Interpretação integrada entre dados de sondagem elétrica vertical e SPT em ambiente urbano: estudo de caso em Manaus/AM

Raphael Di Carlo Silva dos Santos[1], Carlos Filipe Nascimento da Silva Beleza[1], Jamile Dehaini[2], Isabelle de Menezes Cruz[1], Cíntia de lima Eleuterio Mendes[1], Roney Azevedo Júnior[1], Ila Morais de Brito-Rocha[3]
[1] Universidade Federal do Amazonas
[2] Universidade do Estado do Amazonas
[3] Secretaria de Educação e Desporto Escolar do Amazonas

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Obras de construção civil necessitam de informação de subsuperfície para que as fundações possam ser bem construídas. Atualmente as obras utilizam a sondagem a percussão (SPT) como método direto para identificar as litologias no subsolo, contudo estas sondagens ainda podem gerar dados incompletos sobre a compactação do solo. Para fundamentar uma interpretação litológica mais realista, os métodos geoelétricos se mostram como métodos bastante eficazes associados ao SPT. Este estudo visa correlacionar a interpretação de três sondagens elétricas verticais a boletins SPT na cidade de Manaus/AM para gerar uma interpretação mais acurada da litologia dos furos.

Introdução

As obras da construção civil transmitem todo seu peso ao material existente na subsuperfície, logo é essencial o estudo e caracterização do subsolo para fundamentar qualquer obra. Na engenharia civil, a geotecnia possui como finalidade a análise da capacidade de suporte do maciço terroso para o correto dimensionamento das fundações, dessa forma a investigação da subsuperfície é procedimento obrigatório para o planejamento e o início de uma obra (Pinto, 2006; Das, 2007).

Na geotecnia, o ensaio de Sondagem a Percussão (Standard Penetration Test, SPT), normatizado, no Brasil, pela ABNT NBR 6484 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020), é o método tradicionalmente utilizado pelos engenheiros para a investigação da subsuperfície. A quantidade de furos a serem sondados é definida por esta norma que estabelece, no mínimo, um furo de sondagem a cada 200 m² de área a ser construída em um terreno de até 1200 m². Contudo, como os dados gerados em ensaios de sondagem a percussão são pontuais é necessário a execução de vários furos de sondagem para sua espacialização em superfície, acarretando no numa onerosidade para a execução dos furos. Além do mais, os dados de SPT são muito susceptíveis a erros operacionais que superestimam a resistência e compactação do solo. Tal problema pode ser solucionado pelo emprego dos métodos geofísicos que aliados a um boletim de sondagem fornecem a interpretação mais precisa da litologia em subsuperfície da área (Castro et al., 2016).

Dentre os métodos geofísicos complementares à geotecnia podemos utilizar os métodos baseados na reflexão de ondas eletromagnéticas, onda sísmicas ou corrente elétrica para o cálculo da resistividade (McDowell et al., 2002). As aplicações são variadas e englobam casos comuns em problemas da engenharia civil como a localização de canalizações e túneis; estudo do perfil estratigráfico local para a execução de fundações; localização de lençóis freáticos para captação de água; determinação da direção ou propagação de pluma de contaminação; avaliação da estabilidade de um terreno; grau de compactação de uma barragem, aterramento e encostas; e avaliação e execução de fundações e estruturas de concreto armado (Gueting et al., 2016; Lalague et al, 2016; Anchuela et al, 2018; Shao et al, 2019; Tosti e Ferrante, 2019; Ramirez et al., 2020; Bigman e Day, 2022; Kariminejad et al., 2023).

Este estudo tem como objetivo realizar uma interpretação integrada entre três sondagens elétricas verticais e três furos SPT em pontos diferentes da cidade de Manaus/AM para correlacionar as características geoelétricas de um ambiente urbano predominantemente latossólico com as descrições litológicas dos boletins SPT.

Metodologia

Na geotecnia o método mais usual para a investigação da subsuperfície rasa é a Sondagem a Percussão (Standard Penetration Test, SPT), normatizado pela NBR 6484 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021). O boletim de SPT apresenta o índice de resistência à penetração no solo, o qual é o valor do número de golpes para a cravação de 30 cm finais (Nspt) do amostrador padrão após a cravação dos 15cm iniciais. Esta cravação é feita com um batedor levantado por uma corda de sisal (Figura 1). O parâmetro Nspt busca caracterizar a resistência do solo em questão para identificar a granulometria, plasticidade, cor e origem do solo em função do seu empilhamento estratigráfico. Após a aquisição do Nspt é feita uma interpretação litológica de acordo com a NBR 6484 (Figura 2).

Apesar da sondagem a percussão ser o método mais usual para extrair dados da subsuperfície, existe certa desconfiança na universalidade dos valores Nspt obtidos devido ao uso de diferentes tipos de martelos, equipamentos de perfuração, técnica do operador, comprimentos e tipos de hastes de perfuração, e taxas

de golpeamento, que transmitem energias distintas às hastes a cada procedimento particular de sondagem (Aggour e Radding, 2001). Outra desvantagem do ensaio geotécnico é a possibilidade do surgimento de erros de interpretação quando o amostrador encontra rochas de diâmetro maior que a manga do barril de amostra levando ao registro de elevado número de golpes e a consideração de um horizonte ser um topo rochoso impenetrável (Rogers, 2006). A mudança de espessura e rigidez entre os estratos também contribuem para o aumento da resistência a penetração do amostrador levando a superestimação da resistência, densidade e compressibilidade.

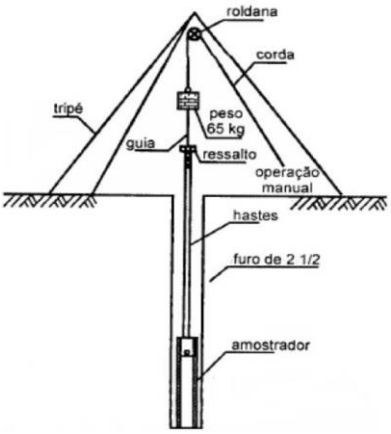


Figura 1 – Esquema do funcionamento de um SPT. Adaptado de Schnaid (2000).

Solo	Índice de resistência à penetração *N*	Designação [a]
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Medianamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	20 a 30	Muito rija(o)
	> 30	Dura(o)

[a] As expressões empregadas para a designação da compacidade das areias (fofa, compacta etc.) são referências à deformabilidade e à resistência destes solos, sob o ponto de vista de fundações, e não podem ser confundidas com as mesmas denominações empregadas para a designação da compacidade relativa das areias ou para a situação perante o índice de vazios críticos, definidos na mecânica dos solos.

Figura 2 – Interpretação litológica em profundidade com base no Nspt. Fonte: ABNT NBR 6484:2020.

Uma das formas de contornar a ambiguidade da interpretação do boletim SPT é a utilização de sondagens elétricas verticais. A sondagem elétrica vertical (SEV) é normatizada pela ABNT NBR 7117-1 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021) e é uma técnica do método da eletrorresistividade que consiste na análise e interpretação da resistividade aparente obtida a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno, investigando, de maneira pontual, sua variação em profundidade. A técnica se baseia na Lei de Ohm que define uma relação empírica entre a corrente fluindo através de um condutor e a voltagem requerida para conduzir esta corrente. Esta Lei descreve que a corrente (I) que passa por um material é proporcional à voltagem (V) através da relação

$$V = R \cdot I, \quad (1)$$

em que R é a resistência do material dada em Ω, V é a voltagem dada em Volts e I é a intensidade da corrente elétrica dada em Ampères. A resistência de um material é função de sua geometria e expressa por:

$$R = \rho\, L/A, \quad (2)$$

em que L é o comprimento do material dado em metros, A é sua área dada em m² e ρ é a resistividade do material dada em Ωm.

Num ambiente geológico, a heterogeneidade de litotipos em termos de alteração, fraturamento, saturação e mineralogia refletem mudança na resistividade elétrica. Uma rocha condutora de corrente elétrica pode ser considerada como sendo um agregado com estrutura de minerais sólidos, líquidos e gases, na qual sua resistividade é influenciada pela resistividade dos minerais formadores da rocha, resistividade dos fluidos que preenchem a rocha, umidade, porosidade, textura e alterações intempéricas. Portanto, o mapeamento de resistividade elétrica consegue fornecer informações destes litotipos (Braga, 2016).

Para efetuar medições da resistividade em profundidade é necessária uma disposição de eletrodos que injetem corrente em subsuperfície (eletrodos de corrente AB) e outros que leiam a voltagem devido a esta corrente (eletrodos de potencial MN). Contudo, para efetuar medições sobre um meio heterogêneo, a voltagem observada será diferente da registrada sobre um meio homogêneo, pois o campo elétrico se comportará anisotropicamente. Assim, levamos em consideração que a subsuperfície é um meio homogêneo e a resistividade medida é uma média ponderada das resistividades verdadeiras. Esta leitura é uma resistividade aparente ρ_a expressa por

$$\rho_a = K\, \Delta V/I, \quad (2)$$

onde K é o fator geométrico que depende da disposição dos eletrodos AB e MN na superfície, ΔV é a voltagem medida e I é a corrente injetada.

As SEVs são caracterizadas pelo alinhamento simétrico de todos os quatro eletrodos AB e MN na mesma direção com ponto central e movimentação em sentidos opostos. Assim, ela consiste numa sucessão de medidas de voltagem nos eletrodos MN para cada abertura crescente e constante de eletrodos AB. Neste estudo utilizaremos o arranjo Schlumberger que se caracteriza pelo aumento constante da distância dos eletrodos AB em relação aos MN (Figura 3). Este arranjo está menos sujeito às irregularidades na superfície topográfica e ruídos aleatórios. Desse modo o volume total do subsolo que será trajetória da corrente aumenta e, consequentemente, é possível alcançar camadas cada vez mais profundas (Braga, 2016; Souza e Gandolfo,

2021). Para o arranjo Schlumberger utilizamos a constante K dada por

$$K = \pi (AM \cdot AN) / MN \quad (4)$$

em que AM é a distância entre os eletrodos A e M, AN é a distância entre os eletrodos A e N e MN é a distância entre os eletrodos M e N.

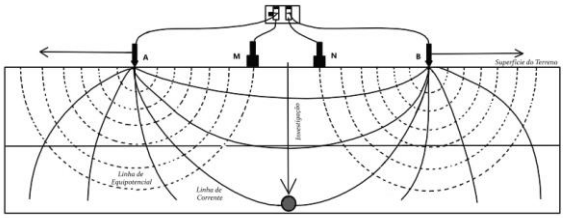


Figura 3 – Diagrama esquemático do arranjo Schlumberger para a SEV. Os eletrodos A e B aumentam de distância enquanto que os eletrodos M e N permanecem constante. Adaptado de Braga (2016).

Resultados e Discussões

Realizamos três SEVs em locais distintos na cidade de Manaus/AM nas regiões do bairro São Francisco, Adrianópolis e Av. das Torres (Figura 4) onde existiam boletins SPT. Todos os resultados de inversão geoelétrica foram realizados no software IPI2WIN (Zohdy, 1989).

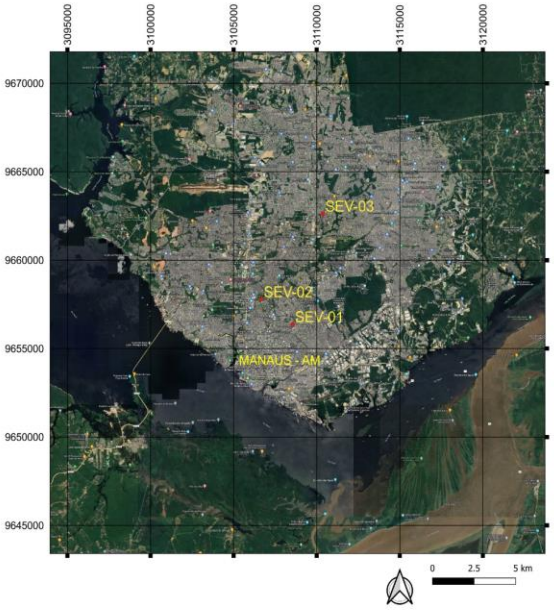


Figura 4 – Mapa de localização das SEVs.

A SEV-01 está associada à sondagem a percussão do bairro São Francisco (Figura 5). A litologia do boletim mostram uma predominância de areia siltosa até 10,45m e detecção de lençol freático a 8m. A areia siltosa está pouco compactada até um limite entre 6,5m a 7,5m. A figura 6 mostra a inversão estimando 4 camadas geoelétricas, onde a primeira camada é condutiva com 0,5m de espessura, a segunda muito resistiva com 0,5m, a terceira medianamente resistiva com 1,9m e a última sendo condutiva. A alta resistividade da segunda camada pode ser explicada devido a resquício de materiais de concreto na superfície do perfil, pois o local já havia passado por adequação geotécnica para evitar desmoronamento (Figura 7). As outras camadas condutivas estão em consonância com a interpretação SPT pois elas se referem a uma litologia com alta porosidade e baixa compactação, contudo há uma discrepância na resistividade abaixo de 3m de profundidade indicando que a areia siltosa é mais porosa do que a que existe acima de 3m.

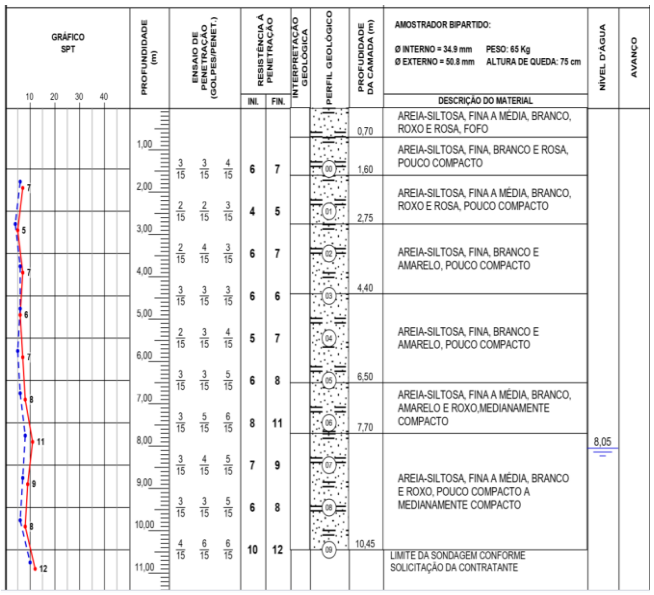
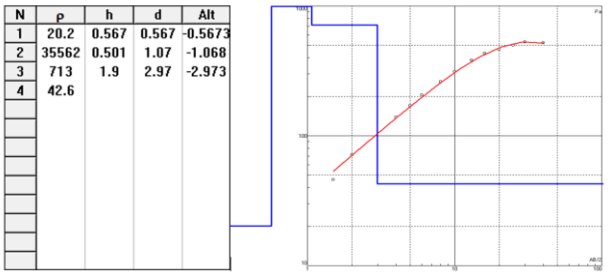


Figura 5 – Boletim SPT próximo a SEV-01 no bairro São Francisco. Linha contínua vermelha indica trado cavadeira e linha pontilhada azul indica aos 30cm iniciais e finais.



N	ρ	h	d	Alt
1	20.2	0.567	0.567	-0.5673
2	35562	0.501	1.07	-1.068
3	713	1.9	2.97	-2.973
4	42.6			

Figura 6 – Resultado da inversão da SEV-01. **N** indica número de camadas, **ρ** indica resistividade verdadeira estimada, **h** indica espessura da camada, **d** indica profundidade do topo da camada e **Alt** indica cota altimétrica levando em consideração a superfície como zero.

Figura 7 – Linha preta indicando a adequação geotécnica para impedir a estabilização de uma encosta no local da SEV-01.

A SEV-02 está associada à sondagem a percussão no bairro Adrianópolis (Figura 8). O boletim mostra a predominância de areia fina a média pouco siltosa até 7,20m de profundidade e areia fina a grossa pouco siltosa até 9,79m. O nível freático é definido a 2,85m de profundidade. A SEV-02 estimou 4 camadas geoelétricas de resistividade crescente (Figura 9). Até 1m é estimada uma resistividade de 275Ωm e até 2,42m de profundidade a inversão estimou um valor de resistividade de 498Ωm. A partir de 2,42m existe um salto para 1491 Ωm até 6,5m. Em comparação com o boletim SPT, podemos estimar três camadas geoelétricas explicadas pela compactação e diminuição da porosidade. Apesar do nível de água estar a 2,85m, a alta compactação da areia elevou os valores de resistividade. Nos boletins temos uma única interface dividindo sedimentos entre areia fina e grossa e areia fina e grossa pouco siltosa, contudo a interpretação geoelétrica mostra que há um aumento de compactação desses sedimentos a partir de 2,42m. A partir de 6,5m há outro salto de resistividade para 4274Ωm indicando mais compactação associada à mudança de granulometria da areia fina e média para areia grossa pouco siltosa descrita no boletim.

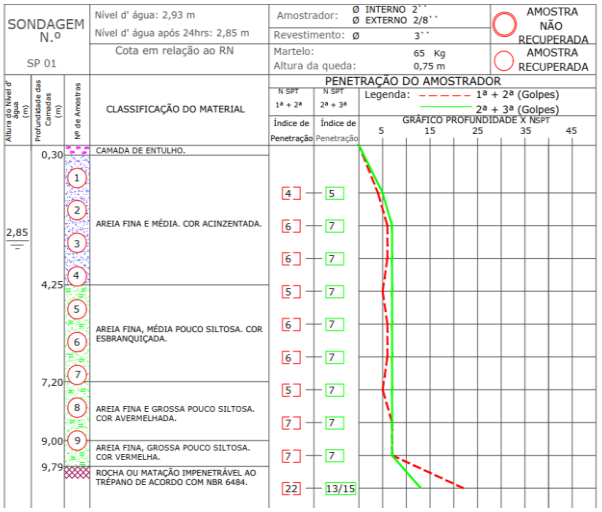


Figura 8 – Boletim SPT próximo a SEV-01 no bairro Adrianópolis.

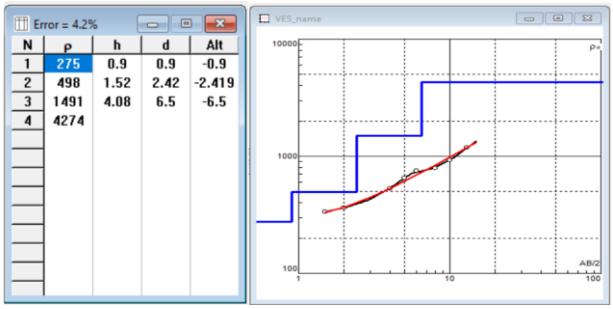


Figura 9 – Resultado da inversão da SEV-02. **N** indica número de camadas, **ρ** indica resistividade verdadeira estimada, **h** indica espessura da camada, **d** indica profundidade do topo da camada e **Alt** indica cota altimétrica levando em consideração a superfície como zero.

A SEV-03 está associada à sondagem a percussão na Av. das Torres (Figura 10). Nesta SEV conseguimos estimar 3 camadas geoelétricas até 2,89m. Uma camada condutiva de 227Ωm até 1,45m, outra resistiva de 7594Ωm até 2,89m e o topo de uma condutiva de 64Ωm a partir de 2,89m (Figura 11). Até a profundidade de 5,6m, o boletim mostra uma interface que separa argila arenosa e argila pouco arenosa a 0,4m. A baixa resistividade das camadas geoelétricas é consonante com a interpretação litológica do boletim pois a argila é condutiva, contudo, o alto valor de 7594Ωm indica uma camada compactada de 1,44m de espessura não detectada no boletim. Podemos interpretar que nesta profundidade pode existir uma porção areno-argilosa muito compactada, não detectada pelo Nspt. O boletim só consegue detectar uma camada medianamente compactada de areia argilosoa a partir de 5,60m.

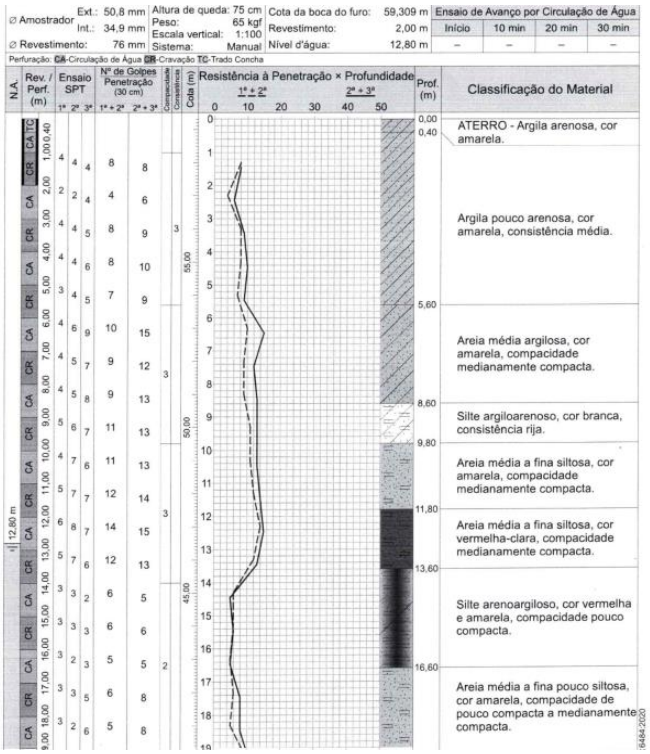


Figura 10 – Boletim SPT próximo a SEV-03 na Av. das Torres.

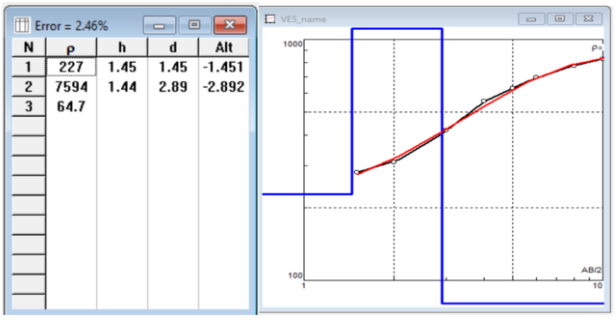


Figura 11 – Resultado da inversão da SEV-03. **N** indica número de camadas, **ρ** indica resistividade verdadeira estimada, **h** indica espessura da camada, **d** indica profundidade do topo da camada e **Alt** indica cota altimétrica levando em consideração a superfície como zero.

Apesar de adicionar informações sobre a compactação dos sedimentos nos boletins SPT, as inversões estimaram poucas camadas geoelétricas e de pouca espessura. Isto ocorre porque a injeção de corrente no subsolo possui trajetória reduzida devido ao alto número de utilidades subterrâneas que atenuam sua intensidade, impossibilitando que ela alcance profundidades maiores. Além do mais as aberturas AB são limitadas devido ao arboreamento, valas, asfalto e comprimento das ruas, dificultando a logística de realização de uma SEV num ambiente urbano.

Conclusões

Realizamos três sondagens elétricas verticais em pontos distintos da cidade de Manaus/AM e comparamos com boletins SPT destes locais. As três sondagens mostraram informações extras da compactação dos sedimentos que não existiam nos boletins em consonância com a interpretação litológica.

As três sondagens também só conseguiram estimar a resistividade em poucas camadas próximas a superfície e com pouca espessura devido à atenuação da corrente elétrica em subsolo urbano decorrente da existência de utilidades subterrâneas. Como trabalhos futuros recomendamos a utilização de outros métodos geoelétricos, como GPR, para melhor caracterização litológica e de utilidades subterrâneas e o uso integrado de equações que relacionem Nspt com a resistividade para estimativa mais acurada da litologia e compactação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Concresonda Engenharia E Tecnologia Ltda. pela cessão de dados SPT. C.F.N.S. Beleza agradece a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (bolsa 64302.UNI944.20700.13022023-88654).

Referências

Aggour, M. S., Radding, W. R. 2001. Standard Penetration Test (SPT) Correction. Maryland Department of Transportation, State Highway Administration. Maryland, 92p.

Anchuela, O. P.; Frongia, P.; Gregorio, F. D.; Sainz, A. M. C.; Juan, A. P. 2018. Internal characterization of embankment dams using ground penetrating radar (GPR) and thermographic analysis: A case study of the Medau Zirimilis Dam (Sardinia, Italy). Engineering Geology. 237: 129-139.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2020. ABNT NBR 6484: Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Métodos de Ensaio. São Paulo. 28p. Disponível em: < https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=QUpQNHFZWW1ibXpad1g4Q1VQOXFpUU9ORlJ3ZXRDM2tlM3IxT2dTaEJFQT0= >

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2021. ABNT NBR 7117-1: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos: Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoelétrica. São Paulo. 22p. Disponível em:<https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=SVFtOEgxT3lVdG94OXZ1NEtpNnRvZ1JiQjZPUmR5VHBKU0hWMnNIWERucz0= >

Bigman, D. P.; Day, D. J. 2022. Ground penetrating radar inspection of a large concrete spillway: A case study using SFCW GPR at a hydroelectric dam. Case Studies in Construction Materials. Vol. 16, e00975.

Braga, A.C.O. 2016. Geofísica aplicada: métodos geoelétricos em hidrogeologia. Oficina de Textos: São Paulo.

Castro, B.C.; Garcia, A.F..; Gondo, G.H.B.; Marques, S.F..; Sousa, M.V..; Queiroz, J.S.; Reinaldo, R.L. 2016. Perfis geotécnicos da cidade de Palmas – TO por meio de sondagens SPT e ensaios geofísicos. In: Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRASEGM, 18 Belo Horizonte – Minas Gerais.

Das, B. M. 2007. Fundamentos de engenharia geotécnica. Tradução All Tasks. Revisão técnica Pérsio Leister de Almeida Barros. Thomson Learning. 6ª edição norte americana. São Paulo.

Gueting, N.; Vienken, T.; Klotzsche, A.; Kruk, J. V. D.; Vanderborght, J.; Caers, J.; Vereecken, H.; Englert, A. 2017. High resolution aquifer characterization using crosshole GPR full-waveform tomography: Comparison with direct-push and tracer test data. Water Resources Research. 53, 49 -72, Issue 1.

Kariminejad, N.; Sepehr, A.; Bernatek – Jakiel, A.; Nadal – Romero, E.; Rashti, M. R. 2023. Ecological engineers or underground plumbers? Mechanisms of the biological activities in controlling soil pipes and gully head cuts. Environmental Earth Sciences. 82 (595).

Lalague, A., Lebens, M.A., Hoff, I. Et Al. 2016. Detection Of Rockfall On A Tunnel Concrete Lining With ground-penetrating radar (GPR). Rock Mech Rock Eng 49, 2811–2823.

McDowell, P.W.; Barker, R.D.; Butcher, A.P.; Culshaw, M.G.; Jackson, P.D.; MacCann, D.M.; Skipp, B.O.; Matthews, S.L.; Arthur, J.C.L. 2002. Geophysics in engineering investigations. CIRIA, London, UK.

Pinto, C.S. 2006. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3ª edição. Oficina de Textos: São Paulo.

Ramirez, J. O.; Bano, M.; Arce, M. T. C.; Alvarado, L. A. V.; Fraga, C. C. 2020. Application of non-invasive geophysical methods (GPR and ERT) to locate the ancient foundations of the first cathedral of Puebla, Mexico. A case study. Journal of Applied Geophysics. Vol. 174, 103958.

Rogers, J. D. 2006. Subsurface exploration using the standard penetration test and the cone penetrometer test. Environmental & Engineering Geoscience, 12 (2): 161-179.

Schnaid, F. 2000. Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações. Oficina de Textos: São Paulo.

Shao, S., Gao, C., Guo, X. et al. 2019. Mapping the contaminant plume of an abandoned hydrocarbon disposal site with geophysical and geochemical methods, Jiangsu, China. Environ Sci Pollut Res 26, 24645–24657.

Souza, L.A.P.; Gandolfo, O.C.B. 2021. Geofísica aplicada à geologia de engenharia e meio ambiente: manual de boas práticas. 1ª Edição. ABGE: São Paulo.

Tosti, F.; Ferrante, C. 2020. Using Ground Penetrating Radar Methods to Investigate Reinforced Concrete Structures. Surv Geophys. 41: 485–530.

Zohdy, A.A.R. 1989. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves, Geophysics, v. 54, n 2, pp 245 – 253.