



Avaliação estratigráfica de um talude localizado na BR-470/RS a partir de ensaios geofísicos e sondagens mistas

Maria Isabel Ferreira dos Santos 1

Engenheira Geotécnica, FG Moretti, São Paulo, Brasil, isabel.ferreira@morettiengenharia.com.br

Geraldo Vanzolini Moretti 2

Engenheiro Geotécnico/Diretor, FG Moretti, São Paulo, Brasil, geraldo@morettiengenharia.com.br

Adalberto Jurach 3

Analista de Infraestrutura, DNIT, Passo Fundo, Brasil, adalberto.jurach@gmail.com

Jefferson de Magalhães Pacheco Colares 4

Engenheiro Supervisor, SD Engenharia, Passo Fundo, Brasil, jefferson.colares@sdengenharia.com.br

RESUMO: As intensas chuvas ocorridas no estado do Rio Grande do Sul em 2024 resultaram em danos de diversos tipos à infraestrutura regional, incluindo escorregamentos e fluxos de detritos em regiões de encostas montanhosas. Neste caso, os escorregamentos resultaram em danos severos ao sistema viário, especificamente no trecho que está situado na BR-470/RS entre Veranópolis e Bento Gonçalves. Com vistas a obtenção de informações geológico-geotécnica das ocorrências registradas, o presente estudo aborda a análise de dados estratigráficos obtidos por meio de ensaios geofísicos e de sondagens mistas, a fim de subsidiar os estudos de viabilidade, projetos, construção e operação de obras civis necessárias a estabilização dos taludes. Para isso, realizaram-se estudos da literatura sobre processos e mecanismos de investigação geotécnica, conferida com o estudo geofísico e de sondagens mistas. O estudo geofísico foi realizado a partir da metodologia de sísmica de refração e tomografia elétrica. Já os ensaios de sondagens pontuais foram executados por meio de sondagens à percussão e rotativa. As sondagens mistas realizadas apresentaram resultados concordantes com os dados geofísicos, justificando o emprego de métodos de investigação associados de geofísica e sondagens mistas, reduzindo as incertezas geotécnicas na área.

PALAVRAS-CHAVE: Eventos climáticos extremos, prospecção geológico-geotécnica, sísmica de refração, tomografia elétrica.

ABSTRACT: The intense rainfall events that occurred in the state of Rio Grande do Sul in 2024 caused various types of damage to regional infrastructure, including landslides and debris flows in mountainous slope areas. In this particular case, the landslides caused severe damage to the road system, specifically along the stretch of BR-470/RS between the municipalities of Veranópolis and Bento Gonçalves. In order to gather geotechnical and geological information regarding the recorded occurrences, this study presents an analysis of stratigraphic data obtained through geophysical testing and percussion drilling. These data aim to support feasibility studies, design, construction, and operation of civil engineering works required for slope stabilization. The methodology involved a literature review on geotechnical investigation processes and mechanisms, which was then compared with the results obtained from geophysical surveys and preliminary borehole investigations. The geophysical survey included seismic refraction survey and electrical resistivity tomography. Additionally, spot investigations were carried out using standard penetration tests (SPT) and rotary drilling techniques. The results from the combined drilling methods were consistent with the geophysical data, supporting the use of integrated investigation techniques—geophysics combined with mixed drilling—to reduce geotechnical uncertainties in the area.

KEYWORDS: Extreme weather events, geological-geotechnical investigation, seismic refraction survey, electrical resistivity tomography.

1. INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos, como as intensas chuvas que assolaram o estado do Rio Grande do Sul em maio de 2024, têm evidenciado a vulnerabilidade da infraestrutura de transporte a processos de instabilidade



geotécnica. Escorregamentos, fluxos de detritos e quedas de blocos em encostas montanhosas resultaram em danos significativos a rodovias, como observado no trecho da BR-470/RS entre Veranópolis e Bento Gonçalves. A ocorrência desses fenômenos ressalta a necessidade de investigações geológico-geotécnicas detalhadas para a compreensão das condições do subsolo e o desenvolvimento de soluções de mitigação eficazes.

A investigação do subsolo em áreas afetadas por instabilidades geotécnicas requer a aplicação de métodos que permitam caracterizar a estratigrafia, identificar zonas de fraqueza e determinar parâmetros geotécnicos relevantes. Tradicionalmente, as sondagens diretas, como a Sondagem a Percussão (SPT), têm sido amplamente utilizadas no Brasil para a investigação de solos e rochas brandas. O ensaio SPT, normatizado pela ABNT NBR 6484/2020, fornece o índice de resistência à penetração (NSPT), que é um parâmetro empírico correlacionado com a compacidade de solos arenosos e a consistência de solos argilosos, além de permitir a coleta de amostras para classificação e a identificação do nível d'água. Em maciços rochosos, a sondagem rotativa complementa o SPT, permitindo a recuperação de testemunhos e a caracterização das discontinuidades.

Paralelamente às sondagens diretas, os métodos geofísicos têm ganhado destaque como ferramentas complementares e, em alguns casos, alternativas para a investigação do subsolo. Os ensaios sísmicos, em particular, são valiosos para a determinação das propriedades dinâmicas dos materiais (velocidades das ondas P e S) e a identificação de interfaces com contrastes de velocidade, o que permite inferir a estratigrafia e o grau de alteração e fraturamento de solos e rochas.

A aplicação desses métodos de investigação em áreas de risco de instabilidade tem sido objeto de diversos estudos no Brasil. Casos de obra em taludes rodoviários, encostas naturais e áreas urbanas têm demonstrado o potencial da integração de sondagens e métodos geofísicos para a caracterização geológico-geotécnica e o subsídio a projetos de estabilização. A correlação entre os resultados de diferentes métodos de investigação é fundamental para reduzir as incertezas e aumentar a confiabilidade da interpretação do modelo do subsolo.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal apresentar a avaliação estratigráfica detalhada de um talude rodoviário afetado por instabilidades na BR-470/RS, utilizando a integração de dados obtidos por meio de ensaios geofísicos, sondagens a percussão (SPT) e rotativa, visando subsidiar os estudos e projetos de engenharia necessários à sua estabilização. Para alcançar este objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Descrever a metodologia de aquisição e processamento dos ensaios geofísicos de sísmica de refração e tomografia elétrica (CE-ERT), bem como os procedimentos de campo das sondagens a percussão (SPT) e rotativa, conforme aplicados no caso de obra em questão.
- Apresentar os resultados obtidos com cada método de investigação (perfis de velocidade V_p e V_s , seções de resistividade elétrica, perfis de sondagem SPT/rotativa), destacando as informações estratigráficas e as propriedades inferidas para os diferentes horizontes do subsolo.
- Realizar a análise integrada dos dados geofísicos e de sondagem, correlacionando os resultados de velocidade sísmica e resistividade elétrica com a litologia, o grau de alteração, o fraturamento e o nível d'água identificados nas sondagens, a fim de obter um modelo estratigráfico do talude.
- Discutir a concordância e as complementaridades entre os diferentes métodos de investigação aplicados, evidenciando como a integração de dados contribui para a redução das incertezas na caracterização geológico-geotécnica do subsolo em áreas complexas.
- Demonstrar a aplicabilidade da metodologia de investigação associada (geofísica e sondagens) para a avaliação estratigráfica de taludes rodoviários em áreas críticas, fornecendo subsídios essenciais para a tomada de decisão em projetos de estabilização e mitigação de riscos.

3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

3.1. Contexto Pluviométrico

Conforme mencionado anteriormente, intensas chuvas afetaram o estado do Rio Grande a partir do segundo trimestre de 2024. Entre outras as diversas complicações para a população, as intensas chuvas

contribuíram para ocorrência de abalos severos aos sistemas viários. No primeiro semestre do ano de 2024, especificamente no mês de maio, o estado do Rio Grande do Sul apresentou elevados volumes de precipitação de acordo com dados coletados junto ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) para estação Forquetas localizada em Caxias do Sul/RS, situada próxima ao segmento descrito, conforme ilustra a Figura 1.

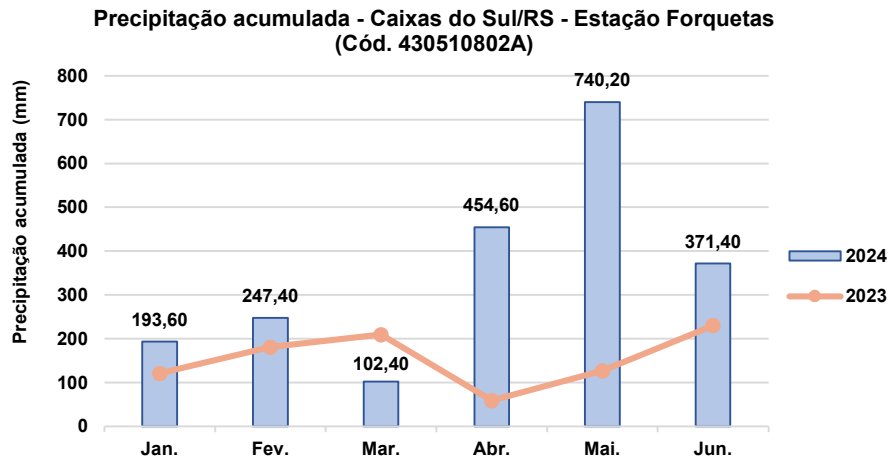


Figura 1: Precipitação acumulada para o primeiro semestre de 2024 na estação Forquetas em Caxias do Sul/RS (Cemaden, 2025).

3.2. Contexto Geológico e Estrutural

A região em estudo está situada no contexto tectônico da Bacia Sedimentar do Paraná, no domínio das rochas cretáceas do Grupo São Bento, compostas por arenitos eólicos na base (Fm. Botucatu), correspondentes aos campos de dunas de um extenso paleodeserto, sobrepostos por derrames basálticos (Fm. Serra Geral) associados a volumoso magmatismo fissural, que recobriu praticamente toda a superfície da Bacia (Milani e Zalán, 1999; Marques e Ernesto, 2004) e chega a cerca de 2000 m nas regiões mais espessas. Mapeamentos mais recentes (CPRM, 2014) compartimentam os derrames de basalto em diversas fácies conforme presença de estruturas típicas, variações composicionais, variações texturais etc.

Durante o levantamento geológico regional, identificou-se o predomínio de rochas máficas pertencentes à Formação Serra Geral, com ocorrência das Fácies Gramado e Caxias, representando diferentes estágios dos derrames basálticos toleíticos. A cobertura superficial é composta por solos residuais derivados do intemperismo dos basaltos, com presença de perfis lateríticos espessos e, em áreas mais rebaixadas ou próximas a drenagens, por depósitos coluvionares e eluvionares, associados a processos de transporte e acúmulo em vertentes.

Quanto a geomorfologia, a região em estudo insere-se na unidade do Planalto das Araucárias, setor elevado da Borda Oriental da Bacia do Paraná, caracterizado por patamares escalonados, vales encaixados e relevo fortemente dissecado, moldado sobre os derrames basálticos da Formação Serra Geral. A compartimentação do relevo é controlada tanto pela variação litológica das fácies basálticas (Gramado e Caxias) quanto pela presença de estruturas tectônicas herdadas, que orientam a drenagem e influenciam a erosão diferencial.

3.3. Contexto Geotécnico

A área afetada na região de estudo é extensa, abrangendo trechos a montante – na encosta natural –, nos taludes de corte nas margens da rodovia, e nas vertentes a jusante dos segmentos rompidos, conforme ilustrado na Figura 2. Os movimentos gravitacionais de massa deflagrados na área de estudo foram caracterizados como escorregamentos, processos de rastejos e fluxo de detritos.

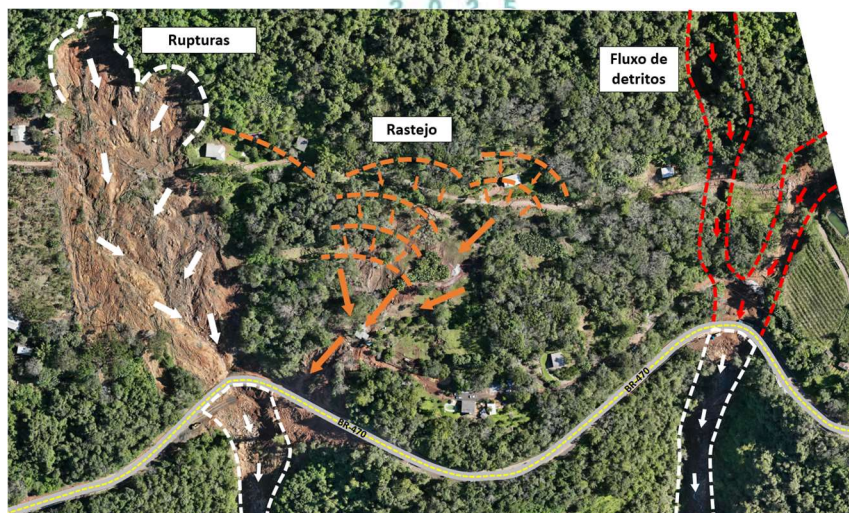


Figura 2: Área de estudo com identificação dos movimentos gravitacionais deflagrados (FG Moretti Engenharia, 2025).

A primeira seção é uma patologia de enorme expressão, com o desenvolvimento de escorregamentos na região da encosta imediatamente a montante do patamar central, apresentando cerca de 15 metros a 20 metros de altura máxima, e até 50 metros de extensão lateral. A massa rompida escoou pela encosta para jusante tendo se depositado parcialmente no patamar intermediário e por fim atingindo a rodovia. Na margem desta, o evento foi responsável por danos severos ao próprio sistema viário e atingindo um talude de corte em rocha de cerca de 50 metros de extensão, situado imediatamente a jusante da zona intermediária, em um degrau subvertical. O maciço resultante é de condições medianas a pobres, com rocha alterada, fraturas abertas e/ou com preenchimento.

Na segunda seção tem-se uma patologia que se expressa pelo movimento contínuo da massa de solo na região do platô intermediário, identificado através da observação de diversas trincas e formação de “degraus” no terreno, desde a área da crista. O material exposto é composto de talus de matriz argilosa marrom com diversos fragmentos rochosos e presença de matações métricos assentados em superfície.

Na terceira seção o movimento ocorrido caracteriza-se como enxurradas sobre drenagens previamente existentes, deflagradas pela subida do nível freático nas zonas das cabeceiras das respectivas drenagens. A força das águas passou a mobilizar também massas de solo e blocos rochosos do talus depositados sobre o maciço rochoso, resultando em um fluxo de detritos. A ação dos fluxos de detritos, danificou severamente a rodovia e as vias de acesso secundárias presentes na área.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de Estudo

O estudo foi realizado no trecho da BR-470/RS, entre os municípios de Veranópolis e Bento Gonçalves, no estado do Rio Grande do Sul. A região está localizada no Planalto dos Campos Gerais, na região conhecida como Serra do Rio das Antas, apresentando-se em relevo montanhoso com encostas íngremes e vales profundos e possuindo desníveis acentuados, como ilustra a Figura 3.

Foram levantadas, no total, quatro linhas sísmicas, utilizando até 60 geofones por linha, cujas localizações se apresentam na Figura 3, por um total de 1996 metros de linhas sísmicas. Para a técnica de tomografia elétrica, foram determinadas seis linhas de geofísicas, possuindo uma extensão total de 1086 metros, cujas disposições são apresentadas na Figura 3. Quanto às sondagens mistas, posteriormente foram executadas em 15 pontos ao longo do trecho em estudo, totalizando 297,24 metros perfurados.

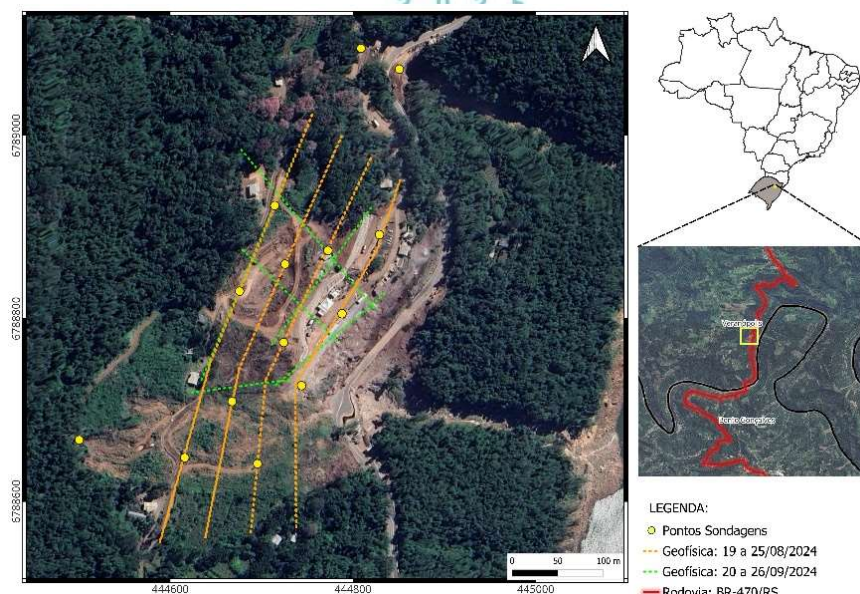


Figura 3: Mapa de localização da área de estudo com identificação das linhas de geofísicas e pontos de sondagens mistas (FG Moretti Engenharia, 2025).

4.2. Levantamentos Bibliográfico e de Campo

Realizou-se um estudo da literatura sobre processos e mecanismos de investigação geotécnica aplicados a áreas de escorregamentos e fluxos de detritos, de forma a subsidiar a escolha das metodologias de campo. Foram escolhidas investigações geofísicas associadas a sondagens de simples reconhecimento.

4.2.1. Investigações Geofísicas

Foram realizados estudos geofísicos utilizando os seguintes métodos: sísmica de refração e tomografia elétrica. De acordo com a Norma ABGE 201/2023, o ensaio de Sísmica de Refração permite determinar as velocidades de propagação (geralmente das ondas P) e as espessuras das camadas do subsolo, por meio da análise das ondas refratadas nas interfaces entre materiais com diferentes propriedades sísmicas. Esse método é aplicável em contextos onde a velocidade das ondas aumenta com a profundidade. A profundidade de investigação está diretamente relacionada ao comprimento da base sísmica, que deve ser aproximadamente cinco vezes maior do que a profundidade desejada. A resolução lateral depende do espaçamento entre os geofones, influenciando o grau de detalhamento com que as camadas subsuperficiais podem ser mapeadas. Utilizando fontes de baixa energia, como marretas, podem ser investigadas profundidades de 30 a 40 metros; para maiores profundidades, são requeridas fontes mais potentes, como explosivos ou equipamentos mecânicos de grande porte.

Já o método de tomografia eletrônica consiste na aplicação de corrente elétrica em pares de eletrodos inseridos no solo e na medição da diferença de potencial entre outros pares, permitindo calcular a resistividade elétrica aparente dos materiais. A variação da resistividade está relacionada a fatores como litologia, porosidade, grau de saturação, presença de água subterrânea ou contaminantes. Os dados coletados são processados por meio de inversão numérica, resultando em modelos 2D ou 3D da distribuição de resistividade elétrica no subsolo. Este método apresenta alta sensibilidade na detecção de contrastes elétricos, sendo eficaz na identificação de interfaces geológicas, zonas de alteração, cavidades, aquíferos e zonas contaminadas.

4.2.2. Sondagens Geotécnicas

Conforme o Guia de Boas Práticas (Monticelli, 2021) as sondagens mistas, combinam os métodos à percussão (SPT) e rotativo. O procedimento iniciou-se com a cravação do amostrador padrão para obtenção do índice de resistência à penetração (NSPT) e coleta de amostras do solo. Ao atingir camadas com maior resistência, como saprolitos ou rocha alterada, a perfuração é convertida para o sistema rotativo, possibilitando a recuperação de testemunhos e a descrição das características geológicas e geotécnicas do maciço.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da metodologia de sísmica à refração, as linhas apresentaram um solo de pouca espessura, entre 0 e 2 metros, sobreposto a um material de cobertura com espessura variável, entre 4 metros e 14 metros. Abaixo da cobertura, está presente uma camada de rocha alterada e fraturada, apresentando espessuras entre 2 metros e 10 metros, depois rocha sã até a máxima profundidade alcançada pela metodologia, correspondente a 30 metros, conforme ilustra a Figura 4.

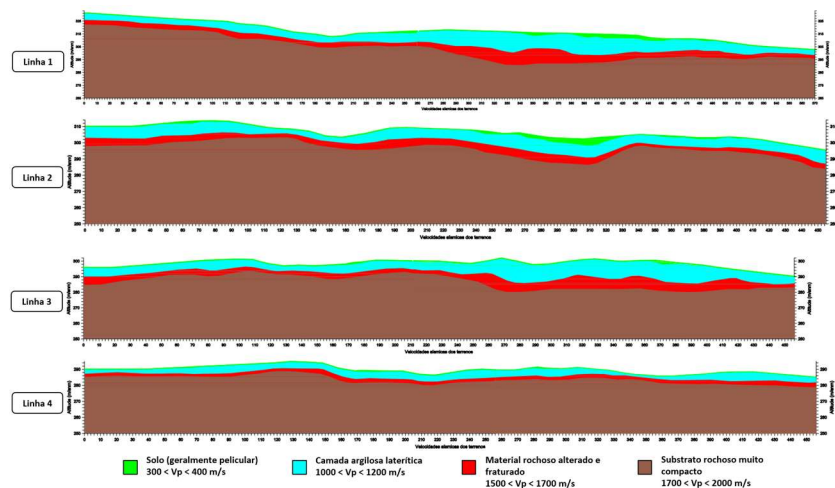


Figura 4: Resultados do modelo tomográfico para as linhas 1, 2, 3 e 4, apresentando a divisão por camadas e correlação de Vp com a geologia

A partir da Figura 4 observa-se que a camada superficial, com velocidade sísmica entre 300 e 400 m/s, corresponde a um solo fofo e bastante desagregado. Em seguida, é possível identificar uma camada argilosa laterítica, com velocidades entre 1000 e 1200 m/s, representando um material mais compacto e coeso, sendo que maiores velocidades de propagação (Vp) indicam maior grau de compactação. Destaca-se que essa camada de cobertura pode corresponder ao saprólito, frequentemente contendo seixos e blocos, além de apresentar transição para Rocha Alterada Mole (RAM). O estrato subsequente, com velocidades entre 1500 e 1700 m/s, corresponde a um material rochoso alterado e fraturado, provavelmente associado ao limite de penetração dos ensaios SPT. Já as velocidades entre 1700 e 2000 m/s sugerem a presença de Rocha Alterada Dura (RAD), caracterizando um substrato rochoso muito compacto. Por fim, valores superiores a 2500 m/s são típicos de rocha sã, sendo que, quanto maior a velocidade sísmica, mais íntegra é a rocha.

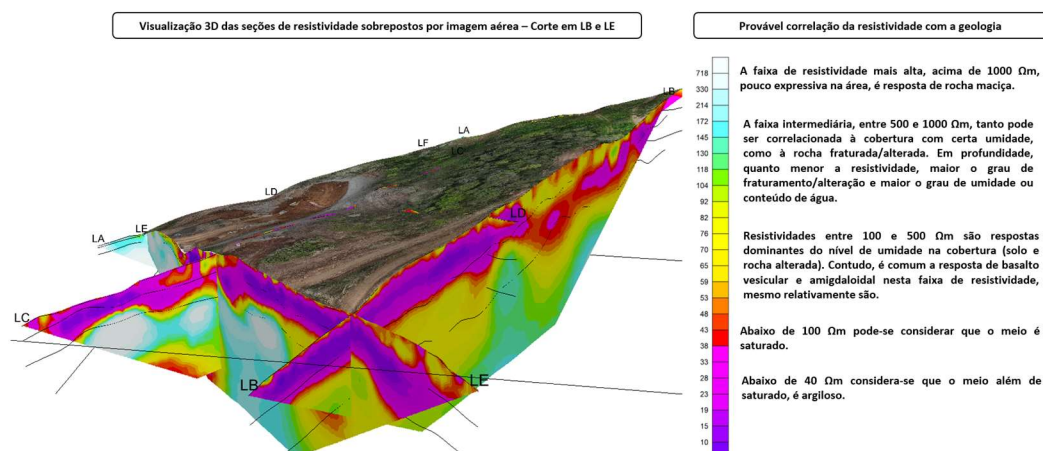


Figura 5: Visualização 3D das seções de resistividade e os topos sísmicos (rocha alterada mole: 1500 m/s) e (rocha sã 3500 m/s) sobrepostos por imagem aérea – Corte em LB e LE

A técnica de tomografia elétrica teve espaçamento de 6 metros entre eletrodos e arranjo dipolo-dipolo. Os 72 canais do sistema multieletródo permitiram que cada linha fosse recoberta por completo, investigando 50 metros de profundidade nas linhas mais extensas e 25 nas menores. As baixas resistividades nos tons magenta-rosa salientam zonas saturadas em água e as altas resistividades nas cores azul-branca, salientam a rocha basáltica maciça e pouco fraturada. A Figura 5 exibe uma visão geral da distribuição 3D da resistividade elétrica, já evidenciando a cobertura saturada, que é objeto de investigação primário no atual projeto.

Para a análise integrada das seções de resistividade e dos topos sísmicos, a Figura 6 apresenta a linha sísmica “B” e sobreposta aos resultados da sísmica de refração, para o melhor entendimento geológico-geotécnico da área. Observa-se que a cobertura saturada é bem definida por meio da técnica de resistividade, sendo resposta de solo, saprolito e rocha alterada mole (RAM), enquanto a sísmica de refração é a técnica mais sensível ao grau de alteração. Dessa forma, a cobertura relativamente saturada apresentou espessura variando entre 5 e 10 metros, evidenciada nas seções e destacando as regiões de baixa resistividade ($< 40 \Omega m$) acima do topo da camada de RAM.

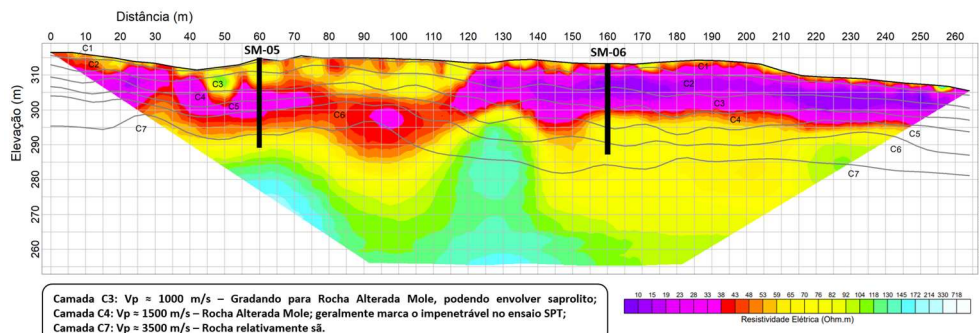


Figura 6: LB – Seção de resistividade sobreposta pelos topos sísmicos de Vp C3 (1000 m/s), C4 (1500 m/s) e C7 (3500 m/s), com elementos de interpretação

Posteriormente à execução dos ensaios geofísicos, as sondagens mistas realizadas na região buscaram definir melhor os limites marcados nas seções sísmicas. Atentando-se a linha “B”, as sondagens SM-05 e SM-06 interceptam o alinhamento, sendo possível realizar a análise integrada desses resultados, conforme apresenta a Figura 7.

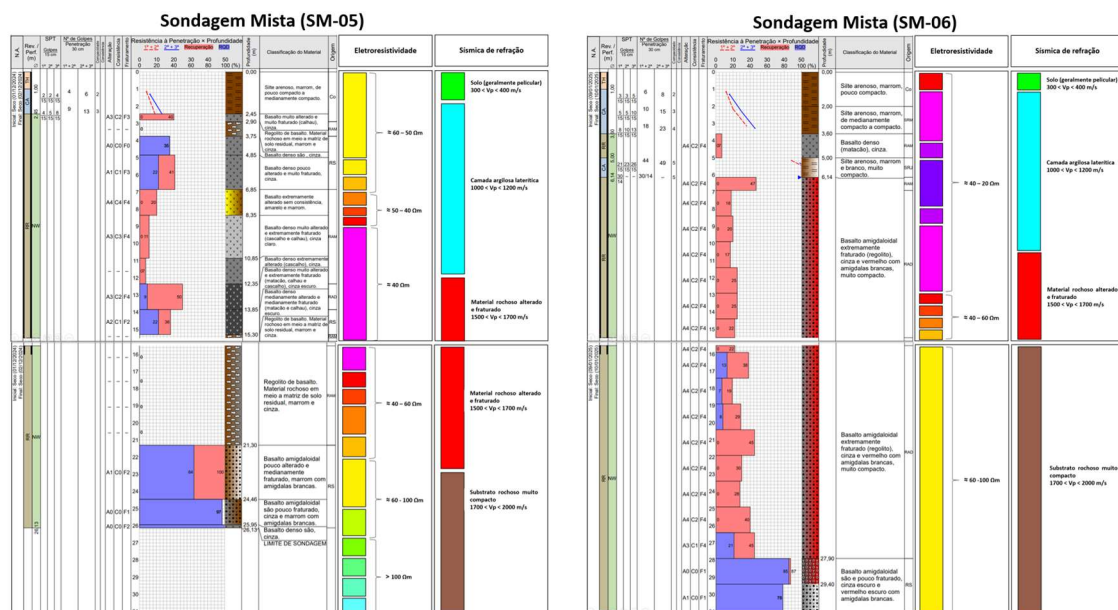


Figura 7: Integração das sondagens mistas SM-05 e SM-06 com dados de eletroresistividade e sísmica de refração

Na Figura 7 observam-se inicialmente camadas de silte arenoso pouco a medianamente compacto, presente até a profundidade de 3,60 metros. Em ambas as análises integradas, os dados de sísmica de refração



apresentam V_p variando entre 300 m/s a 1200 m/s, caracterizando a presença de solo e camada argilosa laterítica. Quanto aos dados de eletrorresistividade, para o SM-05 observa-se que a resistência inicial de 60 Ohm.m intercepta a região de alteração, descrito como regolito de basalto. Em contrapartida, no SM-06 a resistência é apontada nos valores de resistividade variando entre 40 e 20 Ohm.m, condizente com a classificação tátil-visual do material.

Sotaposta a esta camada, tem-se a presença de rocha alterada mole, composta por basalto denso e amigdaloidal, possuindo intercalação com solo residual maduro e jovem. Os resultados obtidos para esse estrato por meio da técnica sísmica de refração exibem que para maciços com recuperação de até 41% as velocidades encontradas variam de 1000 a 1200 m/s, classificando-se como “cobertura” e em maiores profundidades as velocidades encontradas variam de 1500 a 1700 m/s, classificando-se como rocha alterada. Para a técnica de eletrorresistividade, as resistências variam de 40 a 60 Ohm.m. A camada descrita como rocha sã (RS) apresentou valores de resistência variando entre 60 e 100 Ohm.m, sendo na profundidade limite da sondagem encontradas resistências superiores a 100 Ohm.m.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As seções de resistividade delimitaram zonas saturadas, tanto de solo, quanto de rocha alterada, além de apontar feição de rocha fraturada e saturada, bem como a evidencia de rocha subaflorante e rocha maciça em profundidade, caracterizando locais onde o solo é menos saturado. A sísmica de refração sugere que solo fofo, desagregado, correspondente à camada com velocidade V_p de 300 m/s, é mais expressivo nas partes de maior elevação e quase inexistente nas partes baixas, mais próximas da rodovia. O topo rochoso foi definido no topo da camada com V_p de 1500 m/s, embora mais friável quando comparada com o topo da camada de 2500 m/s.

A partir dos resultados dos ensaios geofísicos conseguiu-se avaliar geologicamente a extensa área de estudo, possibilitando o aprofundamento dos movimentos ocorridos. Ao associar estes métodos com sondagens pontuais melhorou-se a definição das interfaces litológicas, identificação de anomalias geológicas, avaliação de rigidez e elaboração de modelos geotécnicos mais confiáveis. Conclui-se, portanto, que a abordagem integrada contribui diretamente para decisões mais assertivas no planejamento e execução das obras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) pela autorização para a publicação deste artigo. Estendem também seus agradecimentos aos colaboradores Fábio Jorge de Oliveira, Thalita da Silva Fernandes Bezerra e Daniel Kina Murakami pelo apoio prestado à realização deste trabalho, bem como às equipes da FG Fundações e Geotecnia, Moretti Engenharia Consultiva e Neovia Infraestrutura Rodoviária, responsáveis pela execução dos trabalhos descritos, que tornaram possível a concretização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (2023). ABGE 201 *Investigação geofísica em terra – Métodos sísmicos*. São Paulo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. *Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Benson, R. C., Glaccum, R., Noel, M. (1984) *Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration*. Las Vegas: U.S. EPA Environmental Monitoring Systems Laboratory, 236 p.
- Lavina, E. L., Lopes, R da C., Philipp, R. P., Girelli, T. J. (2014) Programa Geologia do Brasil-PGB. Estado do Rio Grande do Sul. *Carta Geológica*. Porto Alegre: CPRM, mapa colorido, escala 1:100.000.
- Marques, L. S., Ernesto, M. O. (2004) *Magmatismo Toleítico da bacia do Parana*. In: Neto, V.M., Bartonelli, A., Carneiro, C.D. and Brito-Neves. B.B., Eds., *Geologia do continente Sul-Americano: Evolucao da obra de Fernando Flavio Marques Almeida*, Editora Beca, Sao Paulo, 245-263.
- Milani, E. J., Zalán, P. V. (1999) *An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America*. Episodes, 22: 199-205.
- Monticelli, J. J. (Ed.). (2021) *Investigações geológico-geotécnicas: guia de boas práticas*. São Paulo: ABGE, 528 p.