi identificado que, para velocidades normalizadas entre 1 e 75, ocorreu drenagem parcial. Para os demais ensaios de CPTu as velocidades foram acima de 75.

Em resumo, grande parcela dos ensaios de dissipação realizados revelaram excessos de poropressão positivos iniciais e o tempo de final ($u_2 = 0$) ficou, em média, acima de 1000 s. Na estimativa do coeficiente de adesamento horizontal a ampla gama dos resultados mostrou valores de t_{50} menores que 30 s. Dessa forma, os pontos ensaiados, cujo t_{50} ocorre em menos de 30 segundos, conforme Robertson (2012), e 50 segundos, conforme Dejong e Randolph (2012), se identificam como fora da tendência de ensaios onde a dissipação ocorre gradualmente. Desta forma, a drenagem parcial fica evidenciada sob ambas as metodologias e distanciadas, sobretudo para Robertson (2012), dos pontos onde não houve a incidência de drenagem parcial durante a realização dos ensaios de CPTu.

4 CONCLUSÕES

O excesso de poropressão é dissipado conforme a ordem de grandeza da velocidade de drenagem, sabendo que, o coeficiente de adensamento é diretamente proporcional a permeabilidade. Desta forma, condutividades hidráulicas baixas estão mais propensas a responderem a carregamentos não-drenados, enquanto as altas, por outro lado, tendem a apresentarem comportamento drenado. O k obtido do ensaio de dissipação entre 10^{-5} e 10^{-7} cm/s (Parez e Fauriel, 1988), a incidência drenagem parcial por Robertson (2012) e DeJong e Randolph (2012), de parte dos ensaios, e a classificação de material transicional (Schneider et. al, 2008), ressalta a intersecção do tema, provando a relação entre as bibliografias. Ainda, vale mencionar que, velocidade de cisalhamento também influencia nas condições de respostas, tal como discutido por Schnaid et. al (2021). Em zonas de permeabilidade intermediária, a deformação induzida pela cravação do piezocone à taxa de penetração padrão, não contempla a natureza de suas características e torna correlações usuais para CPTu inapropriadas. Então, quando aplicada a velocidade normalizada (Finnie e Randolph, 1994) a hipótese de drenagem parcial se confirma, conforme o apontado por Almeida et. al (2011). No rejeito de minério de ferro identifica-se a ocorrência de comportamento transicional, principalmente em razão do seu processamento e sua disposição *in situ*. Sugere-se que para novas campanhas de investigação sejam realizados ensaios em diferentes taxas de penetração do piezocone, a fim de que a mais adequada seja atribuída para evitar a drenagem parcial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. S. S., Motta, H. P. G., Oliveira, J. R. M. S. (2011) Centrifuge CPT tests on silty tailings under different rates of penetration. *Soils and Rocks*, São Paulo, 34(1):p. 79-88, January-April.
- Bedin, J. (2006) *Interpretação de Ensaios de Piezocone em Resíduos de Bauxita*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 150p.
- Dejong, J., Randolph, M. (2012) Influence of Partial Consolidation during Cone Penetration on Estimated Soil Behavior Type and Pore Pressure Dissipation Measurements. In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. v. 138, No. 7. pp. 777-788.
- Hlenka, L. (2012) *Estudo dos efeitos da velocidade de carregamento na estimativa de parâmetros geotécnicos em resíduos de mineração de zinco*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Lunne, T., Robertson, P. K., Powell, J. (1997) *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Soil Mechanics Foundation Engineering.
- Parez, L., Fauriel, R. (1988) Advantages from piezocone application to in-situ tests. *Révue Française de Géotechnique*. v. 33, p. 13–27.

- Robertson, P. K. (2012) James K. Mitchell Lecture: “Interpretation of in-situ tests – some insights”. *Proc. 4th Int. Conf. on Site Characterization, ISC’4*, Porto de Galinhas - Brazil, p. 3-24.
- Schnaid, F., Lehane, B. M., Fahey, M. (2004). In situ test characterisation of unusual geomaterials. *Proc. 2nd Int. Conf. on Site Charact., Milpress, Porto*, 1:4974.
- Schnaid, F., Odebrecht, E. (2012) *Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. 2. edição, Oficina de Textos Editora.
- Schnaid, F., Martins, I. S. M., Delgado, B. G., Odebrecht, E. (2021) Velocidade de carregamento na estimativa de parâmetros geotécnicos. *GEOTECNIA (LISBOA)*, v. 12, p. 405-434.
- Schneider, J. A., Randolph, M. F., Mayne, P. W. e Ramsey, N. R. (2008) Analysis of factors influencing soil classification using normalized piezocone tip resistance and pore pressure parameters. *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.* v. 134 (11), p. 1569-1586.
- Schneider, J. A., Hotstream, J. N., Mayne, P. W. e Randolph, M. F. (2012) Comparing CPTU Q-F and $Q-\Delta u/2/\sigma'_{v0}$ soil classification charts. *Géotechnique Letters* 2: p. 209-215.
- Vick, S. G. (1983) *Planning, design and analysis of tailing dams*. New York: John Wiley e Sons. 369 p.