

Monitoramento Geotécnico da Estabilização de Talude do km 68 na BR-459 (Sul de Minas): Análise Pré e Pós-Intervenções

Ricardo Mirisola

COO, MMF PROJETOS, São Paulo, Brasil, ricardo.mirisola@mmfprojetos.com.br

Guillermo Altrichter

Superintendente de Projetos Rodoviários, EPR, São Paulo, Brasil, guillermo.altrichter@eprtriangulo.com.br

Fernanda Castells

Diretora Projetos, MMF PROJETOS, São Paulo, Brasil, fernanda.castells@mmfprojetos.com.br

Felicia Erika Nascimento Costa

Engenheira de Projetos, EPR, Minas Gerais, Brasil, felicia.nascimento@eprsuldeminas.com.br

RESUMO: Este artigo técnico apresenta uma análise detalhada do comportamento geotécnico de um talude localizado na BR-459, na região Sul de Minas Gerais, com base em um programa de monitoramento realizado antes e após a implementação de uma solução de engenharia para estabilização. O estudo tem como objetivo avaliar a efetividade das medidas adotadas e fornecer subsídios para futuras intervenções em contextos geotécnicos similares. A metodologia envolveu a instrumentação geotécnica do talude previamente à intervenção, com a instalação de inclinômetros, indicadores de nível d'água e marcos superficiais. Durante a fase inicial, os dados coletados permitiram identificar os mecanismos de instabilidade e definir os parâmetros críticos de movimentação da encosta. Após a execução das obras de estabilização, o monitoramento foi retomado para quantificar a evolução das deformações, avaliar a resposta do nível freático e validar a adequação do projeto às condições geotécnicas locais. A análise comparativa dos dados obtidos pré e pós-intervenção demonstrou uma significativa redução das deformações e um melhor controle das condições de fluxo d'água subterrânea, refletindo diretamente na estabilidade do talude. Além disso, os resultados reforçam a importância da continuidade do monitoramento para prever possíveis reajustes na solução adotada e subsidiar futuras melhorias em projetos de estabilização. A manutenção da instrumentação geotécnica a longo prazo permitirá acompanhar a evolução do comportamento da encosta e otimizar práticas de gestão de riscos em rodovias sujeitas a instabilidade geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Instrumentação geotécnica, Estabilidade do talude, Gestão de riscos.

ABSTRACT: This technical paper presents a detailed analysis of the geotechnical behavior of a slope located along BR-459, in southern Minas Gerais, based on a monitoring program carried out before and after the implementation of a slope stabilization solution. The study aims to evaluate the effectiveness of the adopted measures and provide support for future interventions in similar geotechnical contexts. The methodology included geotechnical instrumentation prior to the intervention, with the installation of inclinometers, groundwater level indicators, and surface settlement markers. During the initial phase, the data collected allowed the identification of instability mechanisms and the definition of critical parameters related to slope movement. After the stabilization works were completed, monitoring was resumed to quantify deformation evolution, assess the response of the groundwater table, and validate the suitability of the design to local geotechnical conditions. The comparative analysis of the data obtained before and after the intervention demonstrated a significant reduction in deformations and improved control of groundwater flow, resulting in enhanced slope stability. Furthermore, the results highlight the importance of continuous monitoring to anticipate potential adjustments to the adopted solution and to support future improvements in stabilization projects. Long-term geotechnical instrumentation will enable the monitoring of slope behavior over time and contribute to the optimization of risk management practices on highways subject to geotechnical instability.

KEYWORDS: Geotechnical instrumentation, Slope stabilization, Risk management.

1 INTRODUÇÃO

A BR-459, localizada na região Sul de Minas Gerais, constitui um importante corredor rodoviário para a integração regional, o escoamento da produção e a mobilidade da população. Em trechos montanhosos, como na Serra do km 68, a segurança geotécnica é fator crítico para a manutenção da operação plena da rodovia, especialmente durante períodos de chuvas intensas, que elevam o risco de escorregamentos e comprometem a integridade das plataformas viárias.

Durante o verão de 2022/2023, a região foi atingida por um período de chuvas intensas e prolongadas, com acumulados superiores à média histórica. Esse cenário resultou na ruptura repentina do talude localizado no km 68, que apresentou colapso da plataforma, abertura de trincas extensas, recalques significativos e surgência de água na encosta. Diante da gravidade do evento, a rodovia foi imediatamente interditada, sendo iniciadas ações emergenciais para contenção provisória e recuperação da mobilidade do trecho afetado.

Este artigo apresenta a análise do comportamento geotécnico do talude do km 68 da BR-459, com base em um programa de monitoramento desenvolvido em duas fases: diagnóstico pré-obra e acompanhamento durante e após as intervenções. São discutidos os dados obtidos por meio de inclinômetros, marcos superficiais e indicadores de nível d'água, bem como os critérios adotados para o projeto da solução de estabilização. A análise comparativa dos dados pré e pós-intervenção visa evidenciar a efetividade das obras realizadas e fornecer subsídios para futuras ações em contextos geotécnicos similares em rodovias concessionadas.

2 CARACTERIZAÇÃO DO EVENTO DE RUPTURA

O escorregamento ocorrido no km 68 da BR-459/MG foi classificado como um movimento de massa do tipo rotacional profundo, envolvendo grande volume de solo e resultando no colapso total da plataforma rodoviária, inclusive parte do acostamento. O evento ocorreu após um período de chuvas intensas e acima da média histórica, o que levou à interdição imediata da via e à mobilização emergencial da concessionária.

Do ponto de vista geotécnico, o talude afetado encontra-se sobre uma sequência de solos com baixa capacidade geotécnica, predominantemente argilosos, com baixa compactação natural, elevada plasticidade e condutividade hidráulica heterogênea. Esses materiais, típicos de áreas de talvegue, apresentam sensibilidade elevada à variação de umidade e baixa resistência ao cisalhamento quando saturados. Além disso, observou-se fluxo intenso de água subterrânea na região da ruptura, associado à presença de bueiros transversais de 60 cm com danos em sua base e trincas nos dispositivos de captação. Essa condição favoreceu a infiltração de água no maciço e o fenômeno de piping, com escoamento de sedimentos entre matacões, tanto a jusante quanto a montante da pista. A heterogeneidade do solo coluvionar granítico e a presença de solo aluvionar de baixa competência sob o aterro, identificada em sondagem junto ao talvegue, contribuíram para a instabilização e acomodação das camadas de solo.

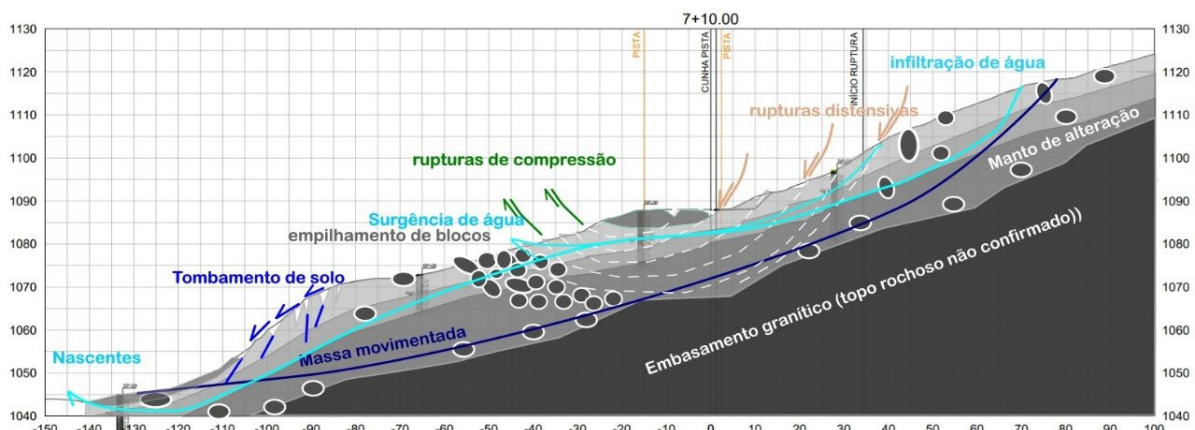


Figura 1. Seção esquemática do km68.

A Figura 2 ilustra o comparativo de precipitações acumuladas nas últimas décadas, destacando o volume atípico do verão de 2022/2023. Esse aumento abrupto da umidade favoreceu a percolação de água pelo maciço e contribuiu para o comprometimento da estabilidade global do talude, como evidenciado pelos registros de campo, que mostraram fissuras longitudinais, recalques diferenciais e abatimento da plataforma.

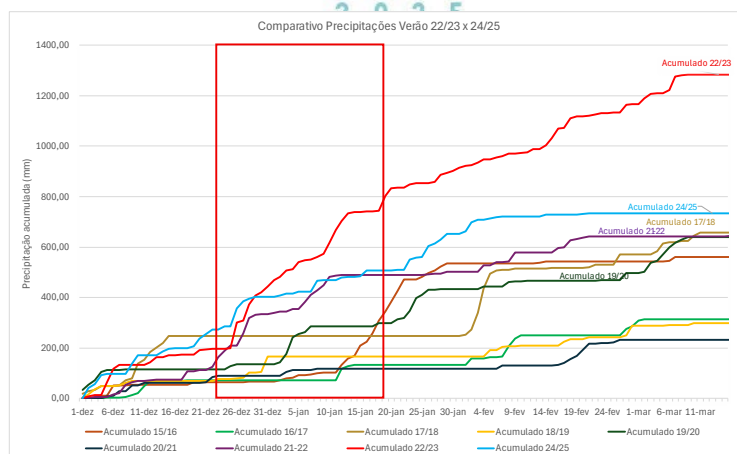


Figura 2. Comparativo de precipitações acumuladas entre dezembro e março dos últimos 10 anos na região do Sul de Minas Gerais – Estação Pluviométrica Ipuíuna (Sensorii).

Esse aumento abrupto da umidade promoveu percolação intensa de água no interior do talude, comprometendo sua estabilidade. As consequências foram observadas sob a forma de abatimentos generalizados, fissuras longitudinais e perda de suporte da plataforma, como evidenciado pelos registros de campo.



Figura 3. Registros fotográficos – Ruptura do km68.

A confirmação da profundidade da ruptura ocorreu posteriormente, com base nos dados dos inclinômetros, que registraram deslocamentos concentrados entre 7,5 m e 8,5 m de profundidade. Considerando a complexidade geotécnica do local, foi estruturado um plano de instrumentação dividido em fases, com o objetivo de compreender o comportamento da encosta ao longo do tempo. A instrumentação inicialmente focou no diagnóstico e mapeamento da instabilidade, subsidiando o projeto de estabilização. Posteriormente, foi ampliada para acompanhar o desempenho da obra e monitorar a segurança estrutural do trecho após sua liberação, contribuindo para a validação da solução adotada.

3 METODOLOGIA DE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

3.1 Objetivos do Monitoramento

A instrumentação geotécnica foi aplicada como ferramenta fundamental para o diagnóstico detalhado da instabilidade no km 68 da BR-459, subsidiando a definição da solução técnica mais adequada e permitindo o acompanhamento da evolução do comportamento do talude ao longo das etapas da obra. Na sua primeira fase, o monitoramento teve como foco principal compreender os mecanismos envolvidos na ruptura e orientar tecnicamente o projeto de estabilização. Por meio da instrumentação, buscou-se identificar a causa raiz do escorregamento, caracterizando os agentes geotécnicos e hidráulicos que atuavam na encosta. Também foi possível mapear as áreas críticas, delimitando a profundidade da superfície de ruptura e os pontos com maior potencial de mobilidade. Além disso, as leituras iniciais contribuíram para avaliar a influência da variação do

nível d'água na instabilidade observada, fator este que se confirmou como determinante no colapso da plataforma.

Em sua segunda fase, a instrumentação teve papel complementar e igualmente relevante, com foco na verificação de desempenho e validação da solução. Durante a execução das obras, os instrumentos foram progressivamente reinstalados à medida que os trabalhos avançavam. Nessa etapa, o objetivo principal foi garantir a segurança estrutural no processo construtivo, monitorando possíveis movimentos residuais e a resposta imediata da encosta às escavações e reaterros. Após a conclusão das intervenções, o monitoramento foi mantido com o intuito de validar a eficácia das soluções adotadas, verificar a estabilidade alcançada e identificar possíveis comportamentos residuais que pudessem indicar a necessidade de ajustes no sistema de contenção.

3.2 Instrumentos Instalados

A instalação dos instrumentos foi iniciada em março de 2023, sendo conduzida em duas fases distintas, sendo a primeira fase a pré-obra, e a segunda durante e pós intervenção. A instrumentação contemplou:

- Inclinômetros: utilizados para registrar deslocamentos horizontais e delimitar a profundidade da superfície de ruptura.
- Marcos superficiais: instalados para monitorar recalques e deformações verticais na superfície do terreno.
- Indicadores de nível d'água: empregados para mensurar a variação do nível freático e sua correlação com os períodos de maior instabilidade.

4 DIAGNÓSTICO GEOTÉCNICO COM BASE NOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO PRÉ INTERVENÇÃO

As leituras da instrumentação implantada na fase de diagnóstico foram essenciais para a caracterização do mecanismo de ruptura e a definição da estratégia de estabilização. Os inclinômetros registraram deslocamentos horizontais entre 7,5 m e 8,5 m de profundidade, cujas leituras até a data de 10 de maio de 2023 são apresentadas na figura 4, indicando a presença de uma superfície de ruptura rotacional profunda. A configuração das leituras confirmou a hipótese levantada na etapa de inspeção visual, atribuindo o escorregamento à perda de resistência ao cisalhamento causada por saturação do solo.

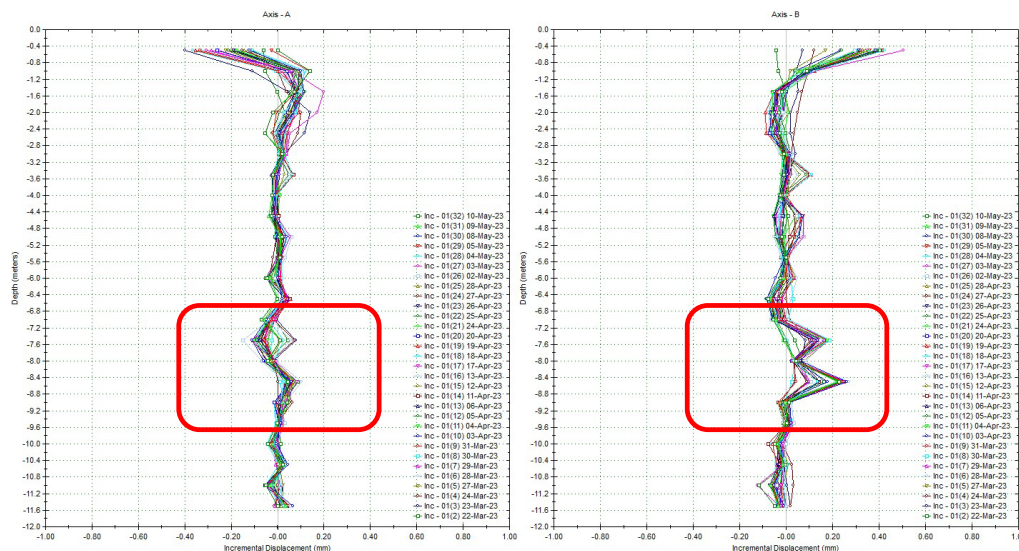


Figura 4. Perfil de deslocamento típico do inclinômetro, com destaque para o intervalo de 7,5 a 8,5 m de profundidade.

Os marcos superficiais indicaram recalques progressivos, com deformações verticais mais acentuadas nas regiões próximas à ruptura e ao eixo da pista (até 420 mm no período de acompanhamento até o início da

obra). Os deslocamentos apresentaram correlação direta com os períodos de chuvas intensas, evidenciando a influência das variações do nível freático na evolução da instabilidade.

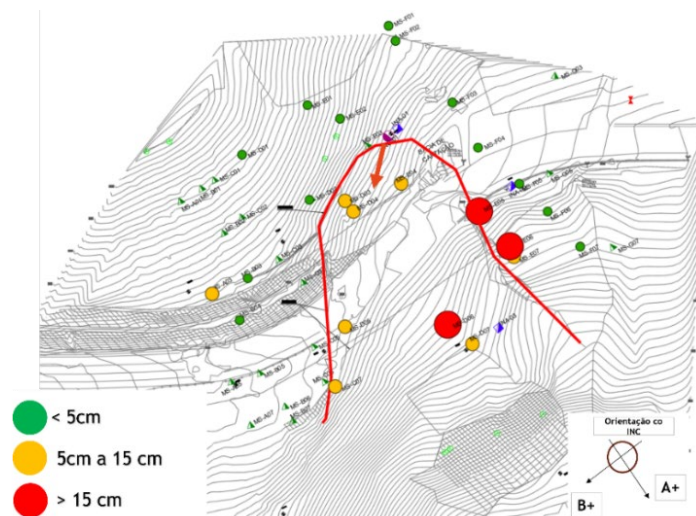


Figura 5. Magnitude acumulada dos deslocamentos dos marcos superficiais.

Complementarmente, os medidores de nível d'água instalados demonstraram variações significativas no nível d'água ao longo do tempo, com oscilações aderentes aos eventos de chuva. Esse comportamento reforça o papel crítico da drenagem deficiente como fator desencadeante do processo de ruptura. A integração dos dados obtidos permitiu classificar o evento como um escorregamento rotacional profundo, cuja extensão e profundidade foram delimitadas com precisão. Com isso, foi possível direcionar os esforços de estabilização para o talude de montante, enquanto o de jusante permaneceu sob acompanhamento.

5 SOLUÇÃO TÉCNICA EXECUTADA E MONITORAMENTO PÓS-OBRA

Diante da magnitude do escorregamento no km 68 da BR-459/MG, a definição da solução técnica considerou como prioridade a liberação rápida e segura da rodovia, com intervenções que apresentassem menor risco construtivo e alta confiabilidade geotécnica. A resposta adotada foi estruturada em três etapas principais, com planejamento integrado entre a concessionária EPR Sul de Minas e os órgãos de controle técnico, como o DER-MG.

5.1 Etapa 1 – Intervenção Emergencial

A primeira etapa consistiu na alteração do traçado da rodovia, dentro dos limites de velocidade estabelecidos, em sentido ao talude de montante, afastando-se da zona de ruptura principal. O solo de baixa capacidade de suporte saturado, identificado tanto em investigações realizadas, quando durante a escavação no local, foi escavado até aproximadamente 6,0 m de profundidade e substituído por camadas de rachão compactado. Essa substituição reduziu os recalques e aumentou a resistência do maciço, especialmente na zona de interferência da rodovia. A medida foi acompanhada pela implantação de um sistema de drenagem profunda, incluindo valetas de crista e pé de talude, trincheiras drenantes e drenos horizontais profundos (DHPs), com o objetivo de reduzir a pressão neutra e estabilizar a encosta. Com essas ações, a pista foi liberada para tráfego em 120 dias após a interdição.

5.2 Etapa 2 – Estabilização Definitiva do Talude de Montante

A segunda etapa consistiu na execução de contenção definitiva em solo grampeado no talude de montante, com inclinação reconfigurada para 1V:1,5H e instalação de bermas intermediárias a cada 4 metros. Essa geometria buscou reduzir tensões internas e melhorar o escoamento superficial. Complementaram-se os serviços com escadas hidráulicas em gabião, canaletas de bordo, recomposição paisagística com hidrossemeadura, sinalização e readequação do traçado.

5.3 Etapa 3 – Monitoramento dos Taludes

Após a conclusão das obras de estabilização no talude de montante, a estratégia técnica adotada envolveu a manutenção e a ampliação do programa de instrumentação geotécnica, com o objetivo de verificar o desempenho da solução implantada ao longo do tempo e acompanhar o comportamento geral do maciço, incluindo o talude de jusante. A figura 6 indica a locação dos instrumentos instalados.

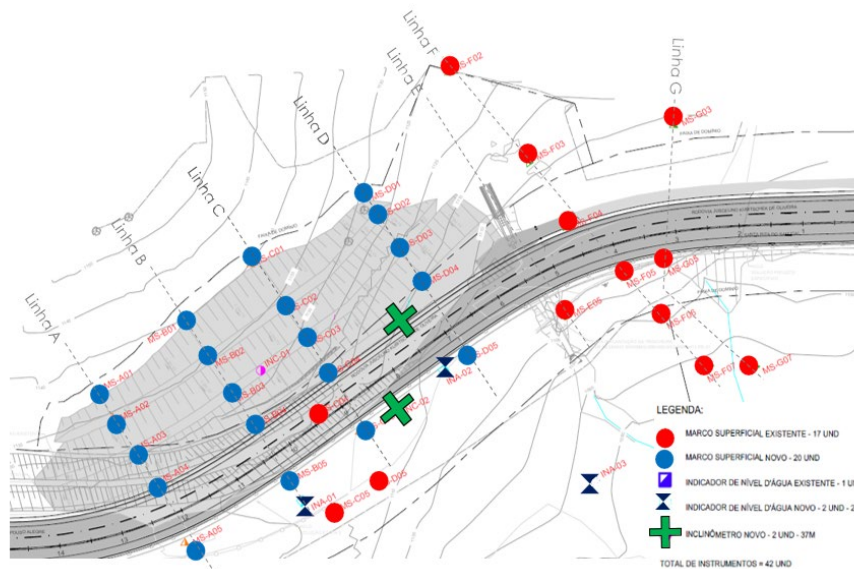


Figura 6. Locação dos instrumentos de monitoramento geotécnico instalados no km 68.

A leitura dos marcos superficiais demonstrou movimentações não superiores a 22 mm, concentradas nas áreas de menor intervenção a jusante. Já para um mesmo ponto locado no talude de montante, com três meses de medição pré-obra, houve o recalque de aproximadamente 41,85 cm, enquanto em 15 meses de acompanhamento pós-obra, o mesmo ponto variou apenas 1,32 cm; uma taxa 160 vezes menor, conforme indicado na tabela 1. Essas movimentações são compatíveis com recalques de ajuste ou deformações naturais do terreno, sem impacto significativo sobre a segurança ou estabilidade da plataforma.

Tabela 1. Taxa de recalque de marco superficial a montante antes e pós obra.

Período	Meses	Recalque Acumulado (mm)	Taxa (mm/mês)
Pré-obra de 14/03/2023 a 08/05/2023	~3	418,5	139,5
Pós-obra de 08/03/2024 a 20/06/2025	~15	13,2	0,8

Os inclinômetros, por sua vez, registraram deslocamentos horizontais com velocidades inferiores a 0,02 mm/dia, correspondendo, em média, a 7 mm/ano. Esses valores se concentram em trechos residuais da encosta não abrangidos pelas obras de contenção. A interpretação desses dados, à luz da classificação de Cruden e Varnes (1996), enquadra o comportamento como uma movimentação muito lenta (como mostrado na tabela 2), o que é tecnicamente compatível com uma encosta estável em condições operacionais seguras.

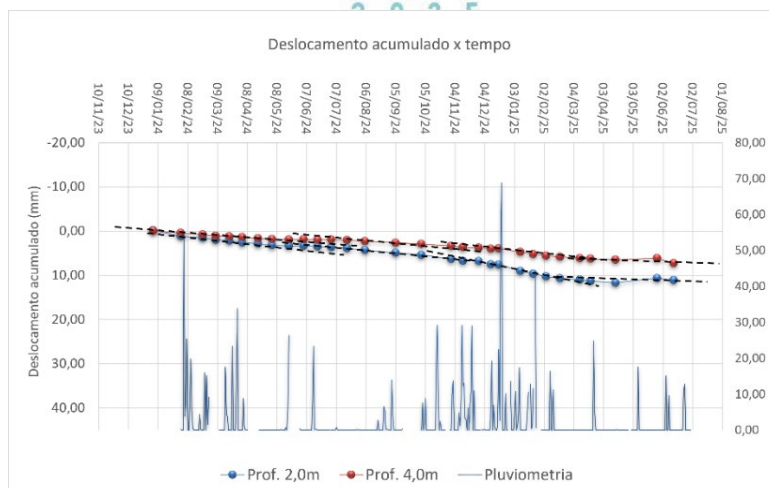


Figura 7. Deslocamento acumulado x tempo - inclinômetro INC-02 – localizado a jusante.

Tabela 2. Velocidade dos movimentos nas encostas, CRUDEN e VARNES (1996).

Classe de velocidade	Descrição	Velocidade (mm/s)	Velocidade típica
7	Extremamente rápido	$>5 \times 10^3$	$>5\text{m/s}$
6	Muito rápido	5×10^1	3m/min
5	Rápido	5×10^{-1}	$1,8\text{m/h}$
4	Moderado	5×10^{-3}	13m/mês
3	Lento	5×10^{-5}	$1,6\text{m/ano}$
2	Muito lento	5×10^{-7}	16mm/ano
1	Extremamente lento	$<5 \times 10^{-7}$	$<16\text{mm/ano}$

A continuidade desse monitoramento fornece subsídios para confirmar a estabilidade de longo prazo do maciço e contribui para uma gestão geotécnica preventiva, orientada por dados. A solução executada atende plenamente aos critérios de estabilidade e desempenho vigentes à época da intervenção, e a rodovia opera em condição segura. No entanto, a instrumentação em curso permite observar o comportamento da encosta frente a eventos futuros, como novos ciclos de chuva, oferecendo base técnica para eventual reavaliação caso ocorram alterações significativas no cenário geotécnico; nesse contexto, os dados vêm sendo acompanhados pela concessionária em conjunto com o DER-MG, de modo a embasar tecnicamente qualquer necessidade futura de complementação no sistema de contenção, caso esta se justifique.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise comparativa dos dados obtidos nas fases pré e pós-intervenção demonstrou, de forma clara, a efetividade das ações executadas no talude de montante. Após a escavação do material coluvionar saturado, substituição por solo granular compactado e implantação do sistema de drenagem profunda, observou-se uma redução significativa nas movimentações medidas pelos instrumentos.

As leituras dos inclinômetros, anteriormente marcando deslocamentos concentrados na faixa de 7,5m a 8,5 m de profundidade, passaram a apresentar variações praticamente nulas nos mesmos pontos após a estabilização da encosta. Esse comportamento é coerente com a nova configuração geométrica e com o rebaixamento do lençol freático obtido pela drenagem implementada.

Da mesma forma, os marcos superficiais instalados após a execução da obra indicaram recalques residuais inferiores a 22 mm, concentrados majoritariamente nas áreas periféricas à zona de intervenção direta. A estabilização do núcleo principal da ruptura, associada à eficiência da drenagem, resultou em uma condição de equilíbrio satisfatória, sem necessidade de correções adicionais.

Os medidores de nível d'água instalados registraram comportamento consistente com as expectativas de projeto, apresentando nível d'água estabilizado em patamares inferiores aos observados na fase pré-obra, mesmo durante novos eventos chuvosos. Esse dado é particularmente importante para sustentar o desempenho da solução ao longo do tempo, considerando a influência crítica da água no histórico da instabilidade.

No talude de jusante, as leituras indicaram movimentações horizontais muito lentas, com velocidades típicas abaixo de 0,02 mm/dia. Esse comportamento foi compatível com a manutenção da estabilidade,



evitando uma intervenção que, embora tecnicamente possível, não se justificava neste momento do ponto de vista de gestão do risco.

Do ponto de vista operacional e econômico, o uso da instrumentação se mostrou decisivo para a eficiência da tomada de decisão. Caso não houvesse o suporte dos dados de campo, a tendência natural seria adotar uma solução conservadora, com intervenção tanto no talude de montante quanto no de jusante. Com o monitoramento, foi possível demonstrar tecnicamente que a atuação apenas no montante era suficiente, o que resultou em economia de recursos, menor impacto ambiental e redução do prazo de execução das obras e de liberação da rodovia ao usuário.

Além da economia direta, a redução da área de intervenção possibilitou uma mobilização mais rápida, menor interferência na operação da via e menor volume de solo movimentado. Esses fatores contribuem para uma abordagem mais sustentável da engenharia geotécnica em obras rodoviárias, especialmente em cenários emergenciais, onde o tempo de resposta e a assertividade técnica são fatores críticos.

7 CONCLUSÕES

O estudo de caso do km 68 da BR-459/MG demonstra a relevância do uso de instrumentação geotécnica como ferramenta estratégica para diagnóstico preciso e embasamento técnico em situações de instabilidade em rodovias. A atuação integrada entre monitoramento, projeto e execução permitiu compreender em detalhes o comportamento do talude, otimizando a intervenção e minimizando custos e prazos.

A análise comparativa entre as fases pré e pós-intervenção indicou uma efetiva estabilização do talude de montante, com expressiva redução nos deslocamentos medidos e controle satisfatório do nível freático. Os resultados confirmam a eficácia das soluções adotadas, especialmente da escavação corretiva, da substituição por material granular e do sistema de drenagem profunda.

A decisão de manter o talude de jusante sob monitoramento contínuo, sem intervenção imediata, reforça o papel da instrumentação como base técnica para a gestão proativa do risco. Essa abordagem evitou a execução de obras atualmente desnecessárias, mantendo a segurança operacional da rodovia sem incorrer em gastos excessivos.

O caso reforça que a integração entre diagnóstico geotécnico e gestão técnica orientada por dados deve ser uma diretriz central em programas de concessão rodoviária e obras de estabilização. A experiência positiva no km 68 contribui como referência para outras situações similares, especialmente em regiões sujeitas a eventos extremos e instabilidades associadas a saturação de solos.

Como recomendação, destaca-se a importância de manter o monitoramento a longo prazo, permitindo a identificação precoce de alterações no comportamento do maciço e a adoção de medidas corretivas antes do agravamento de qualquer instabilidade. A continuidade da instrumentação representa, portanto, não apenas uma medida de segurança, mas também uma ferramenta de economia e racionalização da engenharia aplicada a gestão do risco em infraestruturas críticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Secretaria de Estado de Infraestrutura e Mobilidade de Minas Gerais (SEINFRA/MG) pelo acesso aos dados técnicos e institucionais relacionados ao Programa de Concessões Rodoviárias do Estado. Agradecem também à EPR Sul de Minas pelas informações operacionais e relatos técnicos referentes à BR-459, especialmente no contexto das obras emergenciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CRUDEN, D. M. & VARNES, D. J. (1996). "Landslide Types and Processes". LANDSLIDES - Investigation and Mitigation. Transportation Research Board - National Research Council. USA.
- DANTAS, M; SHINZATO, E; RENK, J; MORAES, J; MACHADO, M; NOGUEIRA, A. O emprego da geomorfologia para avaliação de suscetibilidade a movimentos de massa e inundação – Mimoso do Sul/ES. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 4. 23-42. 2014
- MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. Geodiversidade do estado de Minas Gerais. CPRM. 2010.