



Investigações Geoelétricas em mineração de mármore ornamental na região de Campos do Jordão, SP - Resultados preliminares

Nathália de Souza Penna (USP), Jorge Luís Porsani (USP), Victor Hugo Hott (USP), Marcelo Cesar Stangari (USP), Ícaro Augusto Pachêco (USP), Nicolas Correa de Oliveira (USP) e Conrado Carvalho Braz de Faria Sousa (Mineração Correa LTDA)

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 4 a 6 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

Nesse trabalho, o método de Eletorresistividade é utilizado para caracterizar um depósito de mármore explorado por uma Mineração de Pequena Escala (MPE), localizada em Campos do Jordão, São Paulo, Brasil. Os dados de resistividade foram adquiridos a partir de Caminhamento elétrico e Sondagem elétrica vertical (SEV). Os perfis de Caminhamento elétrico foram adquiridos a partir do arranjo Dipolo-dipolo e a SEV com o arranjo Schlumberger. Os resultados preliminares demonstram a eficiência do método de Eletorresistividade em mapear descontinuidades e contatos geológicos. Os contrastes de resistividade viabilizaram localizar o mármore. Informações de furo de sondagem corroboraram a interpretação dos modelos geoelétricos.

Introdução

A Mineração de Pequena Escala (MPE) compreende uma parcela significativa das minerações no Brasil. Segundo o Relatório do Diagnóstico Socioeconômico e Ambiental da MPE, publicado por Brasil (2018), cerca de 86% das minas nacionais correspondem à MPE. Conforme destacado nesse relatório do Ministério de Minas e Energia (MME), a MPE é caracterizada, sobretudo, pelo elevado nível de informalidade associado à execução da atividade exploratória, pela aplicação de técnicas de exploração predatórias, utilização de equipamentos com baixo nível tecnológico, recursos financeiros limitados e ausência de investimentos em pesquisas voltadas para caracterização geológica.

O elevado nível de incerteza geológica, decorrente da ausência de pesquisas voltadas para caracterização do depósito mineral, aumenta o risco de investimentos em empreendimentos de MPE. Além disso, a falta de informações geológicas contribui para baixa produtividade que caracteriza esse segmento da mineração, acarreta elevação nos custos de produção e maximiza a geração de resíduos decorrentes da atividade exploratória.

A caracterização geológica do depósito mineral deve orientar a extração do bem mineral. A aplicação de métodos geofísicos na exploração mineral consiste em um recurso que auxilia otimizar a produção. A Geofísica

viabiliza a obtenção de modelos geológicos acurados, portanto, a partir de tais modelos torna-se possível identificar estruturas de interesse em subsuperfície. A integração dos dados geológicos e geofísicos permite estabelecer limites estruturais e estimar a extensão do depósito, contribui para redução de gastos com métodos diretos de investigação geológica (por exemplo, furos de sondagens) e possibilita o desenvolvimento de um plano de exploração e administração de mina mais estratégico.

Referente à exploração de rochas ornamentais, têm-se que o rendimento das pedreiras normalmente é baixo: o percentual de rocha útil compreende apenas cerca de 20% do volume total de rochas extraídas (Martínez et al., 2017; Jalalian et al., 2021). Além disso, o valor atribuído aos blocos é associado à composição das cores e a homogeneidade textural e estrutural das rochas.

O método geoelétrico é um método geofísico que permite investigar até dezenas de metros em subsuperfície e possibilita a identificação de alternâncias litológicas, nível d'água e descontinuidades (fraturas, cavidades, etc) (Kearey et al., 2009; Martínez et al., 2017, Tichauer et al., 2020). A identificação de zonas fraturadas permite otimizar a extração dos blocos de rochas, direcionar a exploração para rochas sãs (mais homogêneas) e, assim, pode contribuir para melhorar a produtividade da mina, aumentar a qualidade dos produtos explorados e diminuir a quantidade de resíduos gerados.

O objetivo da pesquisa cujos resultados preliminares serão descritos nesse trabalho consiste em utilizar o método de Eletorresistividade para caracterizar um depósito de rochas ornamentais (mármore) e integrar os dados geológicos/geofísicos para obter um modelo estrutural 3D do depósito. A área de estudo consiste em uma pedreira de mármore localizada nas propriedades de uma MPE na cidade de Campos do Jordão, São Paulo. Os dados de resistividade foram adquiridos a partir das técnicas de caminhamento elétrico (CE) e sondagem elétrica vertical (SEV).

Área de Estudo

A área de estudo faz parte do chamado Planalto de Campos do Jordão, um planalto cristalino localizado a leste de São Paulo e sul de Minas Gerais, na porção sudoeste do bloco principal da Serra da Mantiqueira (Hiruma, 1999). A partir de São Paulo, o acesso à área ocorre pelas rodovias Ayrton Senna/Carvalho Pinto, em seguida pela Rodovia Floriano Peixoto (SP-123) e por fim, a estrada vicinal chamada Estrada de São Roque, que leva até a

mina de mármore pertencente à Mineração Correa (Figura 1).

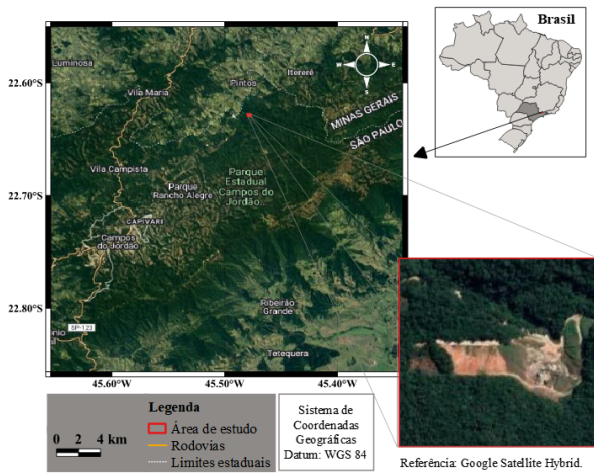


Figura 1 – Localização da área de estudo.

Segundo Trouw et al. (2020), no contexto regional, a área estudada está inserida no chamado Terreno Embu, um compartimento tectônico que apresenta uma forma alongada na direção NE-SW, ao sul da Nappe Socorro-Guaxupé. O Terreno Embu compreende embasamento Paleoproterozoico, intrudido por granitos e cobertura metassedimentar composta por biotita gnaisses/xistos, quartzitos, rochas cálcico-silicato e mármore (Fernandes et al.,1990; Trouw et al.,2013).

Método de Eletorresistividade

A obtenção de informações sobre a geologia em subsuperfície a partir do método de Eletorresistividade é pautada na transmissão, a partir do solo, de correntes elétricas artificialmente geradas e na realização de medidas de diferenças de potencial em pontos na superfície. Esse método permite mapear a distribuição de resistividade em subsuperfície e destaca-se pelo baixo custo associado à aquisição, bem como, pela eficiência demonstrada em estudos de diferentes naturezas: estudos hidrogeológicos, investigações de contaminação ambiental, exploração mineral e outros.

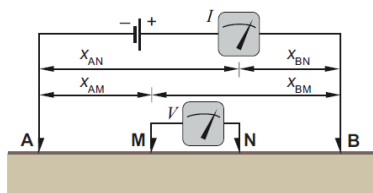


Figura 2 – Ilustração de eletrodos de corrente (A e B) e potencial (M e N). Fonte: Dentith e Mudge (2014).

O contraste entre as propriedades elétricas dos materiais em subsuperfície possibilita individualizar horizontes geológicos e outras estruturas de interesse (zonas saturadas, fraturas, etc). Para obter informações sobre

as propriedades elétricas dos materiais em subsuperfície, o método de Eletorresistividade utiliza no mínimo dois pares de eletrodos (Figura 2). Um par de eletrodos é utilizado para injetar uma corrente alternada e o outro par consiste nos pontos nos quais são realizadas as medidas de diferença de potencial. Os valores de diferença de potencial (ΔV) são convertidos para valores de resistividade aparente (ρ_a) a partir da seguinte expressão, derivada a partir da Lei de Ohm (Kearey et al.,2009; Dentith e Mudge, 2014):

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k, \tag{1}$$

onde I é a corrente elétrica e k é o chamado Fator geométrico, definido em função das distâncias relativas entre os eletrodos de corrente e potencial (Figura 2):

$$k = \left(\frac{2\pi}{\frac{1}{x_{AM}} - \frac{1}{x_{BM}} - \frac{1}{x_{AN}} + \frac{1}{x_{BN}}} \right). \tag{2}$$

O conceito de Resistividade aparente destaca que os valores de potencial medidos em superfície, e consequentemente, as resistividades calculadas a partir desses, provavelmente não são associados a um único meio/material, mas sim, representativos de um certo volume heterogêneo do espaço por onde as correntes elétricas passaram.

Uma vez que, a Terra é heterogênea, a resistividade obtida durante a aquisição é função da posição relativa entre os eletrodos (k) e pode ser compreendida como uma resistividade média associada ao volume de material rochoso no intervalo de profundidade investigado em subsuperfície. A conversão dos valores de resistividade aparente em valores de resistividade é realizada a partir do processo de inversão de dados, ou seja, a partir do ajuste dos valores de resistividade aparente observados em campo aos valores calculados a partir de um modelo matemático.

Aquisição e Processamento dos dados

Os dados de resistividade foram adquiridos a partir de duas técnicas: Caminhamento elétrico (CE) e Sondagem elétrica vertical (SEV). Os perfis de caminhamento elétrico permitem investigar as variações laterais e verticais da resistividade. Enquanto que, as SEVs são voltadas para investigação pontual (1D) das variações verticais da resistividade. O arranjo de eletrodos utilizados durante a aquisição dos perfis de Caminhamento elétrico consistiu no arranjo Dipolo-dipolo. Já na SEV, o arranjo utilizado foi o arranjo Schlumberger.

A aquisição de dados foi realizada com eletrodos metálicos e com o equipamento Syscal Pro, desenvolvido por IRIS Instrument. O software RES2DINV, desenvolvido por Geotomo Software, foi utilizado para fazer a inversão dos dados de resistividade aparente dos perfis 2D de Caminhamento elétrico. Para a inversão da curva de resistividade da SEV, foi utilizado o software IPI2WIN, desenvolvido por Geoscan-M LTDA.

A Figura 3 apresenta o mapa da área de estudo com a localização das linhas de Caminhamento elétrico e a SEV cujos dados de resistividade foram invertidos.

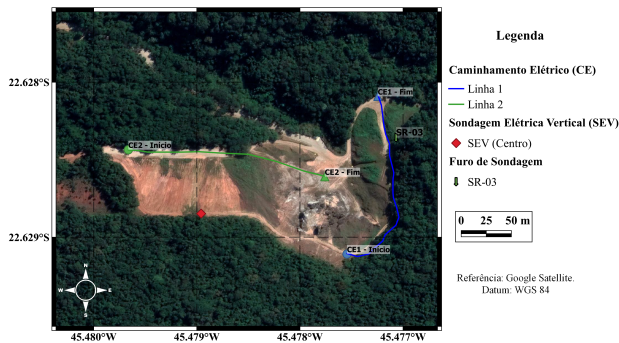


Figura 3 – Localização das linhas de Caminhamento Elétrico e da SEV na área de estudo.

Os perfis de caminhamento elétrico possuem 200 m de comprimento e foram adquiridos com espaçamentos AB (eletrodos de corrente) de 10 m e 20 m. Como pode ser observado na Figura 3, o perfil de caminhamento elétrico denominado de Linha 1 possui direção Sul - Norte, enquanto que, a chamada Linha 2 possui direção Oeste - leste.

Os dados de resistividade adquiridos com os espaçamentos AB de 10 m e 20 m foram invertidos simultaneamente. Os modelos de resistividade obtidos a partir da inversão são apresentados nas figuras 4 e 5. Como pode ser observado nessas figuras, dados de topografia foram adicionados aos modelos.

Próximo à Linha 1, há o furo de sondagem SR-03 (ver Figura 3). As informações geológicas fornecidas pela mineradora a respeito desse furo de sondagem foram utilizadas para orientar a interpretação dos resultados obtidos a partir da inversão dos perfis de caminhamento elétrico. A Tabela 1 apresenta as informações associadas ao furo de sondagem SR-03.

Profundidade (m)	Descrição da sondagem
0 a 1,00	Solo
1,00 a 3,20	Gnaiss leucocrático
3,20 a 26,40	Gnaiss migmatizado
26,40 a 80,00	Mármore

Tabela 1 – Informações do Furo de sondagem SR-03.

Na aquisição dos dados da Sondagem elétrica vertical, o espaçamento máximo entre os eletrodos de corrente foi 300 m ($AB/2 = 150$ m).

Resultados e Discussão

A Figura 4 apresenta o modelo resultante da inversão dos dados de resistividade da Linha 1. Esse modelo foi obtido após a quinta iteração no software RES2DINV e

apresenta um Erro quadrático médio (RMS) de 19,8%. A geologia da área de estudo é complexa, uma vez que, a origem do Terreno Embu é associada a eventos colisionais/acrecionários que culminaram na formação do embasamento da Plataforma Sul-Americana (Brito Neves et al., 1999; Campos Neto, 2000) e, como já mencionado, compreende rochas de diferentes naturezas. Essa complexidade geológica é refletida no modelo invertido da Linha 1: o RMS elevado deve-se ao grande contraste de resistividades elétricas observados em subsuperfície.

Apesar do erro associado à inversão dos dados da Linha 1 ser elevado, o modelo obtido apresenta excelente correlação com as informações do furo de sondagem SR-03 (ver Tabela 1 e Figura 4). Portanto, as informações desse furo ratificam a interpretação geológica dos dados de resistividade desse perfil, sobretudo, a associação do horizonte de mais elevada resistividade à ocorrência de mármore.

Ainda a respeito da Linha 1, vale destacar que os contrastes de resistividade observados no modelo sugerem a ocorrência de zonas fraturadas e insinuam que blocos de mármore mais homogêneos podem ser obtidos em torno das posições de 70 m e 200m. Como pode ser notado na Figura 4, a profundidade do topo da camada de mármore é irregular ao longo do perfil.

O modelo de resistividade invertido para a Linha 2 é apresentado na Figura 5. Nesse modelo, verifica-se um menor contraste de resistividades e o Erro quadrático médio (RMS) obtido após a sexta iteração foi de apenas 3,4%. Com base na associação das informações geológicas e geofísicas disponíveis, infere-se que o perfil da Linha 2 compreende uma camada de solo com espessura média em torno de 5m, seguida por uma camada espessa, possivelmente, de gnaisses com diferentes graus de fraturamento. Em torno da posição de 160 m, em uma profundidade de aproximadamente 25 m, o modelo de resistividade da Linha 2, apresenta uma gradação para um horizonte de maior resistividade. Como nessa região, o modelo 2D não viabiliza investigar profundidades além de, aproximadamente, 35 m, para averiguar a ocorrência de um corpo rochoso mais resistivo, ou seja, a possibilidade de ser mármore, é necessário dispor de mais informações geofísicas e/ou geológicas.

Referente à SEV, essa foi realizada em um ponto situado em uma estrada com direção paralela a chamada Linha 2 (ver Figura 3). A curva e a tabela com os valores de resistividade obtidos após a inversão são apresentados na Figura 6. O Erro quadrático médio obtido para um modelo com seis camadas foi 6,92%.

Os resultados da SEV sugerem que no ponto investigado há uma camada de solo com espessura em torno de 0,5 m, seguida por um horizonte com elevada resistividade (em torno de 3500 Ohm.m). A alta resistividade, associada à espessura de dezenas de centímetros desse segundo horizonte, sugere a ocorrência de um matacão de natureza cristalina. Após esse horizonte muito resistivo, o modelo invertido propõe dois horizontes de resistividade inferiores (391 Ohm.m e 151 Ohm.m, respectivamente). Com base nas informações já discutidas a respeito da geologia local, pode-se inferir que esses dois horizontes consistam em

uma única camada de rocha (gnaisse, provavelmente) com diferentes níveis de fraturamento. O quinto horizonte apresenta espessura de aproximadamente 17 m e estende-se até uma profundidade em torno de 35 m. Tal horizonte destaca-se pela acentuada resistividade (4671 Ohm.m) e assim, possivelmente, está associado à ocorrência de mármore. O sexto horizonte apresenta uma resistividade muito baixa (10 Ohm.m). A alta condutividade desse último horizonte que compõe o modelo 1D de resistividade sugere saturação em água.

No contexto da exploração mineral, mapear o nível freático é muito importante, sobretudo porque, a mineração em zonas saturadas pode gerar danos socioambientais e econômicos. A água é um recurso essencial à vida, por isso, o setor da mineração precisa implementar um sistema de gestão consciente desse recurso.

Esses resultados preliminares demonstram a capacidade do método de Eletroresistividade em caracterizar o depósito de mármore. Por isso, para complementar os dados geofísicos e obter um modelo geológico acurado para o depósito, mais perfis de caminhamento elétrico e SEVs foram adquiridos e serão invertidos.

Dados de perfis GPR (Radar de Penetração no solo) e sondagens realizadas com o TDEM (Método Eletromagnético no domínio do tempo) também foram adquiridos e serão integrados ao estudo.

Conclusões

Os resultados preliminares da pesquisa são promissores e destacam a eficiência do método de Eletroresistividade em auxiliar na caracterização do depósito de mármore.

Os perfis de caminhamento elétrico e a curva da SEV viabilizaram mapear contrastes de resistividade em profundidades em torno de 50 m e 30 m, respectivamente. Os modelos de resistividade invertidos e interpretados são corroborados pelas informações geológicas da área estudada.

Os dados de resistividade viabilizaram a localização de corpos de mármore, bem como, a identificação de possíveis zonas de fraturamento e nível d'água. Assim, os resultados evidenciam como a geofísica pode contribuir para tornar a Mineração de pequena escala (MPE) em um empreendimento mais produtivo e sustentável.

Agradecimentos

Nathália de Souza Penna agradece à CAPES pela bolsa de pesquisa de mestrado que viabilizou o desenvolvimento da pesquisa. Jorge Luís Porsani agradece à Mineração Correa Ltda e à FAPESP-Fundação de Apoio à Pesquisa no Estado de São Paulo (2020/15796-9) pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa, bem como, ao CNPq (304104/2021-3) pela bolsa de pesquisa. Agradecemos também ao Eng. de Minas Conrado Carvalho Braz de Faria Sousa pelo apoio logístico e operacional. Ao Departamento de Geofísica (IAG/USP) pela infraestrutura necessária para o desenvolvimento desta pesquisa e aos alunos da Graduação e da Pós-

Graduação pela ajuda na aquisição dos dados.

Referências

- Brasil, 2018. Ministério de Minas e Energia. Diagnóstico socioeconômico e ambiental da mineração em pequena escala (MPE) no Brasil: Relatório final. São Paulo. Disponível em: <<http://antigo.mme.gov.br//documents/20182/d24586f3-bb15-9a72-3b94-693a9ab9b69a>>. Acesso em: 27/03/2022, 17h17.
- Brito Neves, B. B., Campos Neto, M. C., Fuck, R. A. 1999. From Rodinia to Western Gondwana, approach to the Brasiliano Pan african Cycle and orogenic collage. *Episodes*, 22:155-166.
- Campos Neto, M., 2000. Orogenic systems from Southwestern-Gondwana: an approach to Brasiliano-Pan African cycle and orogenic collage in southeastern-Brazil. In: THOMAZ FILHO, Antonio; CAMPOS, Diógenes de Almeida (ed.). *Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, p. 335-365.
- Dentith, M., Mudge, S. T., 2014. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.
- Fernandes A.J., Campos Neto M.C., Figueiredo M.C.H., 1990. O complexo Embú no leste do estado de São Paulo: limites e evolução geológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, 1990, Natal, SBG, v. 6, p. 2755-2763.
- Jalalian, M. H., Bagherpour, R., Khoshouei, M., 2021. Wastes production in dimension stones industry: resources, factors, and solutions to reduce them. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 1-13.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2009. *Geofísica de exploração: Tradução Maria Cristina Moreira Coelho*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Hiruma, S. T., 1999. *Neotectônica no Planalto de Campos do Jordão, São Paulo*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Dissertação de Mestrado.
- Martínez, J., Montiel, V., Rey, J., Cañadas, F., Vera, P., 2017. Utilization of integrated geophysical techniques to delineate the extraction of mining bench of ornamental rocks (Marble). *Remote Sensing*, 9(12), 1322.
- Tichauer, R. et al., 2020. The role of geophysics in enhancing mine planning decision-making in small-scale mining. *Royal Society open science*, v. 7, n. 7, p. 200-384.
- Trouw, R.A.J. et al., 2013. A new interpretation for the interference zone between the Southern Brasília belt and the central Ribeira belt, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, Amsterdam, v. 48, p. 43-57.
- Trouw, R. A. J. et al., 2020. *Geologia e recursos minerais da folha Campos do Jordão SF. 23-YBV, estados de Minas Gerais e São Paulo*. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/17707>>. Acesso em: 27/03/22, 17h44.

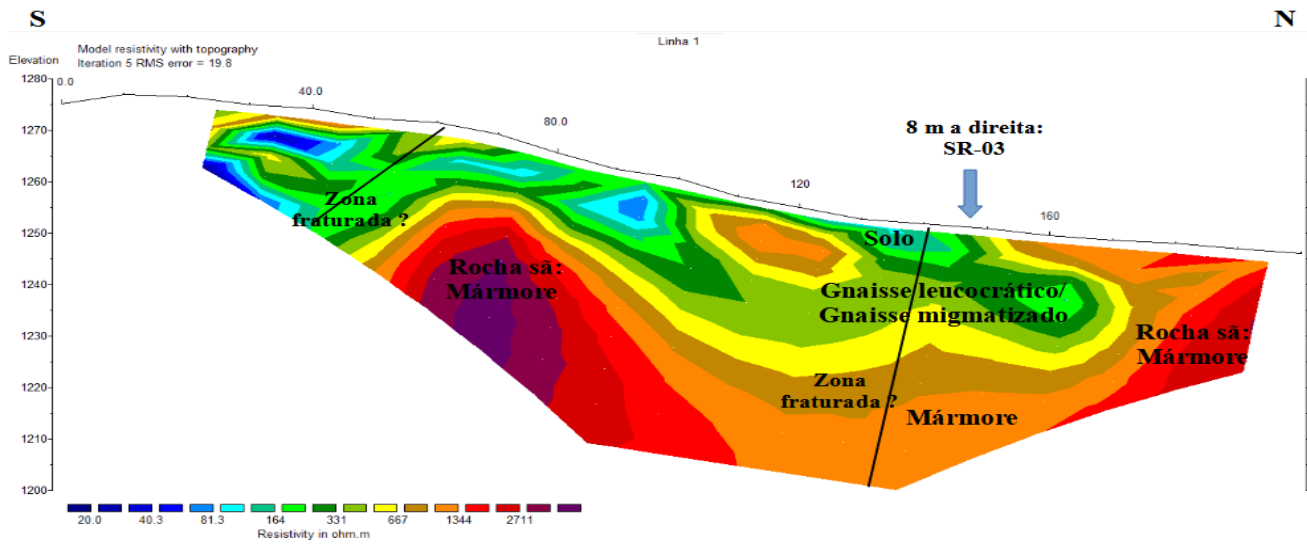


Figura 4 – Modelo invertido e interpretação preliminar da Linha 1.

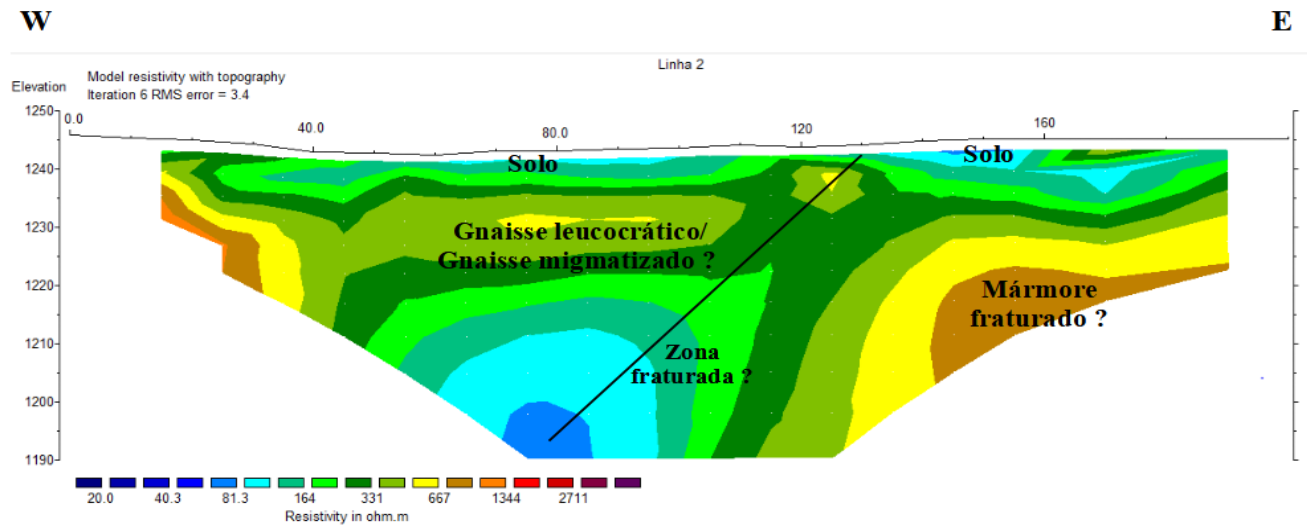


Figura 5 – Modelo invertido e interpretação preliminar da Linha 2.

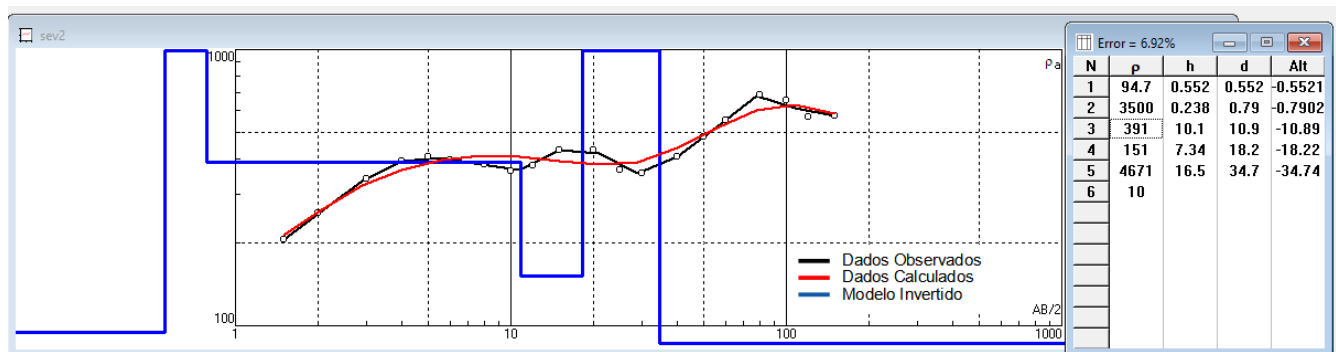


Figura 6 – Resultado da inversão da curva de resistividade da SEV.