

Características hidro geotécnicas particulares da Formação Serra Geral em Bento Gonçalves – BR-470/RS

Cleber Floriano

Diretor, SF Engenharia Diferenciada, Porto Alegre, Brasil, cleber@souzafloriano.com

Jefferson Dias Escarani da Silva

Engenheiro Civil, SEEL Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, jescarani@seel.com.br

Adriano Marchiorreto

Diretor, Alta Resolução Geofísica e Geologia, São Paulo, Brasil, adriano@altaresolucao.com.br

Diego Pietrobon

Engenheiro Civil, SF Engenharia Diferenciada, Porto Alegre, Brasil, diego@souzafloriano.com

RESUMO: O trecho da BR-470/RS no km 200, próximo ao município de Bento Gonçalves, insere-se na borda nordeste da Bacia do Paraná, onde afloram rochas da Formação Serra Geral. Essas unidades geológicas incluem derrames máficos da Formação Gramado e litotipos ácidos da Formação Caxias, resultantes da atividade vulcânica entre 135 e 65 milhões de anos. Em maio de 2024, esse setor sofreu uma sequência de nove rupturas em menos de 800 metros, impulsionadas por chuvas extremas. O presente trabalho investigou a origem dessas instabilidades, integrando análises geológicas, geofísicas e geotécnicas. Foram realizadas nove sondagens rotativas e seis perfis de eletrorresistividade (SIG), totalizando aproximadamente 2.000 metros. Os resultados revelaram camadas intercaladas de escória riodacítica porosa e depósitos tufáceos, altamente suscetíveis à saturação. A estrutura geológica local, marcada por fraturas subverticais e disjunções, favorece a formação de níveis freáticos suspensos e zonas de sobrepressão. Essa configuração hidrogeotécnica propicia falhas internas por aumento da poro-pressão e redução da resistência efetiva. O estudo propõe um modelo conceitual integrado para compreender os mecanismos de instabilidade, fornecendo subsídios para ações corretivas e prevenção de riscos em rodovias inseridas em terrenos vulcânicos complexos.

PALAVRAS-CHAVE: Formação Serra Geral, escória riodacítica, deslizamento, BR-470, geologia estrutural, instabilidade de encostas.

ABSTRACT: The Antas River valley, near the city of Bento Gonçalves on the northeastern margin of the Paraná Basin, exhibits complex volcanic geology marked by thick, overlapping lava flows of the Serra Geral Formation. These flows, generated during the Gondwana breakup, include both tholeiitic basalts (Gramado Formation) and felsic volcanic rocks like rhyodacites and dacites (Caxias Formation). This study analyzes the hydrogeotechnical conditions at km 200 of the BR-470/RS, where nine slope failures occurred over a short segment during the 2024 extreme rainfall events. Investigations included rotary drilling, electrical resistivity imaging, and petrographic assessments, revealing a heterogeneous geologic framework with porous rhyodacitic scoria interbedded among massive basalt flows. Structural discontinuities, such as subvertical fractures and flow planes, control water infiltration and lead to suspended water tables and zones of elevated pore pressure. These conditions, exacerbated by intense rainfall, explain the recurrent slope failures. The integration of lithological, structural, and hydrological factors allowed the development of a conceptual model for slope instability in volcanic terrains. The findings support the need for mitigation measures that account for subsurface flow, weak acidic layers, and structural compartmentalization to reduce landslide susceptibility in similar geological settings.

KEYWORDS: Serra Geral Formation, rhyodacitic scoria, landslide, BR-470, structural geology, slope instability.

1 INTRODUÇÃO

A Formação Serra Geral representa uma das unidades geológicas mais extensas e complexas da Bacia do Paraná, composta por derrames basálticos e rochas vulcânicas ácidas depositadas entre o Cretáceo Inferior e Superior, no contexto da fragmentação do Gondwana (CPRM, 2020; SBG, 2023). Esses derrames apresentam significativa diversidade composicional, mineralógica e estrutural, influenciando diretamente os processos de intemperismo e a formação de solos residuais e coluviais, fatores determinantes na estabilidade geotécnica de taludes (Floriano, 2017).

Na Serra Gaúcha, particularmente no trecho da BR-470/RS em Bento Gonçalves, a interação entre essas litologias vulcânicas e o regime hídrico tem implicado em recorrentes eventos de instabilidade de encostas. A dinâmica topográfica, fortemente condicionada por disjunções colunares, fraturas verticais e planos de fluxo, cria zonas de fraqueza que se tornam críticas diante de mudanças abruptas no regime de umidade do solo. Esse cenário tornou-se ainda mais crítico diante das chuvas extremas que atingiram o estado do Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024, com volumes acumulados em poucos dias que superaram a média histórica mensal. Tal evento catastrófico causou colapsos estruturais, deslizamentos, escorregamentos e solapamentos em diversos segmentos rodoviários da malha federal e estadual, incluindo uma sequência de rupturas concentradas em trecho da BR-470 analisado neste estudo (DNIT, 2024).

A intensidade e frequência desses fenômenos, somadas à vulnerabilidade natural do terreno em função de sua origem geológica, demonstram a urgência de aprofundar o entendimento das interações entre litologia, estrutura e água subterrânea. Isso é particularmente relevante em áreas onde as rochas efusivas, como os dacitos e riodacitos da Formação Caxias, atualmente destacada como Palmas, aparecem intercaladas a derrames basálticos da Formação Gramado, atualmente destacada como Vale do Sol, formando uma estrutura geológica em camadas com diferentes graus de resistência e permeabilidade (ver Figura 1).

Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo analisar as características hidrogeotécnicas específicas de um setor crítico da BR-470/RS, na altura do km 200, marcado por uma sequência de nove rupturas em menos de 800 metros. A abordagem adota uma integração entre geologia estrutural, análise litológica, investigações geofísicas e ensaios geotécnicos, visando compreender os mecanismos que favoreceram as instabilidades observadas. As investigações revelam a presença de rochas escoriáceas e tufáceas de origem ácida, intercaladas entre derrames máficos, fortemente condicionadas por fraturas e descontinuidades. As interpretações geofísicas fornecem subsídios importantes para essa compreensão, ao indicar zonas de maior condutividade associadas a descontinuidades estruturais e alterações litológicas (Marchiorreto et al., 2024).

O artigo busca contribuir com o entendimento das interações entre litologia, estrutura geológica e dinâmica hídrica em encostas vulcânicas, propondo uma base técnica para avaliação de risco e ações corretivas em cenários de alta suscetibilidade geotécnica.

Essa abordagem integrada permite propor diretrizes mais adequadas para a análise de risco e para intervenções técnicas em segmentos rodoviários inseridos em áreas de geologia vulcânica complexa, como é o caso do vale do Rio das Antas.

2 LOCALIZAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA BIBLIOGRÁFICA

O trecho em estudo está localizado no km 200 da rodovia BR-470/RS, no município de Bento Gonçalves, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, inserido na borda nordeste da Bacia do Paraná. Este segmento está inserido em uma feição de vale profundo, entalhado pelo rio das Antas, cuja morfologia é fortemente controlada por estruturas geológicas regionais e litologias contrastantes pertencentes à Formação Serra Geral (descrição predominante na literatura).

Embora atualizado recentemente, o mapeamento geológico da CPRM (2020) e das interpretações tectono-estratigráficas compiladas pela SBG (2023), a região é mais comumente caracterizada por uma cobertura espessa de rochas vulcânicas do Cretáceo, compostas por alternância de derrames máficos (basaltos toleíticos da Formação Gramado) e rochas ácidas a intermediárias (dacitos, riodacitos e ignimbritos da Formação Caxias). Essa sobreposição litológica ocorre em pacotes espessos, que sofrem intensa fraturação devido à evolução tectônica pós-depósito, favorecendo tanto a percolação de água quanto a evolução de instabilidades geotécnicas.

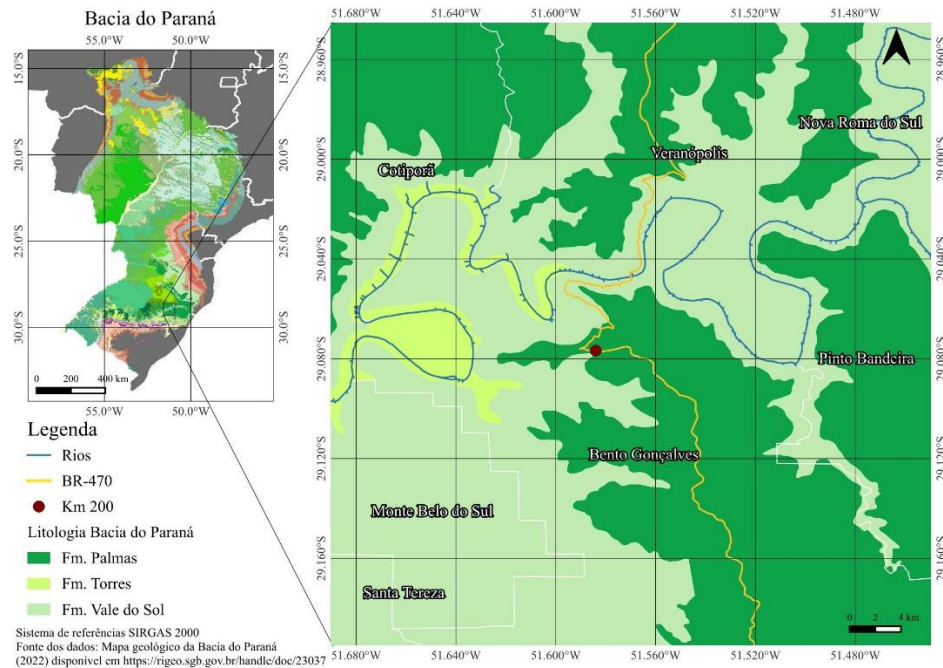


Figura 1. Formações geológicas atualizadas junto ao km 200 da BR-470. Fm. Caxias se aproxima das características da Fm. Palmas e Fm. Gramando da Fm. Vale do Sol.

O arcabouço estrutural é marcado por fraturas subverticais e sub-horizontais, disjunções colunares, zonas brechadas e contatos abruptos entre derrames de diferentes naturezas, que controlam a morfologia escalonada da encosta. As principais direções estruturais observadas são N20°E e N70°E, inclinadas entre 60° e 85°, compatíveis com o regime tectônico extensivo associado à evolução da Bacia do Paraná.

A litologia local inclui intercalações de depósitos escoriáceos ácidos, interpretados como produtos de fases explosivas do vulcanismo, frequentemente interpostos entre fluxos densos de basalto. Esses depósitos escoriáceos apresentam baixa coesão e alta porosidade, o que favorece sua saturação e perda de resistência quando submetidos a eventos de recarga intensa.

A interpretação geofísica realizada por Marchiorreto et al. (2024) reforça essa complexidade ao indicar variações laterais e verticais de condutividade elétrica, coerentes com zonas de alteração hidrotermal, presença de fraturas e possíveis interfaces entre derrames contrastantes. Esses dados se mostraram fundamentais para a caracterização tridimensional do maciço rochoso e subsidiaram o planejamento das investigações complementares (ver figura 2 e 3).

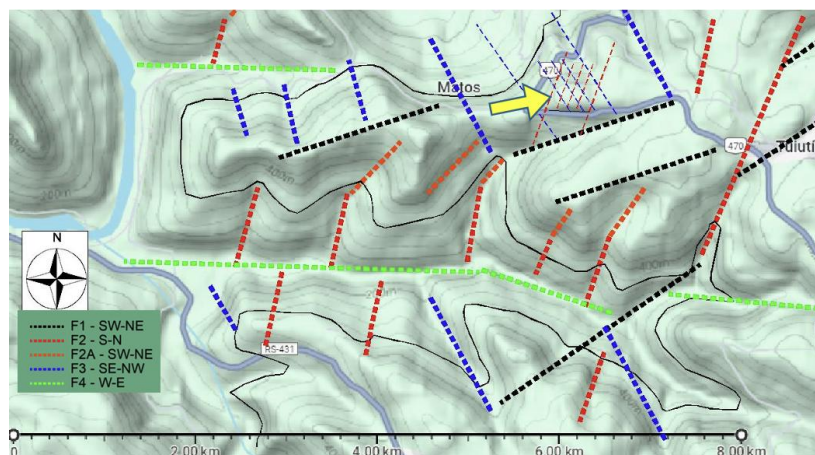


Figura 2. Indicação das principais famílias de descontinuidades do sistema de falha local com destaque para o local especificamente detalhando junto ao km 200 da BR-470.



Figura 3. Local de ruptura pós evento climático de abril e maio de 2024 junto ao km 200 da BR-470.

3 ESTUDOS GEOLÓGICOS GEOTÉCNICOS

Dando continuidade à caracterização geológica regional, os estudos realizados em campo e em laboratório foram fundamentais para detalhar as condições locais no entorno do km 200 da BR-470/RS. As observações feitas ao longo de uma série de campanhas permitiram identificar aspectos litológicos e estruturais que influenciam diretamente no comportamento hidrogeotécnico da encosta. Esta seção se divide em dois tópicos principais: a avaliação geológica e hidrogeológica local (3.1) e as investigações geológicas e geotécnicas (3.2).

3.1 Avaliação geológica e hidrogeológica local

A caracterização visual e estrutural dos taludes permitiu identificar feições marcantes da Formação Serra Geral, com destaque para a presença de fraturas verticais abertas, zonas intensamente intemperizadas e camadas de escória riódacítica altamente porosa. Essas estruturas geram zonas de infiltração preferencial, que conectam níveis mais profundos à superfície, condicionando o comportamento hídrico ao longo das encostas.

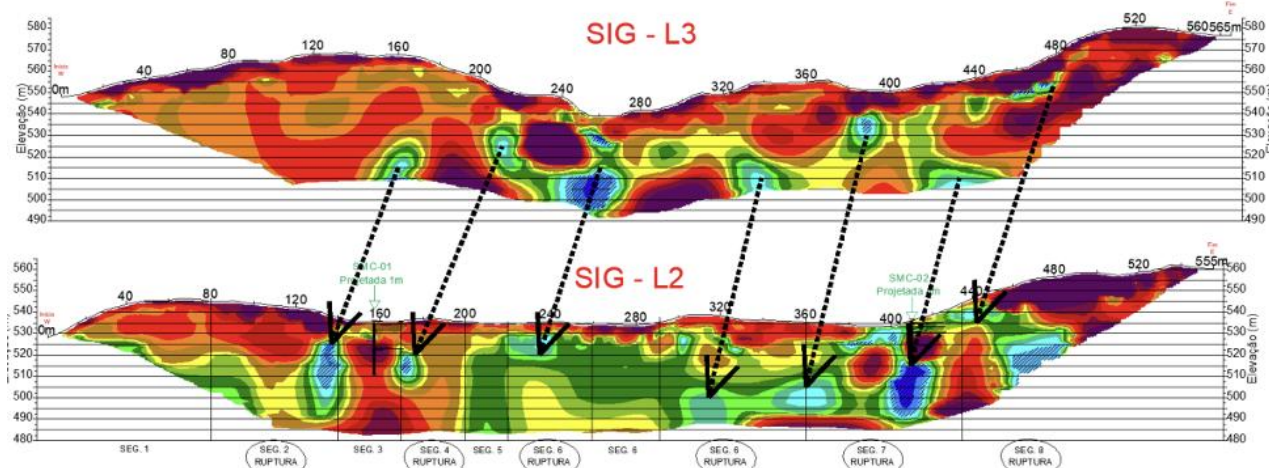


Figura 4. Interpretação da geofísica e geoestrutural das direções de fluxo, indicando as zonas de concentração de menor resistividade elétrica, ou seja, zona de contração de umidade (água ionizada).

A morfologia em degraus das encostas é compatível com a presença de derrames sobrepostos, cada um com fácies distintas, ora mais densas e pouco fraturadas (basaltos), ora com textura vesicular, escoriácea e menor resistência. O acúmulo de água em interfaces geológicas distintas, associado à presença de camadas altamente permeáveis sobre outras de menor permeabilidade, cria zonas de sobrepressão. A água pluvial tende a se infiltrar rapidamente nas zonas fraturadas e escoriáceas, acumulando-se junto a interfaces entre camadas, gerando acúmulo localizado de poro-pressão e favorecendo o surgimento de zonas críticas para instabilidade.

Durante as campanhas de campo foram observados molhamentos localizados e surgências intermitentes, que coincidem com zonas de escória e de fraturas conectadas ao sistema de drenagem natural da encosta. Tais observações foram corroboradas pelos dados de eletrorresistividade apresentados por Marchiorreto et al. (2024), que indicam zonas de baixa resistividade associadas à presença de materiais porosos e fraturados. Isso



evidencia a relevância do regime hídrico subterrâneo e da sua relação com as descontinuidades geológicas no controle da instabilidade de taludes em litotipos vulcânicos intercalados (ver Figura 4).

3.2 Investigações geológicas e geotécnicas

As investigações realizadas no trecho estudado incluíram a execução de nove sondagens rotativas com recuperação de testemunhos contínuos, posicionadas ao longo do talude para interceptar diferentes litologias e verificar a presença de camadas escoriáceas e tufáceas.

Complementarmente, foram conduzidas campanhas de geofísica rasa, com foco em eletrorresistividade, por meio da técnica de Seção de Imageamento Geofísico (SIG), totalizando seis perfis distribuídos paralelamente à rodovia. Estima-se que o comprimento total dos perfis geofísicos executados na área seja da ordem de 2.000 metros lineares, conforme interpretado a partir do relatório de geofísica (Marchiorreto et al., 2024). Os perfis foram posicionados entre as progressivas 75 m e 120 m ao longo da rodovia, com comprimentos efetivos de cerca de 28 m por perfil, com espaçamento de eletrodos de 2,5 m. Os resultados permitiram identificar zonas de baixa resistividade ($< 100 \text{ Ohm.m}$), associadas a materiais mais porosos e/ou saturados, e zonas de alta resistividade ($> 400 \text{ Ohm.m}$), associadas a rochas basálticas pouco alteradas. Os modelos de inversão 2D gerados permitiram a interpretação das variações laterais e verticais da condutividade, servindo como base para a interpolação de camadas e estruturas não acessíveis diretamente pelas sondagens. Durante a execução das sondagens, observou-se que os materiais escoriáceos ácidos apresentam baixa compacidade e elevada porosidade, com ocorrência de fragmentos vesiculados, cor clara e textura friável. A caracterização tátil-visual, aliada à descrição estratigráfica dos testemunhos, confirmou a presença intercalada desses depósitos com derrames basálticos maciços. As espessuras dessas camadas variam conforme a localização ao longo do talude, podendo atingir valores expressivos em zonas de acúmulo de material piroclástico, conforme identificado nos registros de campo e perfis estratigráficos dos relatórios técnicos (Marchiorreto et al., 2024).

A análise estrutural dos testemunhos (ver exemplo na Figura 5) e das feições observadas em campo revelou contatos angulosos, zonas brechadas e fraturas subverticais abertas, frequentemente preenchidas por materiais de alteração. As fraturas se mostram conectadas, verticalmente e lateralmente, permitindo fluxo preferencial de água subterrânea, o que é compatível com a ocorrência de níveis freáticos suspensos. As descrições de campo e os resultados de eletrorresistividade foram integrados para construção de seções interpretativas. Tais seções permitiram identificar a alternância litológica e os pontos críticos de saturação ao longo da encosta. Em alguns furos, notou-se percolação contínua logo após a perfuração, indicando a presença de zonas altamente permeáveis.

Essas informações serviram como base para a definição de um modelo geotécnico representativo da encosta, com foco na compreensão da resposta hidráulica das unidades geológicas frente à recarga intensa observada durante os eventos extremos de 2024. A definição de zonas críticas contribuiu para a elaboração do modelo geológico-geotécnico do ponto avaliado e permitiu a simulação de diferentes cenários de saturação e instabilidade ao longo da encosta. A definição de zonas críticas, contribuíram para a elaboração do modelo geológico-geotécnico do ponto avaliado e permitiram a simulação de diferentes cenários de saturação e instabilidade ao longo da encosta.

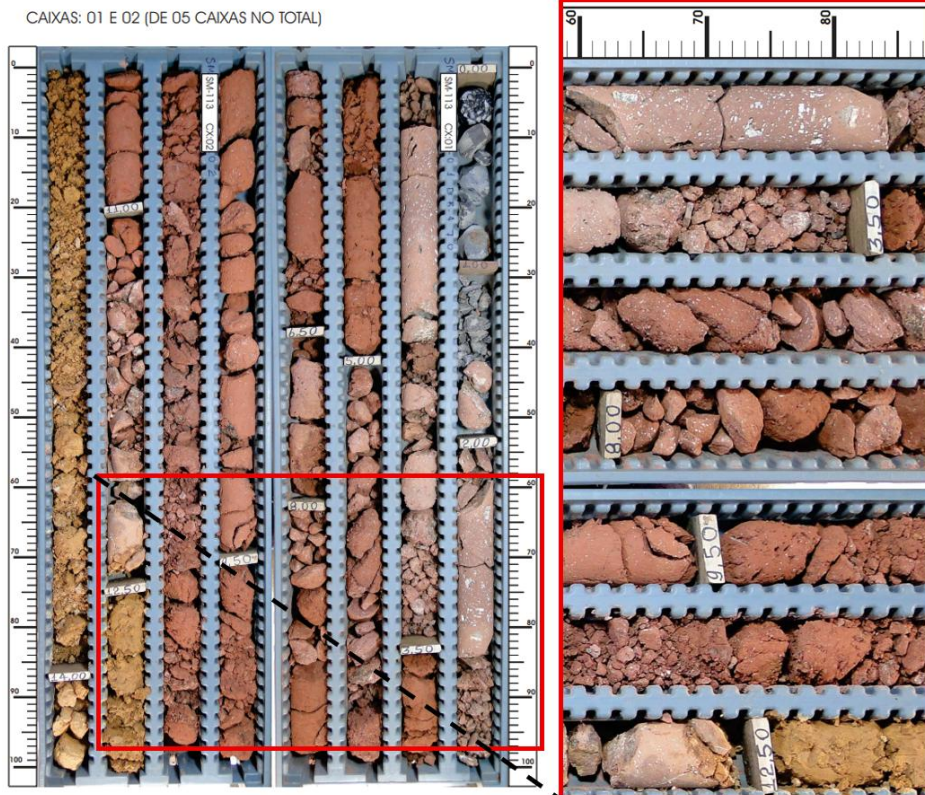


Figura 5. Caixa de testemunho de uma das sondagens identificando a textura das rochas locais.

4 CARACTERÍSTICAS HIDRO GEOTÉCNICAS NO AMBIENTE DE ESTUDO

A partir da integração das informações geológicas, geofísicas e geotécnicas descritas nos capítulos anteriores, foi possível identificar um conjunto de características hidrogeotécnicas peculiares que condicionam fortemente a instabilidade do talude no km 200 da BR-470/RS. O trecho apresenta feições que revelam um sistema geológico intensamente compartimentado, no qual as condições litológicas e estruturais se combinam para formar um meio poroso e fraturado, altamente influenciado pelo regime hídrico local.

Os esquemas das Figuras 6 e 7 mostram as feições observadas em campo.

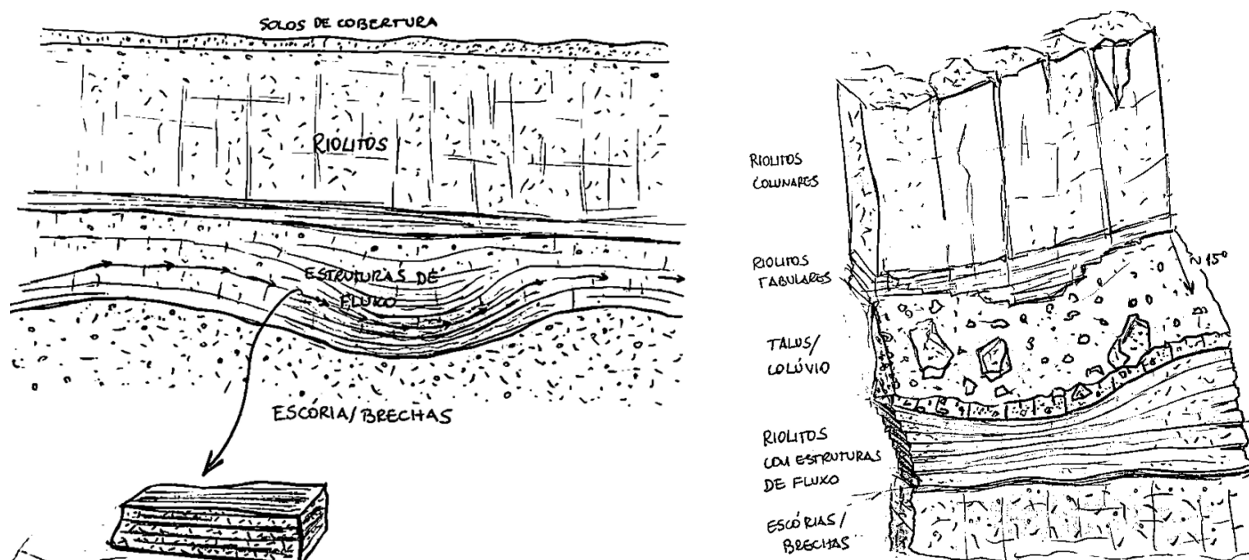


Figura 6. Interpretação das feições de fácies geológicas expostas nas encostas junto aos cortes da BR-470.

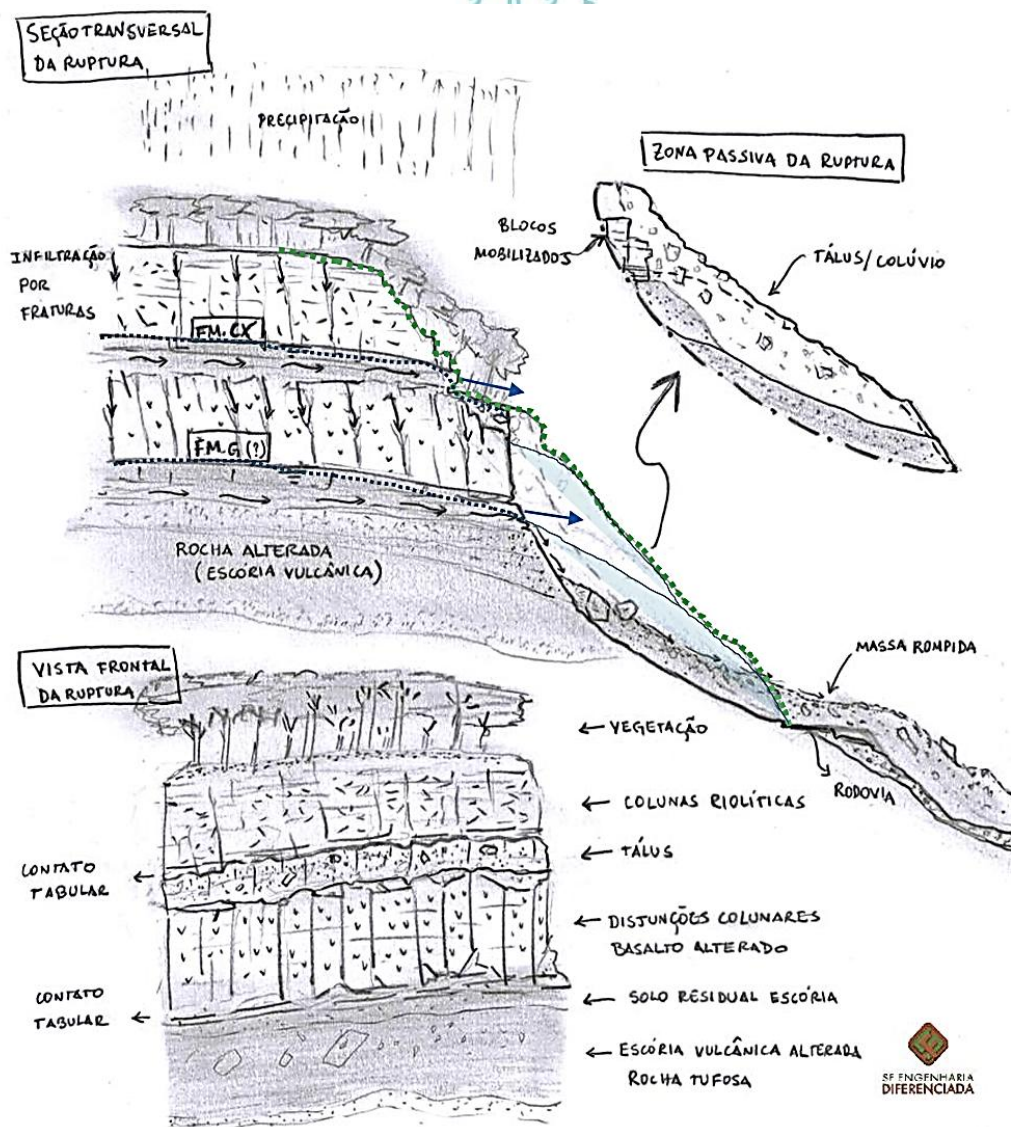


Figura 7. Seção transversal representativa das orientações hidrogeotécnicas e das feições geológicas locais junto al km 200 da BR-470.

A presença de camadas escoriáceas de origem riodacítica, identificadas por sua textura porosa, baixa coesão e coloração clara, associadas a zonas de fraturamento e brechas estruturais, constitui um dos principais fatores de vulnerabilidade geotécnica da encosta. Esses materiais, menos densos e mais suscetíveis à saturação, ocorrem intercalados a derrames basálticos mais competentes, criando contatos litológicos marcantes, que favorecem a concentração de tensões e o surgimento de caminhos preferenciais de fluxo, destacados nas Figuras 5 e 6.

A resposta hidráulica desses taludes é governada pela presença de descontinuidades estruturais abertas, como fraturas subverticais e planos de fluxo, que atravessam o corpo rochoso e promovem o escoamento vertical da água até camadas menos permeáveis. Esse fenômeno favorece a formação de níveis freáticos suspensos e zonas de acúmulo de água, cuja elevação abrupta durante eventos extremos de chuva leva à geração de poro-pressões elevadas e perda de resistência efetiva nos solos residuais e coluviais presentes na interface entre o material rochoso e os depósitos superficiais.

As sondagens rotativas confirmaram a percolação contínua de água em profundidade, especialmente em zonas coincidentes com os setores de menor resistividade elétrica identificados nos perfis SIG (Marchiorreto et al., 2024). Essas zonas apresentam condutividades elevadas, compatíveis com materiais alterados e/ou saturados, revelando importante conectividade hidráulica no interior da encosta.

Além disso, as análises indicam que os depósitos escoriáceos funcionam como “trampolins hidráulicos”, acelerando a ascensão capilar e promovendo zonas de alagamento interno em diferentes profundidades. A



litologia ácida desses materiais, por sua vez, apresenta alta susceptibilidade à alteração química, agravando a redução da coesão interna dos depósitos e favorecendo sua ruptura por perda progressiva de resistência.

Outro aspecto observado é a morfologia escalonada da encosta, que reflete a disposição dos derrames e a compartimentação estrutural. Essa morfologia induz a formação de microbacias de saturação, especialmente nas superfícies de contato entre diferentes fácies. A combinação entre recarga intensa, acúmulo em zonas de baixa permeabilidade e deficiências na drenagem superficial contribui para um aumento significativo da instabilidade geral do maciço.

Essas características, combinadas ao intenso evento pluviométrico registrado em 2024, explicam a sequência de rupturas observadas no trecho da rodovia. Fica evidente que os mecanismos de instabilidade não são apenas superficiais, mas controlados por um regime hidrogeológico interno complexo, sensível a variações de carga hidráulica e à presença de materiais litologicamente frágeis.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo evidenciou a complexidade hidrogeotécnica do segmento da BR-470/RS no km 200, inserido na Formação Serra Geral, destacando a interação entre litologia, estrutura e dinâmica hídrica como fator crítico para a instabilidade de taludes. A combinação entre camadas escoriáceas ácidas, altamente porosas e pouco coesas, com derrames máficos mais competentes, cria uma condição litológica altamente heterogênea, agravada pela presença de fraturas abertas e planos de fluxo que facilitam a percolação e o acúmulo de água.

As investigações geofísicas e geotécnicas demonstraram que essas condições litológicas e estruturais favorecem a formação de níveis freáticos suspensos e zonas de sobrepressão hidráulica, que atuam como agentes gatilho para processos de ruptura. A elevada condutividade elétrica observada nos perfis SIG, combinada à observação de percolação contínua nas sondagens, confirma a existência de conectividade hidráulica entre os horizontes mais superficiais e as camadas mais profundas da encosta.

A recorrência de rupturas no trecho estudado, intensificada durante os eventos pluviométricos extremos de 2024, demonstra que os mecanismos de instabilidade presentes vão além de simples processos superficiais, exigindo abordagem integrada que considere o regime hídrico subterrâneo, a compartimentação estrutural e a variabilidade litológica.

A abordagem utilizada neste trabalho, integrando dados de campo, sondagens rotativas, imageamento geofísico e interpretação geológica, permitiu construir um modelo conceitual robusto das condições que favorecem a instabilidade da encosta. Esse modelo é essencial para subsidiar projetos de contenção e estabilização futuros, bem como para o desenvolvimento de estratégias de monitoramento e gestão de risco em rodovias inseridas em áreas geologicamente complexas.

Recomenda-se que intervenções futuras considerem o comportamento hidráulico das camadas escoriáceas, a presença de zonas de fratura conectadas e a necessidade de sistemas de drenagem profunda e interceptação eficiente de fluxos subterrâneos, de forma a reduzir a suscetibilidade a novos episódios de ruptura frente a eventos extremos.

AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem a SEEL Engenharia, ao DNIT e todas as demais instituições envolvidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CPRM (2020) Serviço Geológico do Brasil. *Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750.000.*
- DNIT (2024). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Relatórios Técnicos na BR-470/RS – km 200+640.*
- Floriano, C. (2017). *Mecânica dos Solos Aplicada*. Volume Único. Porto Alegre: Editora Sagah.
- Marchiorreto, A., Machado, Rodrigo (2024) e outros autores. *Levantamento geofísico pelo método eletrorresistivo (imageamento geoelétrico) para subsidiar projeto de mitigação de deslizamentos na rodovia br470 – ponto 11 – Bento Gonçalves.*
- SBG (2023) Sociedade Brasileira de Geologia. *Formação Serra Geral: aspectos petrográficos e tectônicos.* Anais do Congresso Brasileiro de Geologia.