



Emprego do método da eletrorresistividade em apoio à exploração de areia na região de Leme – SP: Resultados preliminares

Victor Hugo Hott Costa * (USP), Jorge Luís Porsani (USP), Nathália de Souza Penna (USP), Marcelo Cesar Stangari (USP) Ícaro Augusto Pachêco (USP) & Nicolás Correa de Oliveira (USP)

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX 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

Investigações geoeletricas foram empregadas visando à caracterização de um depósito de areia explorado por uma Mineração de Pequena escala (MPE), localizado na região de Leme, São Paulo. Perfis de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo e sondagem elétrica vertical com arranjo Schlumberger foram adquiridos. Os resultados preliminares mostram um pacote espesso e homogêneo de areia não-saturada, seguido por uma zona de transição, e um pacote de areia representado por uma zona saturada. Os resultados estão em concordância com as informações litológicas de furos de sondagens e contribuem para um melhor planejamento de exploração do depósito.

Introdução

As atividades de mineração desempenham um importante papel para a sociedade, fornecendo matéria prima à indústria, à agricultura, à construção civil, aos bens de consumo, dentre outras áreas. Segundo o Ministério de Minas e Energia, 86,2% das empresas de mineração registradas no Brasil são classificadas, de acordo com o critério estabelecido pela Agência Nacional de Mineração (ANM), como Mineração de Pequena Escala (MPE), cuja produção anual de minério é de até 100 mil toneladas por ano (BRASIL, 2018). Desta forma, o grande peso que as MPE possuem na economia mineral, assim como também suas respectivas responsabilidades sociais, justifica-se um esforço de pesquisa científica aplicada e moldada ao planejamento de lavra às suas realidades. Destarte, a geofísica, como ferramenta auxiliar, colabora com as informações de subsuperfície para que o engenheiro de minas possa validar o modelo conceitual do depósito e, assim, desenvolver um planejamento de lavra que reduza os custos, aumente os lucros e minimize os impactos ambientais causados pelo processo exploratório.

As MPE, normalmente, não possuem recursos financeiros suficientes para investimentos relacionados aos estudos geológicos e geofísicos, culminando muitas vezes em lavras predatórias que não levam em consideração os aspectos ambientais. Essas características tornam as MPE potencialmente geradora de resíduos com desempenho lucrativo insatisfatório,

além de pouco sustentável. O conhecimento insuficiente da geologia de superfície e de subsuperfície aumenta a incerteza geológica que pode afetar consideravelmente toda a cadeia produtiva da mineração.

O presente projeto visa reduzir as incertezas geológicas relacionadas às atividades exploratórias da MPE por meio da aplicação de uma metodologia de análise e interpretação de dados geológicos e geofísicos, com o intuito de caracterizar um depósito de areia de uma mineradora que se encaixa no critério de classificação de uma MPE.

Para a redução da incerteza geológica, a geofísica dispõe importantes métodos de investigação de subsuperfície capazes de enriquecer o conhecimento geológico das estruturas em profundidade.

Diversos autores já demonstraram como a incerteza geológica é o principal fator no processo de tomada de decisões na mineração. Capponi (2020) explica como pequenas variações nas condições de contorno relacionadas às incertezas geológicas podem afetar o projeto de mina como um todo. Shishvan (2016) abordou como as decisões do planejamento de curto prazo são impactadas principalmente pelas incertezas geológicas.

De forma semelhante, estudos anteriores como Tichauer et al. (2020) demonstraram a importância da geofísica como ferramenta auxiliar para a redução das incertezas geológicas para a tomada de decisão do plano de lavra para MPE.

A aplicação da geofísica para exploração mineral já foi abordada por diversos autores, dentre eles: Porsani et al. (2006); Souza (2008), Martins & Elis (2012); Tichauer et al. (op. cit.), dentre outros.

Área de estudo

A área de estudo refere-se a uma mineradora de areia situada na região do município de Leme – SP, distante cerca de 230 quilômetros no sentido noroeste da capital São Paulo (Figura 1). O material industrial extraído é utilizado pelas indústrias de cerâmica, argamassa e de construção civil. A lavra da areia se dá a céu aberto em bancadas. Parte dos sedimentos está situado abaixo do nível freático local, dificultando a realização de sondagens e também da própria extração do material, tendo em vista que é mais dispendioso para o explorador rebaixar o nível d'água para a exploração. Desta forma, a aplicação dos métodos geofísicos fornece informações importantes em termos de profundidade, de espessura e de extensão ao longo da área minerada.

A areia retirada está localizada na borda leste da Bacia do Paraná, onde predomina a Formação Pirambóia (Soares, 1973) do Triássico Médio, pertencente ao Grupo São Bento. A Formação Pirambóia é caracterizada por espessos pacotes de arenitos, muito friáveis, com granulometria que varia entre fina e média, com intercalações de pouca espessura de siltitos e argilitos, localmente conglomeráticos, apresentando estratificações cruzadas de médio a grande porte resultados de um ambiente flúvio-eólico.

A Formação Pirambóia é alvo de diversos estudos cronológicos devido a sua característica como rocha reservatório. Seu contato na base é discordante com a Formação Corumbataí (Caetano-Chang, 2006) e no topo o contato é com a Formação Botucatu de ambiente eólico.



Figura 1 – Mapa de localização da área de estudos.

Método da Eletrorresistividade

O Método da eletrorresistividade (ER) faz uso da corrente alternada de baixa frequência (0,03 a 3 Hz) gerada artificialmente sendo aplicada ao solo por meio de dois eletrodos, de forma que a diferença de potencial seja medida entre outros dois eletrodos, fornecendo, assim, informações das estruturas geológicas de subsuperfície e dos parâmetros físicos dos materiais (Burger et al., 2006). O princípio físico que governa o ER é o fluxo da corrente elétrica por meio de um material. O parâmetro físico estudado é a resistividade elétrica. Os valores de resistividade elétrica podem ser estimados, pois a disposição espacial dos eletrodos é conhecida.

Existem duas principais técnicas para a investigação de subsuperfície usando o método da ER: o Caminhamento Elétrico (CE) e a Sondagem Elétrica Vertical (SEV). O primeiro refere-se a um levantamento 2D em que é medido a variação lateral e vertical da resistividade. O segundo é uma medida pontual 1D em que a variação da resistividade é medida apenas verticalmente.

O método ER é utilizado em exploração mineral, em hidrogeologia principalmente para a caracterização do nível freático em subsuperfície, em estudos contaminação do meio ambiente e em diversas outras

aplicações, de forma que sua aplicação para o atual projeto encontra-se fundamentada pela literatura.

Aquisição e Processamento dos dados

Nesta pesquisa foram realizados sete perfis utilizando o arranjo dipolo-dipolo e com o espaçamento dos eletrodos de corrente e potencial de 5, 10 e 20 metros. Também foram adquiridas duas SEVs com espaçamento AB/2 de 150 metros e com o arranjo Schlumberger. Nesta pesquisa será apresentado um perfil de CE e uma de SEV. Os outros resultados ainda estão sob processamento. A Figura 2 mostra as configurações dos eletrodos utilizadas nesta pesquisa. A aquisição dos dados de eletrorresistividade foi feita com o equipamento Syscal Pro – IRIS Instrument utilizando eletrodos metálicos de acoplamento galvânico.

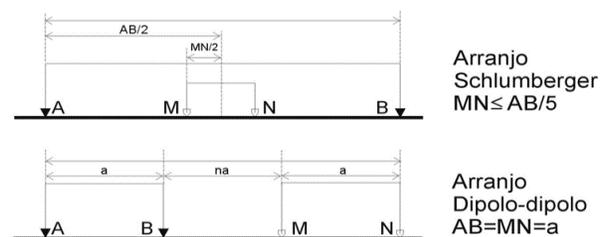


Figura 2 - Configurações dos eletrodos usadas para a aquisição da SEV (acima) e do CE (abaixo). Modificado de Elis et al. (2008).

O pré-processamento dos dados de CE foi realizado com o software PROSYS II – IRIS Instrument e o processamento foi com o software RES2DINV – Geotomo. As principais etapas realizadas no processamento do CE foram: a inserção da topografia, a configuração dos parâmetros de inversão, e o método de inversão. Para os dados de SEV, o processamento foi realizado por meio do software IPI2WIN – Geoscan-M.

Resultados Preliminares

A Figura 3 mostra o resultado com uma interpretação preliminar de um perfil de CE, dipolo-dipolo com espaçamento de 10 metros adquiridos ao longo de uma das bancadas do pit da mina. O modelo foi calculado com um total de 5 iterações e com $RMS = 2,3\%$. O modelo revela camadas aproximadamente paralelas com ausência de estruturas de maior porte. O primeiro horizonte (725 – 715 m), com cerca de 13 metros de espessura, apresenta uma camada de arenito friável homogênea e não saturada, em consonância com o que foi observado em campo. O segundo horizonte, intermediário (715- 705 m), com cerca de 10 metros de espessura, representa um arenito pouco argiloso, sendo a transição para a zona saturada. O último horizonte representa a zona saturada a uma profundidade aproximada de 20 metros.

Importante salientar que a variação da resistividade entre as camadas do topo e da base para o CE apresentado está na ordem de 200 Ohm.m para uma profundidade de investigação de 20 metros. Deste modo, a utilização da escala de cores se torna um importante fator para a interpretação dos dados de CE, tendo em vista que pequenas variações na resistividade podem proporcionar uma mudança abrupta na escala de cores, culminando em uma interpretação errônea do modelo invertido.

A SEV foi realizada na mesma cota do CE e o resultado preliminar de sua inversão é mostrado na Figura 4. O modelo interpretado consiste em uma primeira camada com aproximadamente 3,2 metros de espessura e resistividade de 838 Ohm.m, representando um arenito fino e friável, consistindo de uma zona aerada. A segunda camada possui 5,4 metros de espessura e resistividade de 299 Ohm.m, correspondendo a um arenito fino, pouco argiloso e com maior nível de saturação de água em relação a primeira camada. A terceira camada tem 12 metros de espessura e resistividade de 107 Ohm.m, indicando uma camada de arenito argiloso. A quarta camada representa a zona saturada com resistividade de aproximadamente 64 Ohm.m. Desta forma, a profundidade do nível freático se encontra a 20 metros da superfície para a cota analisada. Este resultado preliminar está em conformidade com o CE realizado na mesma bancada da mina. As interpretações preliminares para as camadas estão em concordância com os furos de sondagens disponibilizados pela mineradora.

A interpretação integrada dos dados de CE e SEV foi calibrada com os furos de sondagens e indica um pacote espesso de arenito relativamente homogêneo que varia em quantidade de água e argila. Outros furos de sondagens mostram pequenas camadas de areia grossa. Essa característica homogênea relacionada à Formação Pirambóia já foi abordada em trabalhos de mapeamento anteriores, porém, a sua continuidade em subsuperfície na área de estudos ainda carece de pesquisas geofísicas.

Os estudos serão complementados com os perfis de GPR (*Ground Penetrating Radar*) e de sondagens TDEM (*Time Domain Electromagnetic Method*) que já foram adquiridos e farão parte da integração dos dados posteriormente.

Conclusões

As inversões dos dados de CE e de SEV, juntamente com os furos de sondagens, permitiram mapear três horizontes no pacote de areia: zona não-saturada, zona de transição e zona saturada. O nível freático foi localizado em ~20 metros de profundidade.

Os resultados preliminares mostraram que a mineração de areia é feita em um pacote relativamente homogêneo de arenito, sendo que as diferenças nos valores de resistividade estão mais associadas ao conteúdo de água no sistema.

A integração com os dados TDEM e GPR permitirá o mapeamento do pacote de arenito do topo até a base, fornecendo informações importantes de subsuperfície que permitirá aos responsáveis do planejamento de lavra elaborar modelo de cava ótima.

Agradecimentos

VHHC agradece à CAPES pela bolsa de pesquisa de mestrado. JLP agradece ao Geólogo Gustavo Isnard Jarussi (Mineração Bom Retiro) e à FAPESP – Fundação de Apoio à Pesquisa no Estado de São Paulo (2020/15796-9) pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa, e ao CNPq (304104/2021-3) pela bolsa de pesquisa. Ao Departamento de Geofísica (IAG-USP) pela infraestrutura necessária para o desenvolvimento desta pesquisa. Aos colegas da Pós-Graduação pela ajuda na aquisição dos dados.

Referências

- Brasil, 2018. Ministério de Minas e Energia. Diagnóstico socioeconômico e ambiental da mineração de pequena escala (MPE) no Brasil: Relatório final. São Paulo. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br>. Acesso em: 15/05/2022.
- Burger, R. H.; Sheehan, F. A. & Jones, H. C., 2006. Introduction to applied geophysics. Norton & Company. 554p.
- Caetano-Chang, M. R. & Wu, F. T., 2006. Arenitos flúvio-eólicos da porção superior da Formação Pirambóia no centro-leste paulista. *Revista Brasileira de Geociências* 36(2): 296-304.
- Capponi, N. L. & Peroni, L. R., 2020. Mine Planning Under Uncertainty. *Insights in Mining Science & Technology* 2(1): 17-25.
- Elis, V. R.; Porsani, L. J; Mendonça, C. A. & Strobino, E., 2008. The use of dipole-dipole soundings in hydrological studies and from residual deposits. *Revista Brasileira de Geofísica* 26(3): 317-325.
- Martins, C. C. & Elis, V. R., 2012. Utilização de métodos Geométricos para auxílio ao planejamento de lavra de pedra de gnaisse. V Simpósio Brasileiro de Geofísica. Sociedade Brasileira de Geofísica. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.341.54>
- Porsani, J. L; Sauck, W. A. & Souza Jr, A. O., 2006. GPR for mapping fractures and as a guide for extraction of ornamental granite from a quarry: a case study from Southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics* 58(3): 177-187.
- Shishvan, S. M. & Benndorf, J., 2016. The effect of geological uncertainty on achieving short-term targets: A quantitative approach using stochastic process simulation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 116(3): 259-264.

Soares, P. C., 1973. O Mesozoico Gondwânico no Estado de São Paulo.. Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, Rio Claro – Sp. Tese de Doutorado. 153p.

Souza, A. M., 2008. Uso do GPR na geração de modelos estáticos 3D para o planejamento de lavra de minerais pesados depositados em dunas eólicas. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Dissertação de Mestrado. 123p.

Tichauer, R.; Martins, A. C.; Silva, S. S. & De Tomi, G., 2020. The role of geophysics in enhancing mine planning decision-making in small-scale mining. Royal Society Open Science 7:200384.

CE 01

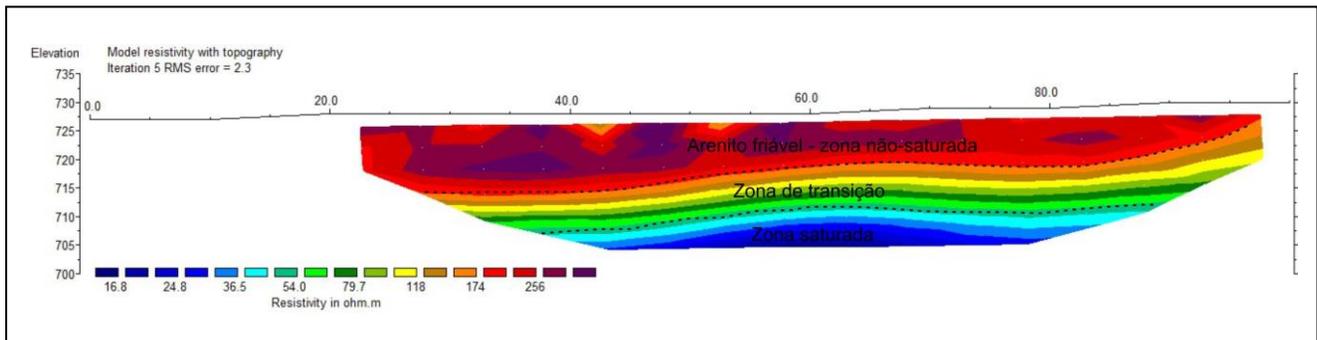


Figura 3 - Modelo de resistividade obtido pela inversão para um perfil de CE, dipolo-dipolo e espaçamento de 10 metros entre os eletrodos com a interpretação preliminar sobreposta, chegando a zona saturada em 20 metros.

SEV 01

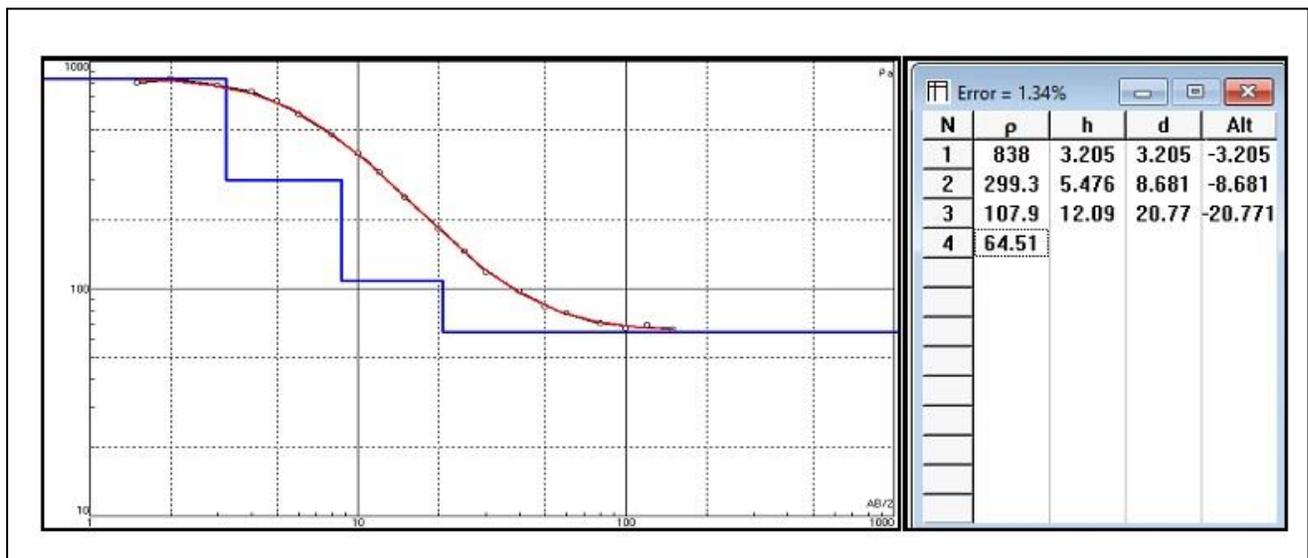


Figura 4 - Modelo de resistividade para a SEV, arranjo Schlumberger, espaçamento AB/2 de 150 metros. Interpretação preliminar indica um modelo de quatro camadas. A primeira representando um arenito friável pouco saturado; a segunda, um arenito pouco argiloso, seguido por um arenito mais argiloso e saturado, chegando a zona saturada a uma profundidade de aproximadamente 20 metros. Furos de sondagens corroboram com a interpretação. N = camada; ρ = resistividade; h = espessura da camada; d = profundidade da camada. RMS = 1,34 %.