

MÉTODOS GEOFÍSICOS DE ELETRORRESISTIVIDADE APLICADOS AO ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TALUDES



Fonte: mgsulengenharia.com.br

Métodos geofísicos de investigação são extremamente úteis e eficientes na verificação das condições de estabilidade de taludes. Além de não serem invasivos, apresentam uma excelente relação custo-benefício, são versáteis e permitem varreduras de grandes áreas em um curto intervalo de tempo. Utilizados geralmente em grandes obras de Engenharia, como túneis, barragens, estradas e aterros, seus resultados podem ser correlacionados com aqueles obtidos por métodos diretos de investigação.

Particularmente, as técnicas de Eletorresistividade por Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e por Caminhamento Elétrico (CE), baseadas na obtenção dos parâmetros de resistividade dos materiais constituintes do maciço, permitem a identificação de perfis, condições e estruturas geológico-geotécnicas influentes em movimentos de massas.

INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS NA PREVENÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSAS

Todo projeto de estabilização de taludes depende da confiabilidade dos dados geológico-geotécnicos para a montagem de modelos realistas, informações estas que podem ser obtidas mediante métodos de investigação, cuja importância é destacada por Oliveira e Brito (1998, p. 163):

Os métodos de investigação geológica consistem em procedimentos que visam determinar as características principais do solo quanto aos parâmetros físicos, químicos e biológicos para que, dessa forma, haja a possibilidade do seu uso e ocupação. O objetivo do estudo da crosta terrestre através de determinadas metodologias é delimitar espacialmente os maciços rochosos, assim como determinar suas características e propriedades geomecânicas através de um conjunto de processos de investigação, com base no conhecimento das unidades geológicas, assim como das investigações geológicas. Oliveira e Brito (1998, p.163).

Os métodos de investigação podem ser classificados como diretos ou indiretos.

No primeiro caso, permite-se o contato direto com os substratos terrosos ou a obtenção de amostras e testemunhos, por meio de perfurações, escavações ou uso de instrumentos para a obtenção de parâmetros *in situ*. Por razões de custos ou, até mesmo, restrições ambientais, os espaçamentos entre pontos de investigação podem ser significativamente elevados, o que resulta em maiores incertezas.

Dentre os métodos diretos existentes, destaca-se o SPT (*Standart Penetration Test*),

amplamente difundido no Brasil para aplicação em maciços terrosos, sendo regido pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6484: *Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio*. Tal método baseia-se na cravação por percussão de um barrilete amostrador e na consequente obtenção de resultados de penetração (índice de resistência à penetração do solo – o N_{SPT}), da posição de níveis freáticos e de amostras de material para análise. Para substratos rochosos, por sua vez, são necessárias sondas rotativas motomecanizadas para a extração de testemunhos (Figura 01).



Figura 01 – Testemunhos de rocha obtidos em sondagens rotativas.

Fonte: torresgeotecnia.com.br

Em todos os casos, os métodos diretos são invasivos, podendo acarretar em perturbações no maciço.

Nos métodos indiretos, por sua vez, não existe acesso direto aos substratos e aos materiais investigados (ausência de amostragem). Inclui-se nesta categoria os métodos geofísicos que, por meio da medição de parâmetros físicos específicos, sem perturbação do maciço, fornecem subsídios para interpretação indireta de feições, substratos e estruturas de subsuperfície em leituras de perfis; são versáteis, possibilitam a visualização de extensas áreas em um curto intervalo de tempo e apresentam uma excelente relação custo-benefício. Na construção de modelos mais confiáveis, seus dados gerados podem ser correlacionados com aqueles obtidos nos métodos diretos.

Dentre a gama de métodos geofísicos, destacam-se os ditos potenciais (gravimétricos, magnetométricos e radioativos), os sísmicos (de reflexão e refração) e os elétricos. Estes últimos são tradicionalmente aplicados em estudos hidrogeológicos, que abrangem desde atividades de captação de águas subterrâneas para abastecimento ao mapeamento de plumas de contaminantes. Em Geotecnia, os métodos elétricos (que englobam o da eletrorresistividade) e sua grande variedade de sistemas de aquisição de dados possibilitam o estudo de topos rochosos, espessura de substratos, posicionamento de nível d'água, além da identificação de cavidades, fraturas e outras anomalias subterrâneas, tais como planos preferenciais de ruptura e escorregamento de massas.

O MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE

Resistividade elétrica

A resistividade elétrica de um material é uma grandeza que caracteriza a sua resistência à passagem de um fluxo de corrente elétrica (i). O seu valor numérico é inversamente proporcional à quantidade de cargas que o atravessa, sendo capaz de diferenciar bons e maus condutores. A Lei de Ohm estabelece uma relação entre a resistividade (ρ) e a resistência (R). Neste caso, considerando um condutor homogêneo na forma cilíndrica, com comprimento l e seção transversal com área A (Figura 02),

tem-se a relação:

$$\rho = R \frac{A}{l}$$

No sistema internacional (SI), a unidade é ohm-metro ($\Omega \cdot m$).

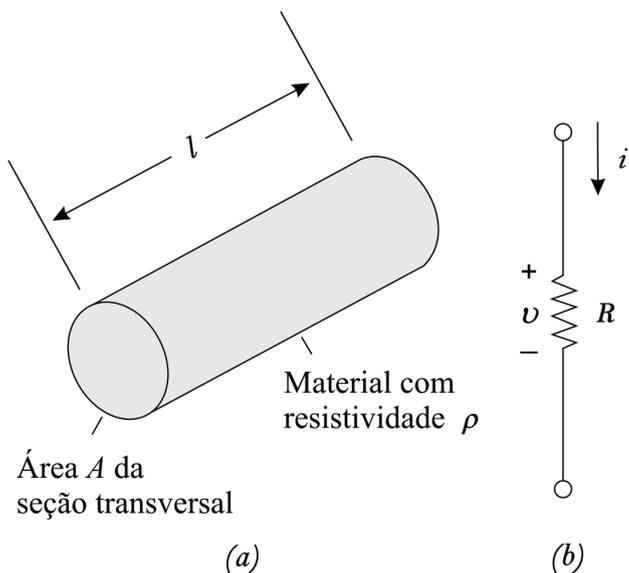


Figura 02 – Modelo hipotético de condutor homogêneo na forma cilíndrica.

De forma análoga, pode-se definir condutividade como a facilidade que o material apresenta para a passagem de corrente, sendo, numericamente, o inverso da resistividade.

A propagação de cargas elétricas em maciços

Em maciços, assim como em qualquer corpo tridimensional, o panorama de propagação de corrente não é tão simples como em um condutor cilíndrico, pois ela não flui em um único caminho. Como premissa para estudos geofísicos por eletrorresistividade, considera-se a propagação de corrente via processo eletrolítico (diferente do eletrônico ou ôhmico e do dielétrico, característico de materiais isolantes).

A propagação de cargas elétricas no subsolo dependerá, principalmente, da porosidade dos materiais e da presença de água, além dos minerais condutivos e sais dissolvidos. Em rochas com baixa porosidade, como é o caso dos embasamentos cristalinos, a resistividade geralmente é elevada. Já a presença de fraturas e discontinuidades induzem a valores mais baixos desse parâmetro.

Descrição do método

O método da eletrorresistividade tem como objetivo determinar a distribuição das resistividades em subsuperfície, a partir de correntes elétricas aplicadas artificialmente por intermédio de eletrodos.

Existem, basicamente, duas técnicas distintas de eletrorresistividade para sondagem de subsuperfície, a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (CE). Na primeira, a informação obtida é pontual, sendo traçado um perfil, que varia com a profundidade, a partir de um ponto fixo na superfície; enquanto na segunda, são apresentados resultados em plantas ou perfis, com mapeamento de discontinuidades horizontais (mantendo-se, em teoria, a profundidade constante).

O equipamento utilizado para os métodos de eletrorresistividade é o resistivímetro, que consiste em uma fonte para emissão controlada de carga elétrica e medidores de tensão. As Figuras 03 e 04, a seguir, apresentam o equipamento da SYSCAL PRO, cujos dados coletados em campo são transmitidos para um computador através de softwares específicos (como o PROSYS).



Figuras 03 e 04 – Resistivímetro da SYSCAL PRO, com aplicação em campo.
Fonte: iris-instruments.com

a) Sondagem Elétrica Vertical

Em trabalhos de campo, utilizando-se a técnica de SEV, usualmente, são utilizados quatro eletrodos em linha, conforme o Arranjo de Schlumberger apresentado na Figura 05.

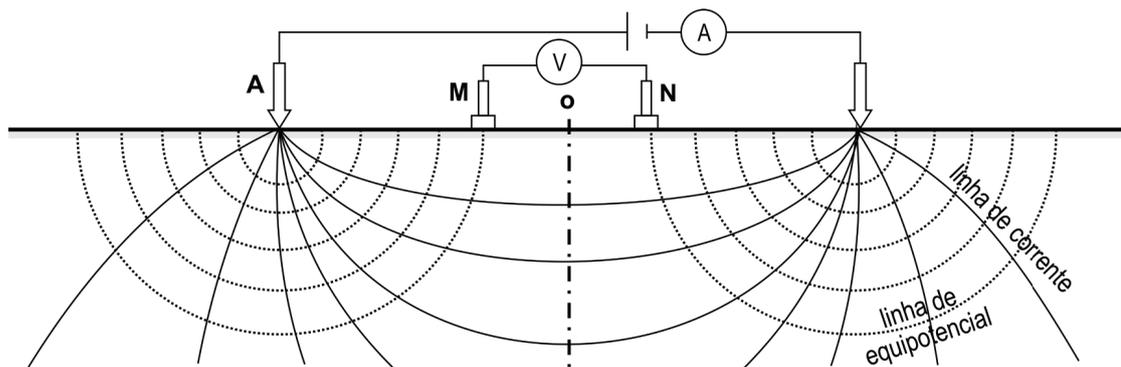


Figura 05 – Perfil de uma configuração usual, com quatro eletrodos, segundo o Arranjo de Schlumberger. Fonte: Braga (2006)

Nesse modelo, são utilizados dois eletrodos, A e B, metálicos ou porosos, que introduzem corrente elétrica no solo, resultando em um campo elétrico artificial. Um circuito receptor, para medida da diferença de potencial (V), é disposto internamente através dos eletrodos M e N, distribuídos simetricamente em relação ao eixo central (ponto O a ser investigado). Esses dois eletrodos permanecem sempre fixos e a variação de espaçamento se dá somente com os eletrodos A e B.

Após a obtenção da chamada resistividade aparente¹ é então calculada a resistividade real

pelo processo de inversão geofísica.

O Arranjo de Schlumberger é prático, pois requer somente o deslocamento de dois eletrodos (A e B), além de fornecer leituras menos sujeitas a interferências de ruídos de fundo.

b) Caminhamento elétrico

Neste caso, são estudadas as variações horizontais de parâmetros físicos, em profundidades determinadas, sendo necessário que os eletrodos se mantenham com espaçamentos fixos. Diferente do Arranjo de Schlumberger,

¹-Este termo é utilizado, pois o subsolo não é um meio homogêneo com resistividade constante. O valor de resistividade obtido é resultante do atravessamento de diversos estratos com parâmetros variáveis.

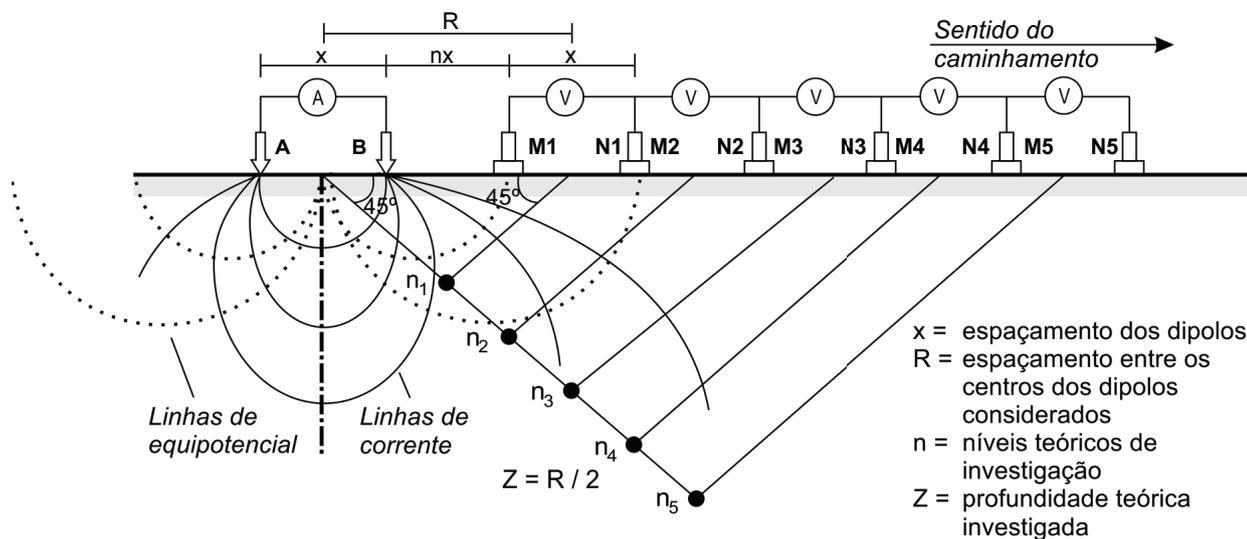


Figura 06 – Arranjo Dipolo-dipolo, da técnica do caminhamento elétrico.
 Fonte: Braga (2006)

todo o sistema é deslocado horizontalmente, no sentido do caminhamento, para a obtenção do perfil desejado em outras posições (Figura 06).

A profundidade de investigação alcançada (em nível teórico n_i) é definida pelo afastamento entre os eletrodos. Quanto maior for este afastamento, maior será a profundidade de investigação (MUSSETT et al, 2018). Em taludes terrosos, muitas vezes é necessário realizar o método a maiores profundidades, a fim de atingir o topo de rocha sã.

O arranjo mais comum da técnica do Caminhamento Elétrico é, também, o Dipolo-dipolo (Figura 06), capaz de responder de forma satisfatória às variações horizontais de resistividade. Gallas (2000) destaca a vantagem do arranjo simétrico, pela facilidade na interpretação das ditas pseudoseções, para uma melhor determinação de anomalias.

Assim como na SEV, a técnica de caminhamento também necessita do processo de inversão geofísica para tratamento de dados e mudança iterativa de parâmetros do modelo (RIGOTI, 1998), por meio de *softwares* específicos, permitindo a geração de uma imagem bidimensional do subsolo, a seção geoeletrica, que permite interpretações quantitativas.

ESTABILIDADE DE TALUDES

Taludes são maciços que formam superfícies inclinadas, formadas por massas heterogêneas de solo, rocha ou os dois materiais em proporções variáveis, sendo formados por processos geomorfológicos naturais ou por ação antrópica (taludes de corte). A Figura 07 apresenta um talude, com a representação do pé (base), da rampa, com ângulo de inclinação, e da crista (porção superior).

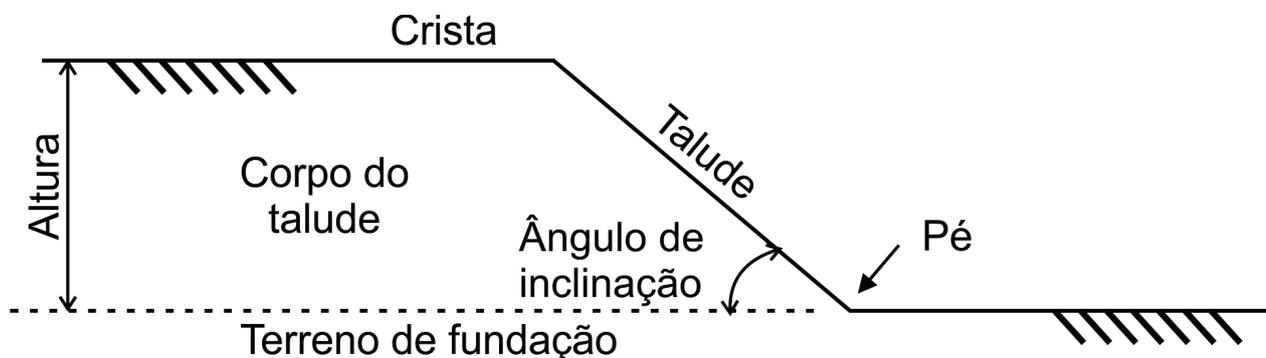


Figura 07 – Representação básica de um talude.
 Fonte: Prof. MSc. Douglas M. A. Bittencourt – PUC Goiás – Geotecnia II5.

Condicionantes

Em muitos casos, é possível estabelecer o conjunto de condicionantes diretas e indiretas que atuam na deflagração de processos de movimentos de massas em situações de instabilidade. Para Guidicini e Nieble (1976), as causas podem ser:

- a) **internas:** por efeito de gradientes de temperatura ou alteração de fatores de resistência por ação das intempéries;
- b) **externas:** relacionadas a alterações geométricas de superfície e de substrato, além de vibrações externas ao maciço; ou
- c) **intermediárias:** através de mudanças nos níveis freáticos e por erosões internas.

Diversas localidades do sudeste do país apresentam riscos elevados de movimentos de massas, já tendo sido palco de inúmeras tragédias com milhares de vítimas humanas. Em geral, ocorrem em áreas densamente povoadas, com profundas transformações antrópicas, que interferem na geomorfologia original e que, nos meses de verão, são atingidas por picos pluviométricos em precipitações convectivas.

Método da eletrorresistividade aplicado aos estudos de estabilidade

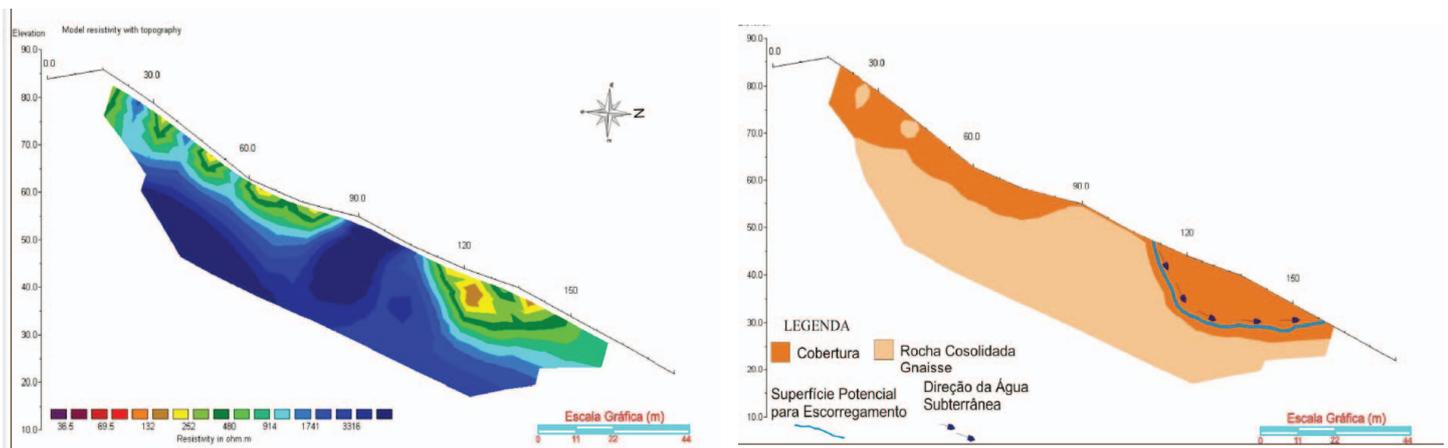
Os dois métodos apresentados (SEV e CE) são geralmente executados de forma concomitante em estudos de estabilidade de taludes, na determinação das características do maciço – camadas de cobertura, presença de blocos e matações, posição do substrato rochoso, planos preferenciais para escorregamentos, nível do lençol freático e direção de fluxos de água subterrânea – todos condicionantes importantes nas condições de estabilidade. Os valores obtidos são plotados de forma a preencher toda a área estudada.

Os caminhamentos elétricos são distribuídos linearmente em várias frentes de avanço paralelas que, juntas, formam uma malha (em planta) no terreno. A interpretação das frentes se dá com o auxílio de *softwares*.

As Figuras 08 e 09, extraídas do trabalho de Xavier (2010), apresentam, respectivamente, um exemplo de distribuição de valores de resistividade, em uma seção geoeletrica bidimensional, conforme legenda de cores e sua interpretação geológica.

As imagens tridimensionais, por sua vez, são obtidas com os dados dos caminhamentos.

Na Figura 10, são apresentadas diferentes posições de um perfil tridimensional, onde se encontram presentes anomalias associadas a zonas de descontinuidades em massas de materiais potencialmente instáveis.



Figuras 08 e 09 – Imagem geoeletrica bidimensional, à esquerda, com sua respectiva interpretação geológica, à direita. Fonte: XAVIER (2010) adaptada.

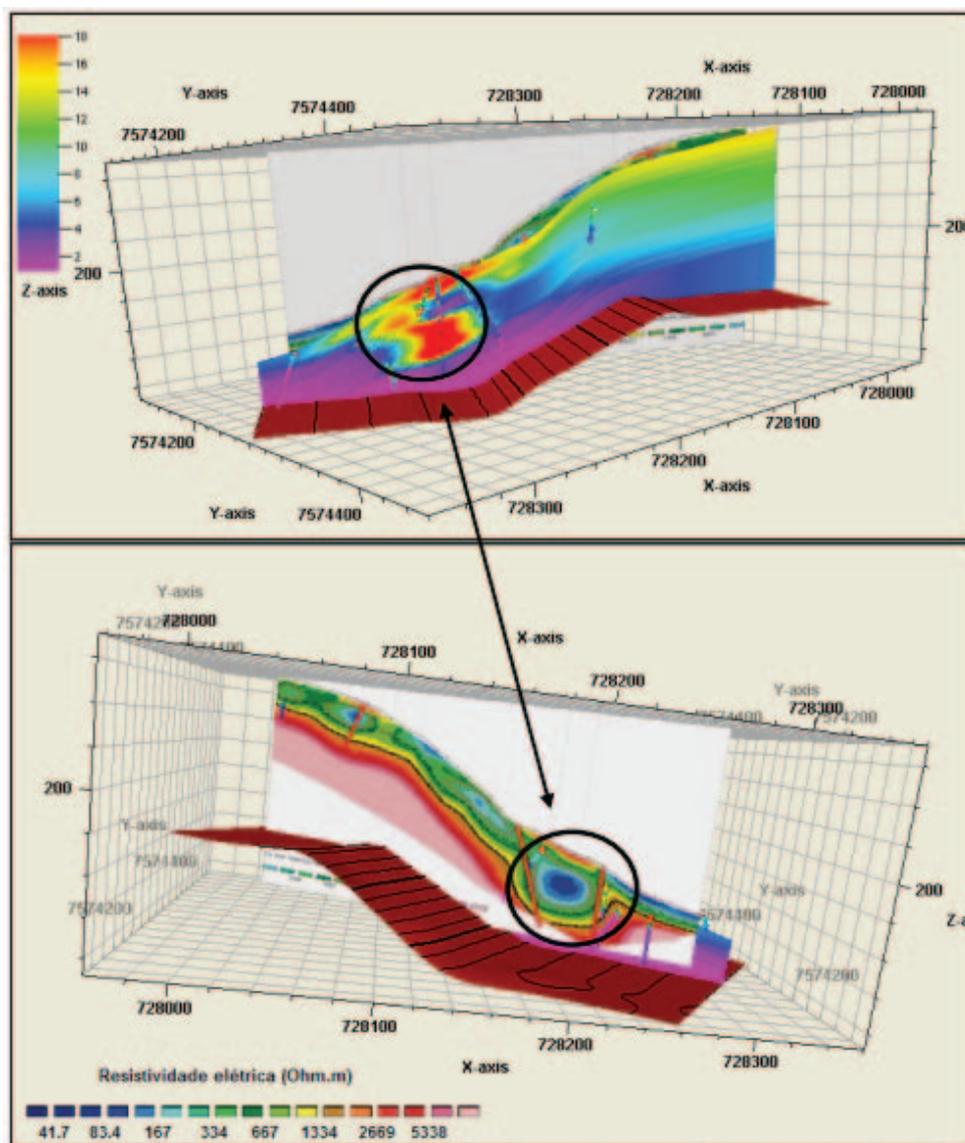


Figura 10 – Representação de anomalias em um perfil tridimensional. Fonte: MARCHESI (2008).

Aplicações na Marinha do Brasil

A importância dos métodos de eletrorresistividade para investigações geológico-geotécnicas para a Marinha do Brasil é notória, em função da existência de instalações terrestres construídas em áreas com potencial risco de movimentos de massa, a exemplo do Depósito de Combustíveis da Marinha no Rio de Janeiro; Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro; Estação Naval do Rio Negro, em Manaus; Base Naval de

Aratu, em Salvador; além de Organizações Militares existentes no Complexo Naval da Ponta da Armação e na Ilha de Mocanguê, dentre outras.

Tais métodos são estudos úteis, não apenas no subsídio de obras para a remediação de taludes instáveis, mas, também, para a prevenção de acidentes a partir de mapeamentos de riscos geomecânicos de áreas ocupadas.



CONCLUSÃO

Os métodos geofísicos de eletrorresistividade têm sido amplamente utilizados, principalmente, para o fornecimento de dados em grandes obras civis, tais como barragens, aterros, túneis, estradas, dentre outras.

As vantagens são inúmeras, porém, cabe lembrar que os resultados fornecidos por tais ferramentas refletem uma distribuição complexa de parâmetros físicos em massas heterogêneas e anisotrópicas de solo e rocha, carecendo, portanto, de bons profissionais de Geologia, Geofísica e/ou Engenharia Civil para interpretá-los. Além disso, a prática tem mostrado que, em projetos de estabilidade de taludes, os resultados gerados têm sido bastante eficazes, principalmente, quando correlacionados com dados oriundos de métodos diretos de investigação e de mapeamento geológico de superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRAGA, A. C. O. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. Tese de Doutorado da UNESP. Rio Claro/SP, 2006.
2. BRITO, W. D. L.; GOMES, C. Fundação e Geotecnia: Métodos de investigação geológica e geotécnica da fundação de barragens de concreto. Revista do CEDS (ISSN 2447-0112), no. 9, Ago-Dez, 2018.
3. GALLAS, J. D. F. Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. Tese de doutorado do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP. São Paulo/SP, 2000.
4. GONÇALVES, J. T. D.; BOTELHO, M. A. B. Integração de sondagens geofísicas de eletrorresistividade e sondagens geotécnicas SPT: estudo de caso em aterro na via expressa BA-093. 16º. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo/SP, 2018.
5. GUIDICINI, G. e NIEBLE, C. M. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. Editora Edgar Blücher. São Paulo/SP, 1976.
6. MARCHESI, V. R. Modelagem geomecânica tridimensional de maciços rochosos para análise bidimensional da estabilidade dos taludes de escavação da Casa de Força do AHESimplício. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro/RJ, 2008.
7. MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. Looking into the earth: an introduction to geological geophysics. Cambridge University Press. Nova Iorque/NY, 2000.
8. OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo/SP, 1998.
9. ORELLANA, E. Prospección geoelectrica por campos variables. Ed. Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, 571 p. Madrid, 1974.
10. RIGOTI, A. Exploração geofísica terrestre por métodos gravimétricos, magnetométricos e gamaespectrométricos. Curso de Aperfeiçoamento em Exploração Mineral (EXMIN 98) – ADIMB. Brasília/DF, 1998.
11. XAVIER, F. F. Geofísica elétrica aplicada à Geotecnia para investigação de estabilidade de taludes. VII Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul. ABMS. Foz do Iguaçu/PR, 2010.

Autor

CT (EN) Marcos William Magalhães Leiras de Carvalho

Engenheiro Civil (com Ênfase em Geotecnia) formado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Pós-Graduado em Gerenciamento de Projetos pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas) e em Radioproteção e Segurança de Fontes Radioativas pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD).