

ENSAIOS GEOFÍSICOS DE ELETRORRESISTIVIDADE E SÍSMICA DE REFRAÇÃO PARA CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA VISANDO A IMPLANTAÇÃO DE UM TÚNEL

Diego Daniel Silva¹; André de Sousa Pires²; Rodolfo Pedroso Garcia³

Resumo – Os ensaios geofísicos de eletroresistividade e sísmica de refração foram realizados para apoiar a caracterização geológico-geotécnica na implantação de um túnel. A eletroresistividade permitiu distinguir variações nos materiais subterrâneos, identificando zonas saturadas (baixa resistividade) e zonas insaturadas ou rochas mais coesas (alta resistividade). Já a sísmica de refração forneceu dados sobre a rigidez e coesão dos materiais, diferenciando solos superficiais, rochas intemperizadas e rocha sã. O estudo também apontou possíveis impactos da presença de um túnel pré-existente na área, refletidos em alterações na resistividade e nas velocidades sísmicas. A integração dos métodos geofísicos contribuiu para uma melhor compreensão das condições do subsolo, auxiliando no planejamento da obra e na identificação de áreas de maior risco geotécnico.

Abstract – Geophysical surveys using electrical resistivity and seismic refraction were conducted to support the geological and geotechnical characterization for tunnel construction. Electrical resistivity helped distinguish subsurface material variations, identifying saturated zones (low resistivity) and unsaturated zones or more cohesive rocks (high resistivity). Seismic refraction provided data on material stiffness and cohesion, differentiating surface soils, weathered rock, and fresh rock. The study also indicated potential impacts of a pre-existing tunnel in the area, reflected in changes in resistivity and seismic velocities. The integration of geophysical methods enhanced the understanding of subsurface conditions, aiding in project planning and the identification of higher geotechnical risk areas.

Palavras-Chave – Eletroresistividade; sísmica; túnel; geotecnia.

¹ Geól., MSc, Geo Supply Soluções Geológicas Tal, (11) 99326-3886, diego.silva@geosupply.com.br

² Geól., MSc, Geo Supply Soluções Geológicas Tal, (11) 99175-2564, andre.pires@geosupply.com.br

³ Geól., MSc, Geo Supply Soluções Geológicas Tal, (31) 99146-3797, rodolfo.pedroso@geosupply.com.br

1. INTRODUÇÃO

Na etapa de investigação preliminar de um projeto de engenharia, é comum utilizar métodos diretos, como sondagens, para obter informações detalhadas do subsolo. No entanto, essas sondagens frequentemente possuem grandes espaçamentos, o que limita a resolução espacial da investigação. Além disso, fatores como restrições ambientais e dificuldades de acesso podem dificultar a execução de sondagens em grande escala. Diante dessas limitações, a aplicação de métodos indiretos, como os geofísicos, torna-se uma alternativa viável para ampliar a compreensão das condições subsuperficiais de forma eficiente e com menor custo.

A geofísica tem se consolidado como uma ferramenta essencial na caracterização geológico-geotécnica, combinando baixo custo com resultados técnicos satisfatórios. Dentre os métodos disponíveis, destacam-se a eletrorresistividade e a sísmica de refração, que permitem a identificação de variações no meio geológico com base em suas propriedades físicas. A eletrorresistividade fornece informações sobre a condutividade elétrica dos materiais, permitindo diferenciar zonas saturadas e insaturadas, além de auxiliar na identificação de estruturas geológicas relevantes para o projeto. Já a sísmica de refração baseia-se na propagação de ondas sísmicas e possibilita a estimativa da rigidez e coesão dos materiais subterrâneos, sendo amplamente utilizada para determinar a profundidade do manto de intemperismo e delimitar interfaces entre diferentes formações geológicas.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização e malha geofísica

A Figura 1 exibe o mapa de localização da área, destacando a posição dos ensaios geofísicos, além dos traçados do túnel existente e do planejado para implantação.

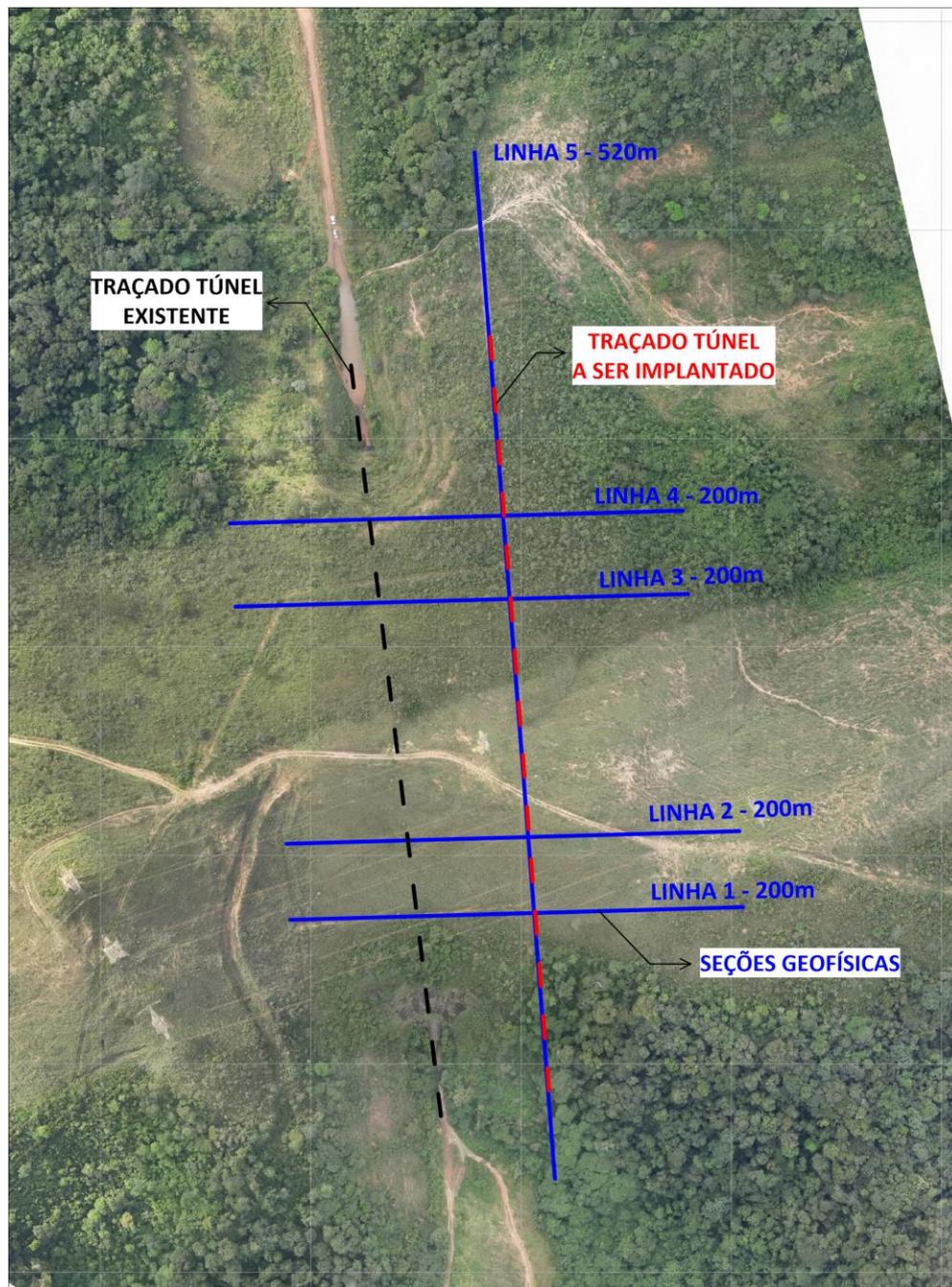


Figura 1. Localização da área de estudo e malha geofísica.

2.2. Metodologia

A eletrorresistividade investiga a distribuição da resistividade elétrica no subsolo, sendo amplamente utilizada no mapeamento de plumas de contaminação. O método baseia-se na injeção de corrente elétrica no solo por um par de eletrodos e na medição da diferença de potencial por outro par, permitindo a determinação da resistividade (Telford et al., 1990). Fatores como porosidade, grau de saturação e concentração de sais dissolvidos na água e solo influenciam esse parâmetro.

O imageamento elétrico permite identificar variações laterais de resistividade, sendo útil na implantação de túneis para detectar zonas de fragilidade, presença de água ou materiais que possam influenciar a estabilidade da escavação. A técnica envolve a aquisição de dados ao longo de perfis, permitindo a construção de seções de resistividade. Neste estudo, utilizou-se o arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento entre eletrodos de 10 metros, com cabos multi-eletrodos.

A refração sísmica é uma técnica geofísica que utiliza ondas sísmicas geradas por uma fonte de energia, como uma marreta, para investigar o subsolo. As ondas de compressão (ondas P) viajam através das camadas rochosas, e seus tempos de percurso são registrados por sensores (geofones) instalados no solo. A partir dessas medições, é possível inferir as propriedades físicas do subsolo, como velocidade, profundidade e características das camadas geológicas.

Para as aquisições de campo, os geofones foram dispostos com espaçamento de 5 metros, e as fontes sísmicas foram disparadas a cada 57,5 metros ao longo do spread. Para a geração das ondas sísmicas, utilizou-se uma fonte sísmica ativa, com golpes de uma marreta de 8kg sobre uma placa metálica. A cada disparo, foram realizados 5 tiros no local para melhorar a relação sinal-ruído.

Para a interpretação do comportamento das ondas P no meio, foi utilizada a Tabela 1, propostas por Souza et. al 1998.

Tabela1: Correlação entre a velocidade de propagação de ondas (V_p) em diferentes materiais.

Velocidade V_p (m/s)	Tipo de Materiais
200 – 400	Solos, depósitos superficiais de sedimentos não consolidados.
400 - 1.400	Argilas e Areias não consolidadas.
1.400 - 1.800	Areias saturadas, argilas compactas, rochas bastante alteradas.
1.800 - 2.400	Sedimentos consolidados e provavelmente saturados, rochas metamórficas ou ígneas, rochas altamente fraturadas e ou alteradas, arenito e folhelhos.
2.400 - 3.700	Folhelhos, arenitos, rochas ígneas e metamórficas alteradas e fraturadas.
4.700 - 5.500	Rochas ígneas e metamórficas fracamente alteradas e fraturadas.
5.500 - 6.000	Rochas ígneas e metamórficas sãs e não fraturadas.

2.3. Contextualização geológica

A área de estudo encontra-se na porção leste da Região Metropolitana de Belo Horizonte, apresentando uma grande diversidade de rochas e coberturas sedimentares. O arcabouço geológico da região é composto por complexos granito-gnáissicos de idade mesoarqueana, representados pelos Complexos Belo Horizonte e Caeté, seguidos por uma sequência do tipo greenstone belt datada do meso/neoarqueano, conhecida como Supergrupo Rio das Velhas. Sobre o embasamento gnáissico e o cinturão metamórfico, ocorrem unidades proterozóicas, incluindo os Supergrupos Minas, Espinhaço e São Francisco, além de coberturas fanerozóicas.

Segundo Cavalcanti et al. 2020, a área de estudo encontra-se geologicamente sobre rochas do Supergrupo Rio das Velhas, mais especificamente sobre o Grupo Nova Lima (Figura 2).

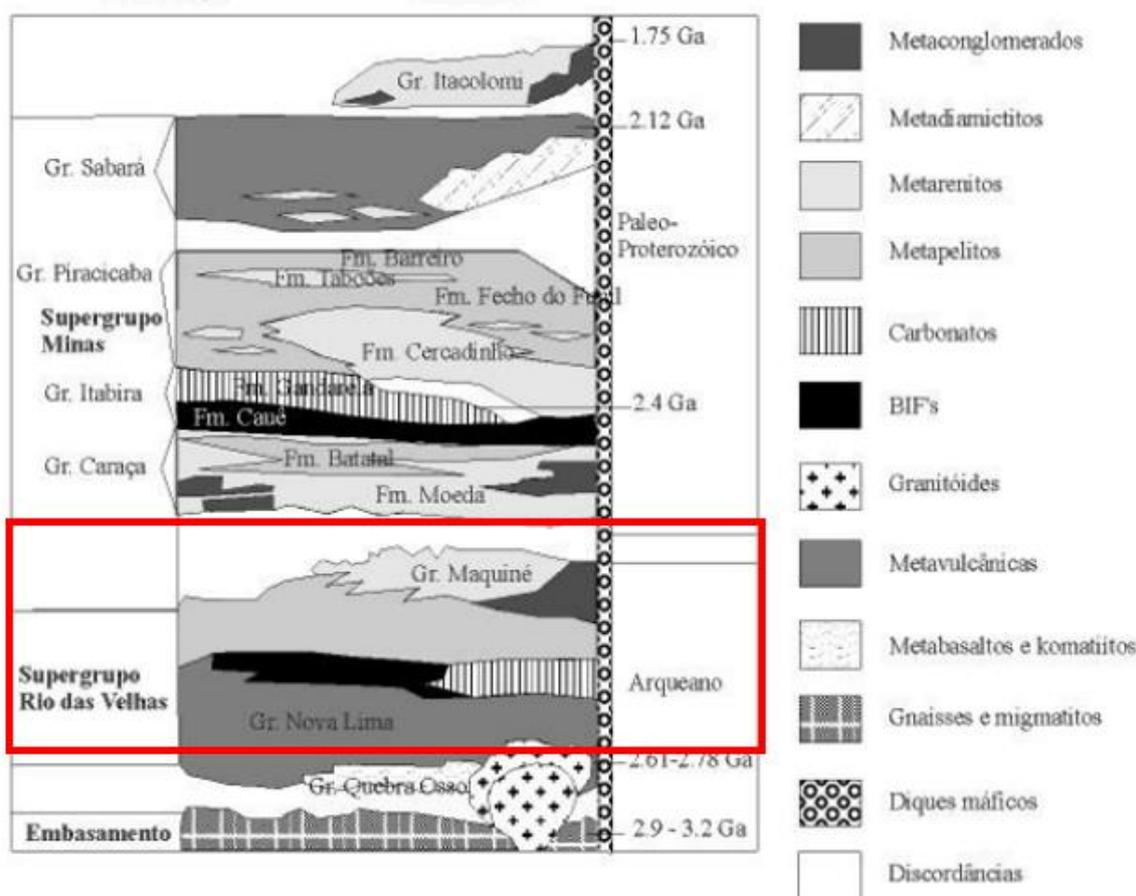


Figura 2. Coluna estratigráfica (Alkmim & Marshak (1998).

O Supergrupo Rio das Velhas, classificado como um greenstone belt (Almeida, 1976; Dorr II, 1969), é formado por rochas metassedimentares e metavulcânicas. Ele é subdividido em dois grupos: o Grupo Nova Lima, na base, e o Grupo Maquiné, que o sobrepõe. Essa divisão se baseia em uma discordância angular entre as duas unidades.

As rochas do Grupo Nova Lima apresentam caráter vulcano-sedimentar, com uma composição vulcânica que inclui komatiitos com textura spinifex (Schorscher, 1978), basaltos toleíticos, vulcânicas félsicas e vulcanoclásticas. As rochas de origem sedimentar compreendem xistos cloríticos a grafitosos, filitos, metagrauvascas e quartzitos de natureza clástica, além de sedimentos químicos, como formações ferríferas bandadas.

Segundo a Folha Nova Lima (CPRM, 2020), a área de estudo está sobre as rochas da Formação Mestre Caetano, pertencente ao Grupo Nova Lima, apresentando intercalações rítmicas de rochas metavulcanoclásticas de natureza pelítica e psamítica.

3. RESULTADOS GEOFÍSICOS

3.1. Eletrorresistividade

Os dados adquiridos nas seções geofísicas permitiram a diferenciação de zonas com baixos, intermediários e altos valores de resistividade, variando de 10 a 40.000 ohms.m. A análise das seções indicou a presença das seguintes características:

A interpretação das seções geofísicas permitiu identificar as seguintes feições:

- Zona Saturada: Associada a baixos valores de resistividade (10 a 400 ohms.m), caracterizando camadas aquosas ou aquíferos saturados. Essas zonas possuem alta condutividade elétrica devido à presença de água, e podem indicar locais com maior retenção de água no solo;

- Zona Insaturada: Relacionada a altos valores de resistividade (acima de 2000 ohms.m), indicando solos ou rochas não saturados. Esse tipo de material, devido à menor presença de água, apresenta maior resistência ao fluxo elétrico, podendo influenciar na capacidade de infiltração e retenção hídrica;

- Estrutura Geológica: Associada a feições verticalizadas de baixos valores de resistividade. Estruturas geológicas podem exibir variações significativas na resistividade, resultando em valores de resistividade diferentes do meio circundante;

Valores intermediários de resistividade podem indicar uma combinação de características intermediárias entre as condições de alta e baixa resistividade.

O túnel presente na área estudada foi analisado nas seções geofísicas de eletrorresistividade, que indicaram variações nos valores de resistividade.

Para a interpretação de galerias/túneis em seções geofísicas de eletrorresistividade, necessita-se de muita atenção. Na presença de galerias preenchidas por materiais argilosos ou água, esses trechos tornam-se menos resistentes e com boa condutividade elétrica, entretanto, caso a galeria esteja preenchida por ar, não permitindo a condutividade elétrica, o local torna-se altamente resistivo.

As seções de eletrorresistividade realizadas sobre o túnel apresentaram baixos valores de resistividade, que podem ser causados pelo acúmulo de água, resultando em retenção de água e aumento da saturação no solo ou rocha. Além disso, o revestimento do túnel como argilas ou concreto degradado, pode facilitar a condução elétrica, gerando uma anomalia de baixa resistividade, contrastando com o meio mais resistivo ao redor (Figura 4).

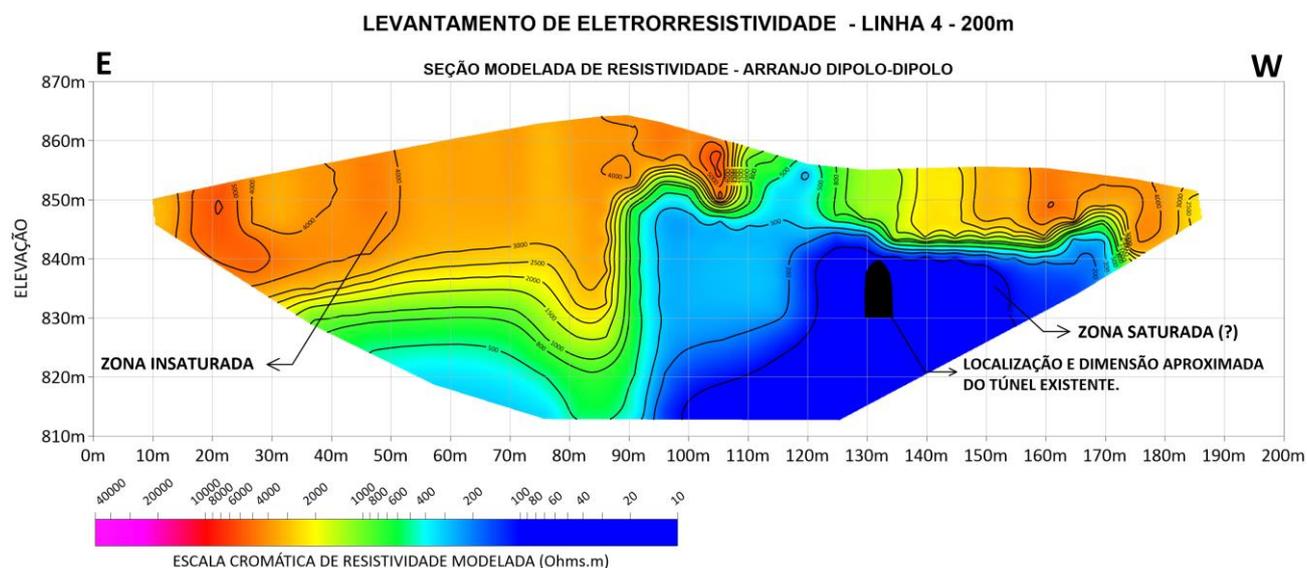


Figura 4. Seção de eletrorresistividade com suas respectivas interpretações.

A seção modelada da Linha 5, executada ao longo do alinhamento do túnel a ser implantado, apresenta contrastes significativos de resistividade (Figura 5). Os altos valores de resistividade em profundidade estão associados a zonas insaturadas, como maciço rochoso ou rocha sã sem fraturas, e em superfície a um capeamento de solo insaturado. Já os baixos valores de resistividade indicam zonas saturadas, com fraturas ou rocha alterada preenchida por água ou argilas. Foi interpretada uma possível estrutura geológica entre as estacas 200m e 210m.

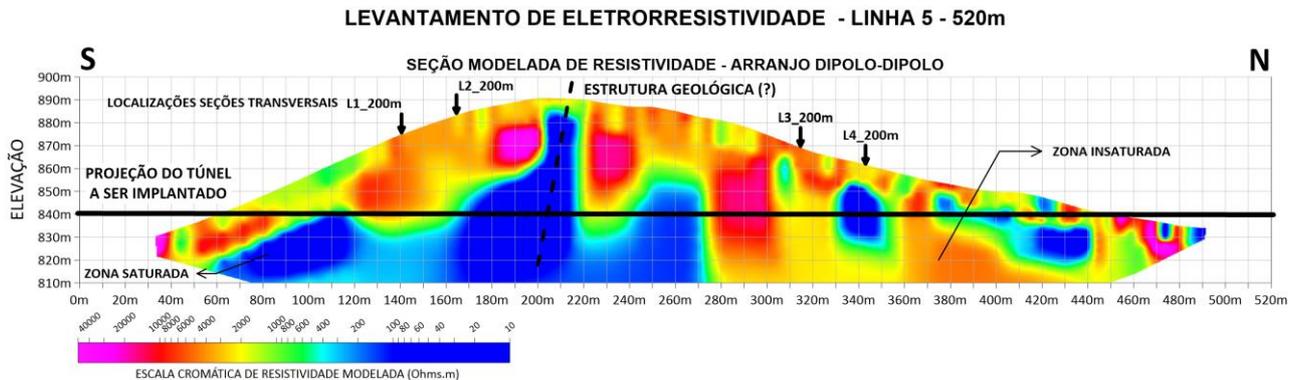


Figura 5. Seção de eletrorresistividade com suas respectivas interpretações.

3.2. Sísmica de refração

Os perfis sísmicos realizados apresentaram velocidades de propagação variando de 300 a 3000 m/s. Com base nas velocidades de onda, a interpretação geológica sugere três camadas:

- Solo / Depósitos Superficiais: Velocidade de 300 a 800 m/s, indicando solo não consolidado ou materiais sedimentares.
- Rocha Intemperizada: Velocidade de 800 a 1500 m/s, representando rochas alteradas com fraturas e menor coesão.
- Rocha Sã: Velocidade de 1500 a 3000 m/s, indicando rocha consolidada e com maior coesão.

A presença de um túnel pode causar uma redução nas velocidades das ondas sísmicas, especialmente quando a rocha ao redor está fragmentada. Essa estrutura cria uma anomalia sísmica devido à baixa rigidez do material, reduzindo significativamente a velocidade de propagação das ondas. Materiais como argila, sedimentos ou solos pouco coesos, presentes no túnel ou em suas imediações, intensificam a atenuação e diminuem ainda mais a velocidade sísmica (Figura 6).

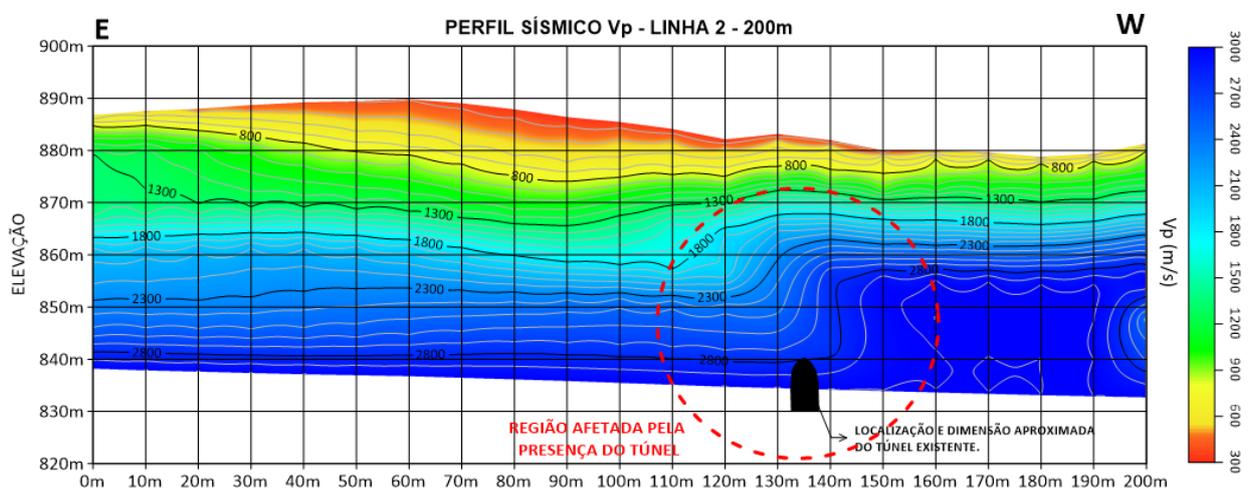


Figura 6. Seção de eletrorresistividade com suas respectivas interpretações.

O padrão sísmico da onda Vp registrado na Linha 5, alinhado ao túnel a ser implantado, mostra um aumento nas velocidades em profundidade, indicando diferentes níveis de compacidade. São observadas três faixas de velocidades: 300 a 800 m/s (solo e/ou depósitos superficiais), 800 a 1500 m/s (rocha intemperizada) e 1500 a 3000 m/s (rocha sã e consolidada). Foi interpretada uma possível estrutura geológica entre as estacas 220m e 240m.

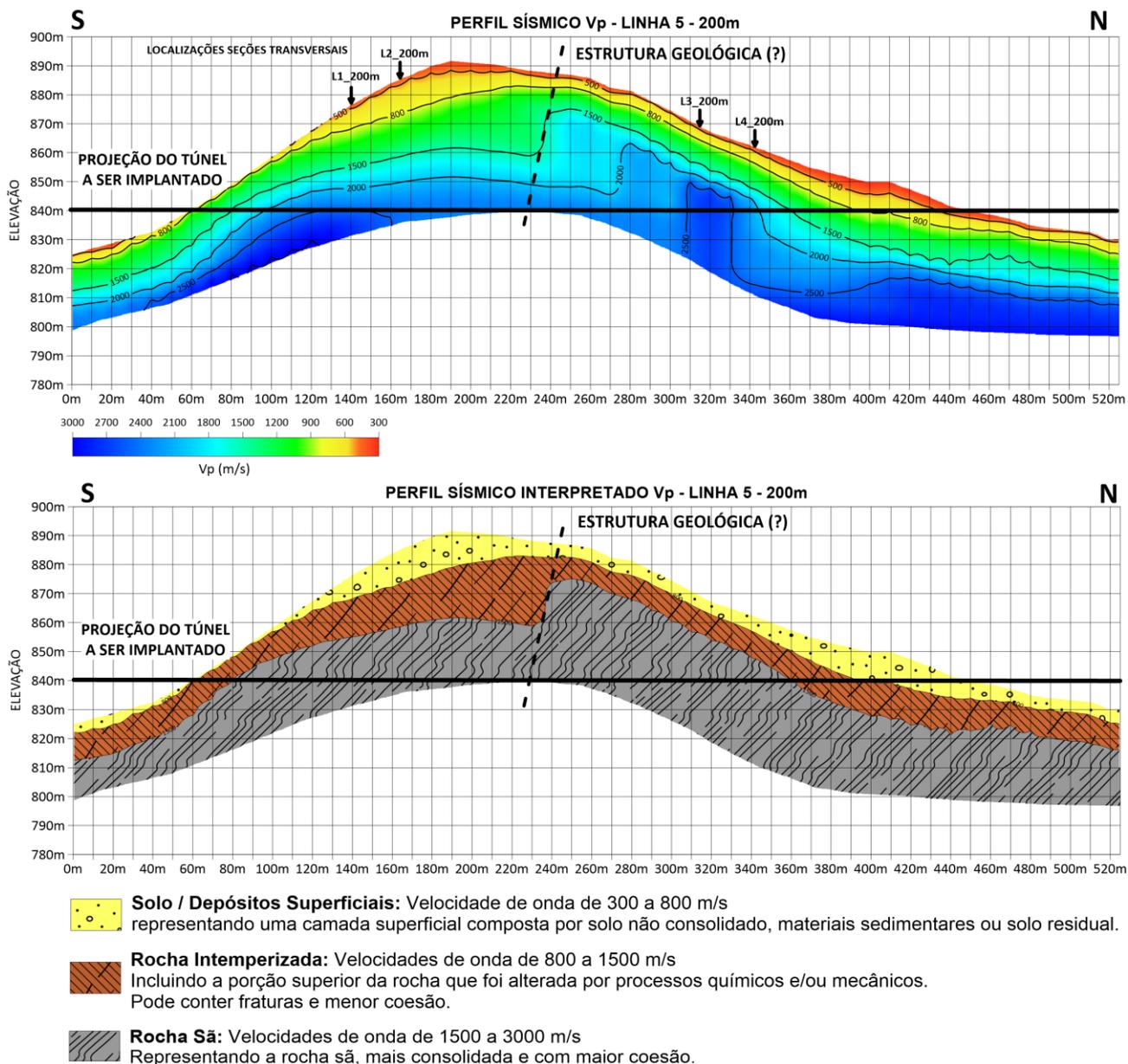


Figura 7. Perfil sísmico.

4. CONCLUSÕES

Os levantamentos geofísicos realizados permitiram uma caracterização detalhada das condições geológicas e geotécnicas na região de interesse para a implantação de um túnel. Os métodos empregados, eletrorresistividade e sísmica de refração, forneceram subsídios importantes para a compreensão das propriedades do subsolo, auxiliando na identificação de estruturas geológicas, zonas de fraturas e diferenças na composição do maciço rochoso.

A partir da análise das seções geofísicas de eletrorresistividade, foi possível diferenciar zonas de baixa e alta resistividade, indicando áreas saturadas, rochas intemperizadas e rochas sãs mais

compactas. Observou-se que a interpretação de túneis por eletrorresistividade está diretamente relacionada às condições do meio investigado. O acúmulo de água aumenta a saturação do solo ou rocha e revestimentos como argila ou concreto degradado favorecem a condução elétrica, gerando anomalias de baixa resistividade.

Os dados da sísmica de refração complementaram essas informações, permitindo a distinção entre solo superficial, rocha intemperizada e rocha sã, com velocidades de onda variando de 300 a 3000 m/s. A presença do túnel na área também influenciou as velocidades sísmicas, evidenciando possíveis zonas de fragmentação ou materiais menos coesos ao seu redor.

O conjunto de dados obtidos por meio dos métodos geofísicos são essenciais para o planejamento seguro e eficiente do projeto do túnel. A eletrorresistividade contribuiu para a identificação de zonas de retenção de água e estruturas geológicas relevantes, enquanto a sísmica de refração forneceu informações sobre a densidade e coesão do subsolo, fundamentais para a avaliação da estabilidade geotécnica. Assim, os resultados apresentados mostram uma base sólida para o desenvolvimento do projeto, auxiliando na tomada de decisões e na redução de riscos associados às condições geológicas e geotécnicas da área de estudo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. (1976). *Estruturas do Pré-Cambriano inferior brasileiro*. In: 29º Congresso Brasileiro de Geologia, Resumos: 201-202. Sociedade Brasileira de Geologia, Ouro Preto/Belo Horizonte.

CAVALCANTI, et al. (2020). *Projeto Evolução Crustal e Metalogenética do Quadrilátero Ferrífero, Folha Caeté*. Belo Horizonte – MG.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. (2020). *Carta Geológica e de Recursos Minerais - Folha Nova Lima – Escala 1:25.000*.

DORR II, J. V. N. (1969). *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Brasil*. U.S. Geological Survey / DNPM, Professional Paper 641(A), 110 p., Washington.

SCHORSCHER, H. D. (1978). *Komatiitos na estrutura "greenstone belt" Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. In: 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Resumos: 292-293. Sociedade Brasileira de Geologia, Recife.

SOUZA, et al. (1998). *Métodos de Investigação*. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (eds). *Geologia de Engenharia*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE, São Paulo, pp. 163-196.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. 2ª ed. Cambridge University Press, 770 p.