

Estabilização de talude rodoviário no km 297 da BR-386/RS após catástrofe climática de 2024

Cleber Floriano

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

Flávio Ramos

Geotécnico, CCR Rodovias, São Paulo, Brasil, flavio.ramos@motiva.com.br

Emily Quevedo

Acadêmica, SF Engenharia Diferenciada, Porto Alegre, Brasil, emily@souzafloriano.com

RESUMO: Este trabalho descreve o processo de investigação, diagnóstico e estabilização de um talude rodoviário no km 297 da BR-386/RS, colapsado após os eventos pluviométricos extremos ocorridos em abril de 2024. O maciço, implantado sobre colúvios espessos associados à Formação Serra Geral, apresentou ruptura total da plataforma, exigindo medidas emergenciais e engenharia geotécnica integrada. A abordagem adotada incluiu escavação de alívio, abertura de faixa provisória de tráfego e posterior campanha de investigação composta por sondagens mistas, ensaios SPT, geofísica por eletrorresistividade e instrumentação com piezômetros, inclinômetros e marcos superficiais. A retroanálise permitiu identificar a superfície de ruptura e confirmou o papel determinante da elevação do nível freático. A solução definitiva foi baseada na execução de chave drenante granular interceptando a ruptura, berma de enrocamento para contrapeso e recomposição do talude em aterro compactado, culminando na reconstrução da pista. Os dados instrumentais comprovaram a estabilização do talude após as intervenções. O caso ilustra a importância da modelagem geológica, uso de instrumentação e concepção por etapas em obras de estabilização de taludes afetados por eventos climáticos extremos.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros sobre colúvios, Estabilidade de taludes, Extremos climáticos

ABSTRACT: This study describes the investigation, diagnosis, and stabilization process of a highway slope located at km 297 of BR-386/RS, which collapsed following the extreme rainfall events in April 2024. The embankment, founded on thick colluvial deposits associated with the Serra Geral Formation, suffered a complete platform failure, requiring emergency actions and an integrated geotechnical approach. The adopted methodology included top relief excavation, temporary traffic lane implementation, and a comprehensive investigation campaign involving mixed borings, SPT tests, electrical resistivity geophysics, and the installation of piezometers and inclinometers. Back-analysis identified the failure surface and confirmed the critical role of the rising water table in triggering the landslide. The definitive solution comprised the execution of a granular drainage trench to intercept the failure plane, a rockfill berm to provide stabilizing weight, and gradual reconstruction of the slope using compacted fill. Final works included reconstruction of the southbound lane and complete platform reinstatement. Instrumentation data confirmed the post-intervention stability of the slope. This case highlights the importance of geological modeling, instrumentation, and phased engineering design in stabilizing landslide-prone slopes under extreme weather conditions.

KEYWORDS: Colluvial fills, Slope stability, Extreme weather events

1 INTRODUÇÃO

As chuvas extremas que atingiram o estado do Rio Grande do Sul em abril e maio de 2024 desencadearam um dos maiores desastres hidrológicos e geotécnicos registrados na história recente da região Sul do Brasil. Com volumes pluviométricos acumulados muito acima da média histórica, diversos segmentos rodoviários sofreram danos severos por escorregamentos, solapamentos e erosões, exigindo intervenções emergenciais e respostas técnicas rápidas (As Enchentes no RS, 2024).

Entre os pontos críticos está o km 297 da rodovia BR-386/RS, no município de Pouso Novo, onde ocorreu o colapso completo do talude de jusante e da plataforma da pista sul, interrompendo totalmente a trafegabilidade da via (SF Engenharia, 2024). O maciço instabilizado situa-se sobre colúvios antigos e depósitos de talus associados à borda leste da Formação Serra Geral, caracterizada por relevo acidentado e litologias de origem vulcânica intensamente intemperizadas (Perazzolo, 2003; Silveira, 2008).

Tais materiais, frequentemente recobertos por solos residuais pouco coesivos, tornam-se altamente suscetíveis à instabilização quando submetidos à saturação excessiva, como observado durante os eventos de 2024. A conjugação de fortes chuvas, solos frágeis e descontinuidades estruturais típicas das rochas basálticas intensificou a mobilização de massas e a propagação de fraturas (Silveira, 2008; Floriano et al., 2025). Diante da magnitude do dano e da urgência de restabelecimento da via, foi adotada uma abordagem em múltiplas etapas, combinando escavações de alívio, recomposição provisória de faixa de tráfego e posterior modelagem geotécnica detalhada. As etapas de investigação compreenderam sondagens mistas com ensaios SPT, levantamentos geofísicos por eletrorresistividade e instalação de instrumentação (inclinômetros, indicadores de nível d'água e marcos superficiais), o que possibilitou a identificação da superfície de ruptura, a análise do comportamento hidromecânico do maciço e a elaboração de um modelo conceitual de instabilidade (SF Engenharia, 2024).

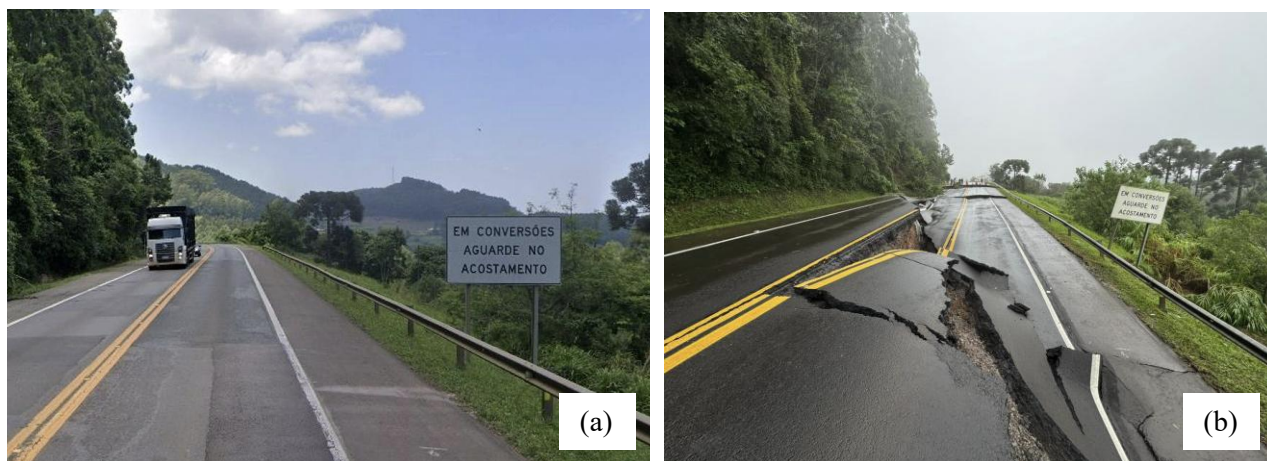


Figura 1. (a) Imagem do google Eath (2023) antes da ruptura. (b) imagem um dia após a ruptura.

Este artigo descreve o histórico da ruptura, os procedimentos adotados para diagnóstico e estabilização do talude bem como a solução de engenharia aplicada, que compreendeu a execução de chave drenante granular, berma de enrocamento e reconstrução da plataforma em aterro compactado. O caso representa um exemplo de atuação integrada da aplicação da geotécnica com verdadeira resposta emergencial, evidenciando a rápida tomada de decisão com auxílio da geofísica, da instrumentação e da interpretação geológica e hidrogeotécnica para formulação de soluções eficazes técnica e economicamente frente a eventos climáticos extremos.

2 ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS DO LOCAL

O segmento da BR-386 afetado pela ruptura situa-se no limite oriental da Bacia do Paraná, em domínio geológico caracterizado pela Formação Serra Geral, especificamente da formação Palmas. Esta unidade pertence ao conjunto de derrames basálticos do magmatismo mesozoico da Província Magmática do Paraná,

formada por espessas sequências de basaltos toleíticos intercaladas por níveis piroclásticos e estruturas de fraturamento marcantes (Perazzolo, 2003; CPRM, 2022).

Do ponto de vista estrutural, a região está submetida a uma densa rede de fraturas e disjunções prismáticas, associadas a processos de resfriamento e à tectônica tardia pós-derrames. A presença de fraturas subverticais orientadas preferencialmente segundo as direções N45°E e N70°W é frequentemente relatada na literatura e tem papel fundamental na compartimentação e instabilidade dos taludes naturais e escavados (Silveira, 2008; Floriano et al., 2025).

Do ponto de vista geomorfológico, o trecho insere-se na escarpa oriental do Planalto Meridional, com altitudes variando entre 440 m e 500 m, apresentando relevo fortemente dissecado por vales encaixados e escarpas de colúvios espessos. O padrão de drenagem predominante é do tipo dendrítico, com drenagens incisivas e orientadas segundo a estrutura geológica. O setor afetado é particularmente sensível à instabilidade devido à combinação entre alta declividade, baixa coesão dos solos e drenagem superficial deficiente.

A análise do mapa geológico local (ver figura 2) revela a ocorrência predominante de basaltos da Formação Serra Geral com coberturas de colúvios espessos e solos residuais derivados da alteração basáltica. Tais depósitos apresentam elevada variabilidade textural e mineralógica, com presença de níveis porosos, argilosos e blocos dispersos, condicionando diferentes respostas geotécnicas frente à saturação hídrica (Silveira, 2008; SF Engenharia, 2024).

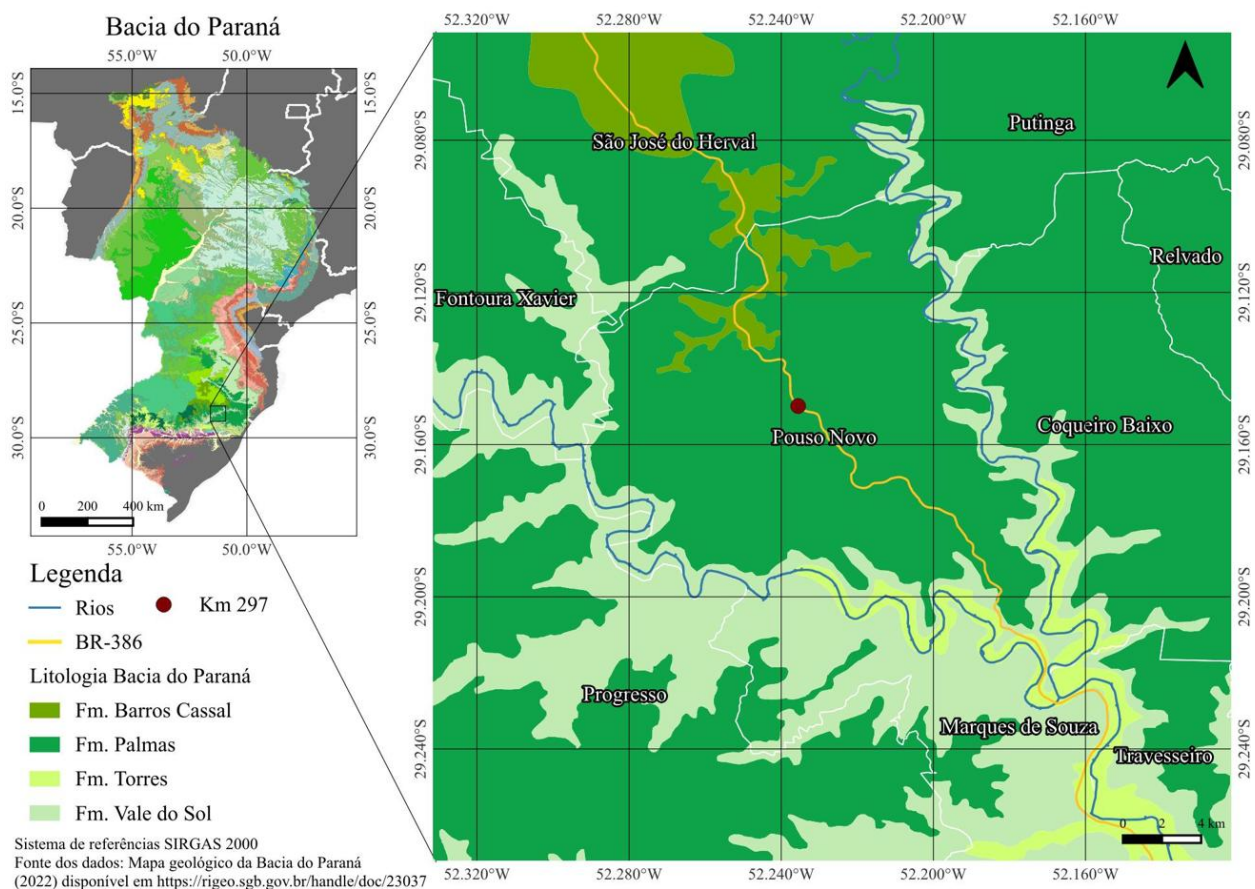


Figura 2. Localização perante o mapa geológico CPRM (2022).

Além disso, é possível identificar feições erosivas na base de alguns taludes, indicando processos de solapamento e aporte lateral de águas superficiais. A baixa eficiência da drenagem nos segmentos inferiores da encosta intensifica o acúmulo de umidade, contribuindo para a elevação do nível freático e consequente perda de resistência dos materiais. Observam-se também descontinuidades laterais do relevo, típicas de áreas de colapso prévio e reativação de rupturas antigas, o que confere uma complexidade adicional à modelagem e estabilização dos taludes.

A evolução geomorfológica da área favorece a formação de rampas coluviais e talus depositados junto à base de escarpas rochosas, acumulando materiais heterogêneos mal compactados. Esses depósitos atuam como unidades de baixa resistência e alta permeabilidade relativa, favorecendo o desenvolvimento de zonas

de concentração de fluxo subsuperficial. Essas condições promovem a formação de superfícies de ruptura rasas e translacionais, particularmente em episódios de elevada pluviosidade, como os de abril de 2024.

Os fatores estruturais locais, somados às características do relevo, ao regime pluviométrico acentuado e à ausência de obras de contenção pré-existentes adequadas, contribuem significativamente para o padrão recorrente de instabilidade verificado neste setor da BR-386.

3 DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA

3.1 Problemas congênitos locais

O talude rompido localiza-se sobre uma sequência espessa de colúvios antigos e solos derivados da alteração de basaltos da Formação Serra Geral, caracterizados por elevada heterogeneidade e baixa resistência mecânica quando saturados. A topografia acentuada e o acúmulo de detritos nas vertentes favorecem a formação de depósitos de talus com blocos, finos e material argiloso, gerando um meio pouco consolidado e suscetível a instabilidades superficiais e profundas (Silveira, 2003; Floriano et al., 2025).

A ausência de estruturas drenantes profundas e a predominância de solos com baixa permeabilidade lateral contribuíram para a ascensão do nível freático durante o evento de abril de 2024, promovendo a perda de resistência efetiva do maciço. As fraturas e descontinuidades nas rochas de fundo, observadas em investigações diretas e indiretas, funcionaram como caminhos preferenciais para percolação, favorecendo a formação de zonas críticas com acúmulo de pressão intersticial.

Adicionalmente, foram identificadas superfícies antigas de instabilidade, com possível reativação durante os períodos de chuvas intensas, o que revela a natureza cíclica das rupturas no local. Esse comportamento recorrente indica um contexto geotécnico crítico, com fragilidade intrínseca ao arranjo geomorfológico e litológico da encosta.

3.2 Diagnóstico

O diagnóstico da ruptura baseou-se na integração de dados de sondagens mistas (percussão e rotativas), ensaios de campo, levantamentos geofísicos por eletrorresistividade e instrumentação. As informações permitiram identificar a geometria da superfície de ruptura e as condições de saturação do talude no momento do colapso (SF Engenharia, 2024).

Para a liberação parcial da rodovia foi realizado um diagnóstico preliminar, a partir de trincheiras de inspeção e observação em relação aos aspectos geológicos e geotécnicos. A Figura 3 (a) mostra a seção transversal esquemática que permitiu a liberação parcial da via, uma vez que foi constatada a possibilidade de apoiar parte da via em solo residual. A liberação ocorreu em questão de horas com tomada de decisões in loco. As Figuras 3 (b) observa-se a aberturas de mais 50 cm no terreno flanco direito.



Figura 3. (a) Seção transversal esquemática realizada para permitir o tráfego rodoviário parcial. (b) trinca do flanco direito da ruptura. (c) inspeção por trincheira com intuito de verificar profundidade do material coluvionar (ensaio providencial para liberação da via).

Posteriormente as sondagens revelaram camadas de solo coluvionar com espessura variável, sobrepostas a rocha alterada e, mais profundamente, a rocha sã. Observou-se a presença de materiais de baixa compactidade, com teores elevados de umidade e presença de blocos dispersos. A instrumentação instalada, composta por inclinômetros e indicadores de nível d'água, evidenciou deslocamentos progressivos ao longo de superfície inclinada, com profundidade média de ruptura estimada em torno de 10 metros.

A modelagem hidráulica indicou nível freático coincidente com a zona de ruptura no período anterior ao colapso, o que reforça o papel da saturação como fator determinante. Como pode ser observado na Figura 4, a geofísica corroborou a presença de descontinuidades subverticais nas rochas subjacentes (faixa vermelha), alinhadas com a superfície de ruptura. Em 4 (a) pode-se observar a presença de uma descontinuidade diagonal a pista sotoposta ao talus/colúvio e o aterro. Já em 4 (b) observa-se a imagem da ruptura que bloqueou a pista indicando a posição das Seções de Imageamento Geométrico (SIG). Esses resultados, em conjunto, permitiram a realização de retroanálises e o desenvolvimento de um modelo conceitual de instabilidade com alta coerência com os dados medidos em campo. A zona de descontinuidade apresenta permeabilidade mais baixa que o entrono, normalmente são diques alterados e argilosos. A ruptura envolveu o talus/colúvio e o aterro somente, entretanto, nota-se a interferência da saturação dos materiais com frente de descarga pelo flanco esquerdo da ruptura com se pode notar as cromáticas de baixas resistividade. Entende-se que este efeito advém da marcante atuação hidrogeológica dessa zona de falha.

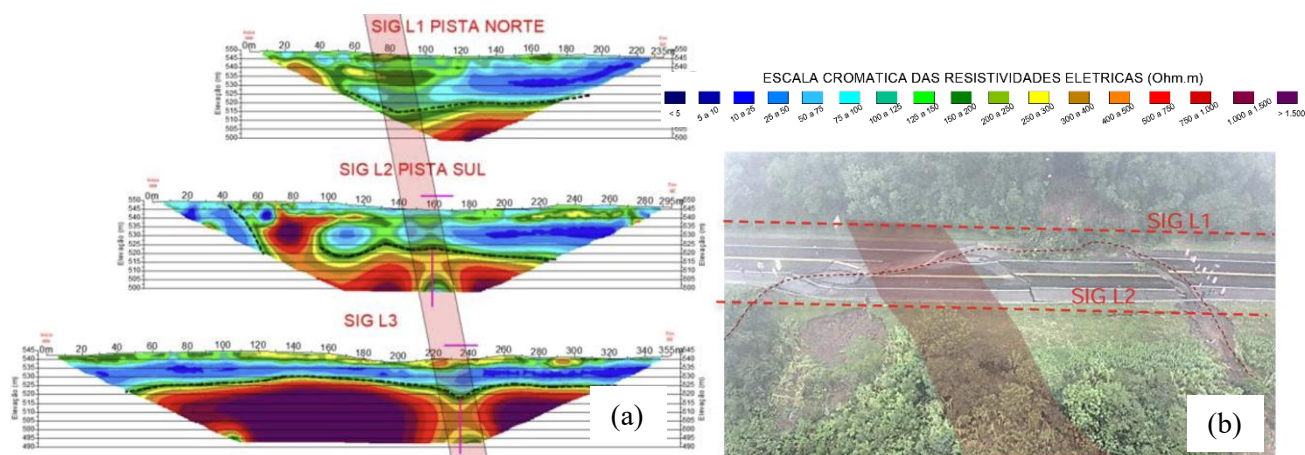


Figura 4. (a) Interpretação geológico-geotécnica a partir da geofísica de eletrorresistividade associada as sondagens invasivas. (b) imagem demarcando correlação do movimento de massa com a interpretação geofísica.

3.3 Parametrização

A definição dos parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade baseou-se na integração entre os dados de sondagens SPT, descrição litológica, comportamento de campo e referências bibliográficas específicas para solos coluvionares e residuais em encostas da Serra Geral (Perazzolo, 2003; Silveira, 2008). Os valores foram ajustados por meio de retroanálise com base nos deslocamentos medidos pelos inclinômetros e nas características da ruptura observada.

Foram adotados para o solo coluvionar valores de coesão entre 2 e 5 kPa e ângulo de atrito entre 23° a 25°. Já para o solo residual mais profundo, com presença de blocos e matriz argilosa compactada, foram considerados valores de coesão de 8 kPa e atrito entre 28°. Para a rocha alterada de fundo, admitiu-se comportamento rígido-friccional.

3.4 Instrumentação

A instrumentação instalada foi fundamental para o entendimento do comportamento da encosta ao longo do tempo. Foram instalados três inclinômetros e quatro indicadores de nível d'água, distribuídos ao longo do talude afetado. As leituras indicaram deslocamentos progressivos em torno de 10 mm/mês na fase inicial e posterior estabilização após as intervenções de escavação de alívio e drenagem.

Os dados hidrométricos mostraram elevação acentuada do nível d'água nos piezômetros, com tempo de resposta compatível com o avanço da ruptura. Essas informações embasaram os ajustes paramétricos utilizados nas modelagens e confirmaram a efetividade das soluções implantadas na contenção do processo de instabilização.

4 CONCEPÇÃO E SOLUÇÃO

A concepção da solução de engenharia para o talude do km 297 da BR-386 teve como premissas a segurança, a rapidez na execução e a adaptação às condições naturais da encosta. Após as retroanálises e confirmação da geometria da superfície de ruptura, adotou-se uma abordagem baseada na estabilização progressiva por etapas, com escavações controladas e execução de estrutura drenante. A execução foi conduzida pela empresa SEEL Engenharia, sob a contratação da CCR Via Sul.

Como detalhado na Figura 5 (de a até f), inicialmente, foi executada uma escavação de alívio na parte superior do talude, com retirada controlada de massa instabilizada e redução da sobrecarga no setor de ruptura. Em seguida, foi implantada uma chave granular com material britado, posicionada de forma a interceptar a superfície de ruptura previamente identificada. Essa chave funcionou como dreno profundo e elemento de travamento do corpo instável.

Sobre a chave, foi construída uma berm de enrocamento escalonada, visando conferir peso estabilizante ao talude inferior e permitir drenagem superficial e interna. A recomposição do talude foi feita em camadas compactadas. Posteriormente, procedeu-se à reconstrução da pista sul e ao preenchimento final da plataforma com material granular compactado.

A solução adotada buscou combinar reforço estrutural, controle de saturação e adaptação geométrica à topografia local, elevando progressivamente o fator de segurança até valores compatíveis com as normas técnicas e garantindo estabilidade mesmo sob condições de chuvas intensas futuras.

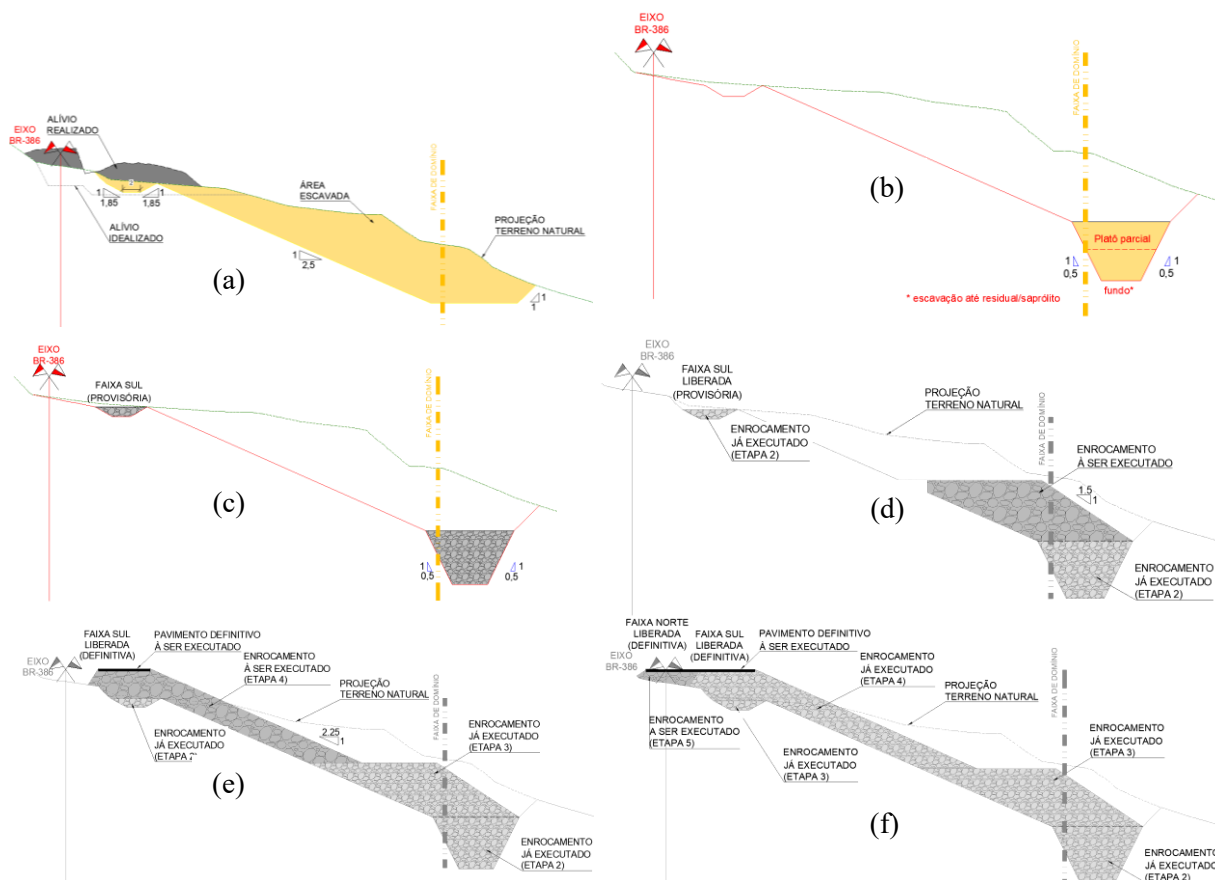


Figura 5. Indicação da sequência executiva.

5 EXECUÇÃO DAS OBRAS

A execução da obra de estabilização no km 297 da BR-386 seguiu as etapas definidas no projeto executivo (SF Engenharia, 2024), priorizando a segurança operacional, a agilidade de mobilização e a adaptação às condições de instabilidade do terreno.

A primeira ação consistiu na escavação de alívio do topo da encosta, removendo-se parte do material instabilizado acima da superfície de ruptura. Essa medida reduziu a sobrecarga no trecho crítico e permitiu o acesso à área para instalação de dispositivos de contenção. A escavação foi executada de forma escalonada, com monitoramento contínuo dos deslocamentos por meio dos inclinômetros instalados.

Na sequência, realizou-se a implantação da chave drenante granular, executada por meio da abertura de trincheira com largura média de 2,5 m e profundidade de até 10 m. O material empregado foi brita graduada, envelopada por geotêxtil, garantindo a interceptação do fluxo subterrâneo e o alívio das pressões de poro no interior do maciço. O corpo da chave foi executado com declividade compatível com a drenagem gravitacional em direção ao pé do talude.

Sobre a chave, foi construída a berma de enrocamento em patamares, com rochas de 0,50 m a 1,20 m de diâmetro. Essa berma atuou como elemento estabilizador, aumentando o peso na base do talude e promovendo o reequilíbrio das forças resistentes. O enrocamento também contribuiu para proteção superficial contra erosão e canalização de águas pluviais.



Figura 6. Fase parcial da obra com a execução da chave granular completa.



Figura 7. Imagem da obra finalizada.



Finalmente, foi realizada a reconstrução da pista sul da rodovia, com base em camada de brita graduada e pavimento flexível. O processo incluiu a reconstituição da plataforma com largura e inclinação adequadas, garantindo a segurança da trafegabilidade. Todo o processo foi acompanhado por equipe técnica em tempo integral, com atualização das leituras dos instrumentos instalados.

A obra foi concluída em prazo compatível com a urgência demandada pela interrupção total da rodovia, e os monitoramentos pós-intervenção confirmaram a estabilização do talude e a segurança da estrutura reconstruída. O sucesso da intervenção evidencia a importância da integração entre diagnóstico geotécnico, instrumentação e soluções adaptadas às condições locais.

6 CONCLUSÃO

A instabilidade registrada no km 297 da BR-386/RS em abril de 2024 ilustra de forma clara a vulnerabilidade de trechos rodoviários implantados sobre colúvios espessos em regiões de forte declividade e geologia complexa, particularmente diante de eventos climáticos extremos. A atuação integrada entre diagnóstico emergencial, investigação detalhada e concepção por etapas permitiu não apenas restabelecer a trafegabilidade da via, mas também proporcionar ganhos substanciais de segurança geotécnica.

As investigações conduzidas revelaram a presença de descontinuidades estruturais profundas e de materiais com baixa resistência à saturação, fatores que, associados à elevação súbita do nível freático, desencadearam a ruptura. A modelagem e retroanálise do processo confirmaram a eficácia da solução adotada, composta por escavação de alívio, chave drenante granular e recomposição com berma de enrocamento.

O sucesso da intervenção está fortemente associado à correta leitura das condições geológicas e hidrogeotécnicas locais e à utilização de instrumentação para validação do comportamento do maciço ao longo do tempo. O caso reforça a importância da abordagem adaptativa e em múltiplas fases como estratégia eficaz para a mitigação de riscos em taludes rodoviários inseridos em contextos morfogeológicos críticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CCR Rodovias, a CCR Via Sul, a SF Engenharia, a SEEL Engenharia e a todos os envolvidos nessa batalha incansável de retomada da infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assembleia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul. (2024). *As enchentes no RS: uma tragédia anunciada*. Porto Alegre, 68 p.
- Floriano, C.; Azambuja, E.; Trichel, D (2017). Caso histórico da recuperação da ERS-115 na ocorrência de dois movimentos de massa. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – XII COBRAE, Florianópolis, SC. Florianópolis. *Anais...* ABMS.
- Floriano, C.; Escarani da Silva, J. D.; Marchiorreto, A.; Pietrobon, D. (2025). Características hidro geotécnicas particulares da Formação Serra Geral em Bento Gonçalves – BR-470/RS. In: Conferência Brasileira sobre Encostas - XI COBRAE. Bento Gonçalves. *Anais...* ABMS.
- Perazzolo, L. (2003). *Caracterização geológica e geotécnica dos depósitos de encosta da região serrana nordeste do Rio Grande do Sul*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências / UFRGS.
- SF Engenharia. (2024). *Projeto Executivo – Recuperação Emergencial do Talude no km 297 da BR-386/RS*. Relatório Técnico SF2024-VS-BR386RS-0297.000_REV0. Porto Alegre. Documento interno.
- Silveira, R. (2003). *Propriedades geotécnicas dos solos coluvionares do gasoduto Bolívia-Brasil em Timbé do Sul (SC)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre / UFRGS.
- Silveira, R. (2008). *Comportamento geotécnico de um solo coluvionar de São Vendelino (RS)*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre / UFRGS.