XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/83

Gestão de Risco em Rodovias por Instrumentação em Tempo Real

Ricardo Mirisola
Diretor, MMF PROJETOS , São Paulo , Brasil, ricardo.mirisola@mmfprojetos.com.br

Guillermo Altrichter
Superintendente de Projetos Rodoviários, EPR, São Paulo, Brasil, guillermo.altrichter@grupoepr.com.br

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

Bruno Marcelo Citon Rossi
Gerente de Geotecnia, EPR, São Paulo, Brasil, bruno.rossi@grupoepr.com.br

Felicia Erika Nascimento Costa
Engenheira de Projetos, EPR, Minas Gerais, Brasil, felicia.nascimento@eprsuldeminas.com.br

RESUMO:
A gestão de infraestruturas rodoviárias em regiões tropicais enfrenta desafios crescentes devido à intensificação de eventos climáticos extremos, que atuam como gatilhos para escorregamentos de taludes. Este artigo apresenta os testes do sistema de gestão de risco implementado no km 71+450 da rodovia BR-459/MG, trecho sob concessão da EPR Sul de Minas, marcado por uma ruptura significativa induzida por chuvas intensas em 2023. A metodologia desenvolvida propõe a convergência entre o monitoramento geotécnico convencional (inclinômetros e piezômetros) e um sistema de alerta precoce em tempo real fundamentado em tiltmeters e pluviometria automatizada. Os critérios de alerta foram estabelecidos através do cruzamento da velocidade de deformação angular, com o coeficiente de precipitação crítica derivado da chuva acumulada de 72h. Como principal resultado, apresenta-se um Ábaco de Tomada de Decisão que pode escalar a resposta operacional em três níveis: Alerta (monitoramento), Emergência (planejamento) e Crítico (interdição total). A aplicação deste modelo permitiu a redução da subjetividade decisória e o aumento da resiliência climática do ativo, garantindo a segurança dos usuários através de critérios técnicos preditivos e validados pelo comportamento cinemático e hidrológico do maciço.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de Risco, Resiliência Climática, Sistemas de Alerta Precoce, Instrumentação Geotécnica.

ABSTRACT:
The management of highway infrastructure in tropical regions faces increasing challenges due to the intensification of extreme weather events, which act as primary triggers for slope landslides. This paper presents the risk management system implemented at km 71+450 of the BR-459/MG highway, a section under the EPR Sul de Minas concession, characterized by a significant rainfall-induced failure in 2023. The developed methodology proposes a convergence between conventional geotechnical monitoring (inclinometers and piezometers) and a real-time early warning system based on tiltmeters and automated pluviometry. The warning criteria were established by correlating the angular deformation velocity with the critical precipitation coefficient derived from the 72-hour cumulative rainfall. As a primary result, a Decision-Making Abacus is presented, could be scaling the operational response into three levels: Alert (monitoring), Emergency (planning), and Critical (total interdiction). The application of this model allowed for a reduction in decision-making subjectivity and increased the asset's climate resilience, ensuring user safety through predictive technical criteria validated by the kinematic and hydrological behavior of the soil mass.

KEYWORDS: Risk Management, Climate Resilience, Early Warning Systems, Geotechnical Instrumentation

1 INTRODUÇÃO

O cenário das mudanças climáticas globais tem imposto desafios sem precedentes à infraestrutura de transportes, exigindo uma reavaliação dos paradigmas tradicionais da engenharia rodoviária e da gestão de ativos. No Brasil, o aumento da frequência e da magnitude de eventos hidrológicos extremos tem se manifestado através de precipitações concentradas que superam as séries históricas de projeto, atuando como o principal gatilho para processos erosivos e escorregamentos de taludes em encostas rodoviárias.

A vulnerabilidade da malha rodoviária às variações climáticas não é apenas uma questão de manutenção, mas de resiliência. Rodovias de importância estratégica, como a BR-459/MG, que conecta polos industriais e agrícolas entre Minas Gerais e São Paulo, não podem mais ser geridas sob uma ótica puramente reativa. A interrupção de fluxo em eixos logísticos dessa magnitude gera prejuízos econômicos em cascata, além de elevar exponencialmente os riscos à segurança dos usuários.

Nesse contexto, a adaptação da engenharia passa pela integração de soluções estruturais e soluções não-estruturais, especificamente a implementação de sistemas de inteligência baseados em dados em tempo real que evoluam para sistemas de monitoramento contínuo.

O trecho monitorado apresenta as características ideais para a validação desta metodologia. Após uma ruptura significativa de talude induzida por chuvas intensas em 2023, ficou evidente que o modelo de monitoramento convencional precisava ser robustecido. A saturação do solo e a elevação repentina da poropressão durante os picos pluviométricos exigiram uma resposta tecnológica pudesse permitir à concessionária "antecipar o colapso".

Este trabalho visa detalhar a metodologia de gestão de risco aplicada no KM 71+450, fundamentada na convergência entre a instrumentação geotécnica convencional e as tecnologias de transmissão de dados em tempo real. O objetivo central é apresentar como a correlação entre a velocidade de deformação de tiltmeters e janelas móveis de precipitação permite a criação de um sistema de alerta precoce (SAP) robusto, capaz de subsidiar decisões operacionais críticas e reduzir a subjetividade no processo de interdição de vias, consolidando o conceito de resiliência climática na prática concessionária.

2 METODOLOGIA DE INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO

A estratégia de monitoramento do KM 71+450 da BR-459 foi concebida para oferecer uma visão redundante e complementar do comportamento do maciço. A metodologia divide-se em instrumentação convencional, focada no acompanhamento estrutural de longo prazo, e instrumentação automatizada, voltada para a gestão de risco em tempo real.

2.1 Instrumentação Convencional

O mecanismo de ruptura no km 71+450 da BR-459 foi tecnicamente diagnosticado como um movimento de massa do tipo rotacional profundo, com uma superfície de deslizamento claramente identificada pela instrumentação entre 7,5 m e 8,5 m de profundidade. Este colapso foi desencadeado pela perda severa de resistência ao cisalhamento do solo devido à saturação crítica do maciço após chuvas intensas, sendo potencializado por uma geologia local composta por solos argilosos de baixa competência, elevada plasticidade e heterogeneidade hidráulica, que favoreceram inclusive o fenômeno de piping. Atualmente, com a implementação das obras de estabilização e a continuidade do monitoramento, o comportamento do talude, especialmente no setor de jusante, é caracterizado por movimentos extremamente lentos, registrando velocidades de deformação inferiores a 0,02 mm/dia (aproximadamente 7 mm/ano). De acordo com a classificação de Cruden e Varnes (1996), essa cinética residual indica uma estabilização satisfatória e compatível com a segurança operacional, permitindo a gestão do risco baseada em dados precisos de deslocamento acumulado.

A instrumentação convencional tem como objetivo principal, o mapeamento das superfícies de ruptura e a variação do nível freático, servindo como base para a acompanhamento dos modelos de estabilidade.

A instrumentação convencional instalada é composta por uma malha estratégica de instrumentos manuais: quatro inclinômetros monitoram o surgimento de superfícies de ruptura e o reflexo de deslocamentos no corpo da rodovia, enquanto um piezômetro de corda vibrante e indicadores de nível d'água registram as

variações da poropressão e do lençol freático. Complementado por marcos superficiais para medição de recalques.
A periodicidade das leituras foi feito de modo quinzenal no período chuvoso e mensais no período seco, fornecendo os dados de base necessários para a validação dos modelos de estabilidade do talude.

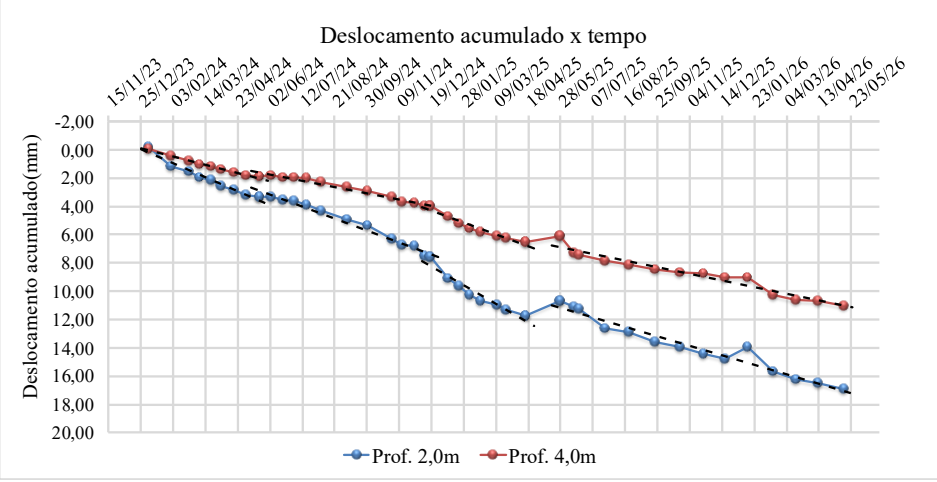


Figura 1. Deslocamentos acumulados x tempo (inclinômetro).

Tabela 1. Velocidade dos movimentos nas encostas, CRUDEN e VARNES (1996).

Classe de velocidade	Descrição	Velocidade (mm/s)	Velocidade típica
7	Extremamente rápido	$>5x10^{3}$	>5m/s
6	Muito rápido	$5x10^{1}$	3m/min
5	Rápido	$5x10^{-1}$	1,8m/h
4	Moderado	$5x10^{-3}$	13m/mês
3	Lento	$5x10^{-5}$	1,6m/ano
2	Muito lento	$5x10^{-7}$	16mm/ano
1	Extremamente lento	$<5x10^{-7}$	<16mm/ano

2.2 Implementação de Tecnologias de Tempo Real

A grande inovação para a gestão de risco no KM 71+450 reside na sobreposição de uma camada de instrumentação automatizada à malha convencional. Este sistema foi desenhado para eliminar o hiato temporal entre as leituras manuais e fornecer dados críticos durante eventos climáticos extremos, permitindo uma resposta operacional baseada em dados dinâmicos.

- Tiltmeters (Sensores de Inclinação de Alta Precisão): Foram instalados sensores de inclinação automatizados em profundidades estratégicas (entre 2 e 4 metros). Estes dispositivos registam variações angulares infinitesimais de forma contínua, transmitindo os dados via rede celular para uma plataforma de gestão centralizada. A principal vantagem destes sensores é a capacidade de fornecer a velocidade média de deformação angular em intervalos de segundos, permitindo identificar acelerações que precedem colapsos globais;
- Pluviometria Automática e Telemetria: O sistema é integrado por pluviómetros automáticos de báscula, localizados na área de influência direta do talude.

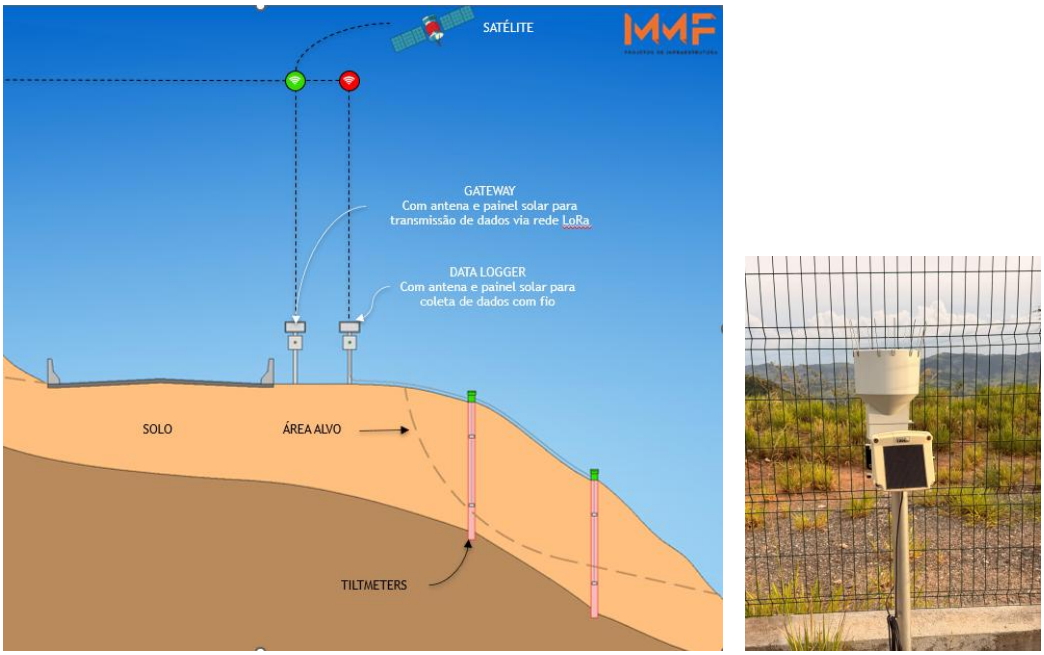


Figura 2. Seção esquemática da instrumentação automatizada e pluviômetro.

3 CRITÉRIOS DE ALERTA E LIMIARES OPERACIONAIS

A definição dos limiares de alerta não é arbitrária; ela baseia-se na correlação entre a resposta cinemática do talude e os gatilhos hidrológicos. Para este estudo, adotou-se a metodologia de Uchimura et al. (2015), que utiliza a variação do ângulo de inclinação superficial e a sua respectiva velocidade como indicadores precursores de ruptura iminente. Complementarmente, o sistema incorpora os critérios de Tatizana et al. (1987) para determinar os gatilhos hidrológicos, focando na análise da chuva acumulada de 3 dias (72h) como o principal agente preparador do terreno.

A arquitetura do sistema é desenhada como um ciclo fechado de inteligência geotécnica, onde a redundância de dados garante a confiabilidade do alerta. Ela se divide em três camadas principais:

- Input Cinemático: Tiltmeters (Sensores TSS) que medem a variação angular em tempo real.
- Input Hidrológico: Pluviômetros de báscula com registro minuto a minuto.
- Transmissão: Módulos de telemetria via rádio/celular que enviam pacotes de dados para a nuvem em intervalos de 5 a 15 minutos (ou em regime de exceção se houver aceleração).

3.1 Ábaco de Tomada de Decisão

Conforme demonstrado por Uchimura et al. (2015), o monitoramento por tiltmeters fundamenta-se na detecção de deformações precursoras que ocorrem na camada superficial antes do colapso global. O estudo destaca que:

- Velocidade de Rotação: O aumento da velocidade de inclinação é um indicador mais confiável do que a inclinação absoluta.
- Critério de Alerta: A ruptura tende a ocorrer quando a velocidade de inclinação atinge valores críticos. Uchimura et al. (2015) sugerem que velocidades acima de 0,01 a 0,1 graus/hora indicam um estado de pré-falha em taludes induzidos por chuva.

Baseando-se no comportamento histórico do km 71+450 e nos critérios de Uchimura (2015), o sistema integra a velocidade de deformação dos tiltmeters com janelas móveis de chuva (12h, 24h e 72h). O ábaco de decisão apresenta três níveis de resposta que podem ser adotados pela Concessionária:

- Nível Normal (Verde):
  - Critério:
    - Velocidade de inclinação estável (abaixo de 0,01°/h)
    - Chuva acumulada (72h) (abaixo de 70mm)
  - Status: Operação normal.

- Nível de Alerta (Amarelo):
  - Critério:
    - Início de aceleração nos tiltmeters (acima 0,01 graus/hora) ou
    - Acumulado de cuvas de 72h superando 70mm.
  - Ação: Monitoramento intensivo.

- Nível de Emergência (Laranja):
  - Critério:
    - Dois critérios de Alerta atingidos simultaneamente, ou
    - Velocidade de inclinação atinge o limiar crítico (excedendo 0,05 graus/hora) ou,
    - Acumulado de Chuvas superando 110mm
  - Ação: Equipes de emergência de prontidão e preparação do plano de contingência.

- Nível Crítico (Vermelho):
  - Critério:
    - Dois critérios de Emergência atingidos simultaneamente, ou
    - Velocidade de inclinação atinge o limiar crítico (excedendo 0,01 graus/hora) ou,
    - Acumulado de Chuvas superando 130mm
  - Ação: Avaliação de interrupção do tráfego.

Velocidade média (°/h)					
	0,1	Critico			
	0,05	Emergência	Critico		
	0,01	Alerta	Emergência	Critico	
	0	Normal	Alerta	Emergência	Critico
		0	70	110	130
	Chuva Acumulada 72h (mm)				

Tabela 2. Critérios de Tomada de Decisão.

4 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS KM 71+450

A interpretação dos dados do sistema de alerta no KM 71+450 da BR-459 baseia-se na análise conjunta de dois vetores: o potencial hidrológico de instabilização e a resposta cinemática do talude. A inteligência do sistema reside na capacidade de diferenciar variações sazonais normais de acelerações precursoras de ruptura.

O gráfico de série temporal é a ferramenta primária para identificar o tempo de resposta do maciço. Nele, sobrepõem-se os dados captados em campo de as intensidades diárias de chuva (barras verticais) e a velocidade de deformação registrada pelos tiltmeters.

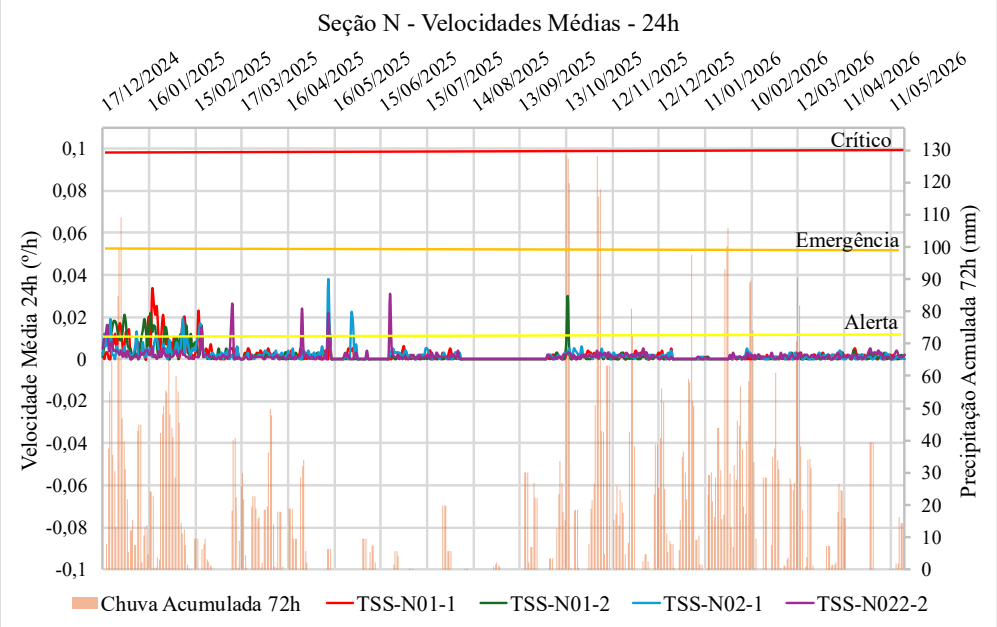


Figura 3. Velocidade de variação angular (°/h) com precipitação (mm) X tempo.

Através deste gráfico, observa-se que o talude apresenta uma assinatura hidrológica específica. Movimentações residuais constantes (abaixo de 0,02 mm/dia).

É possível notar alguns pontos de velocidades médias acima de de 0,03°/h, e de chuvas diárias chegando a 120mm, porém a arquitetura do sistema de alerta indica a necessidade e interpretação correlata dos dados adquiridos.

O ábaco apresentado a seguir apresenta a interpreção dos dados coletados, cruzando-se os pontos de chuvas acumuladas nas ultimas 72h para cada valor de velocidade média medido. Desta forma é possível remover a informação da série temporal e apresentar os pontos sobre o ábaco de tomada de decisão.

A análise do comportamento cinemático do talude, quando confrontada com os gráficos de série temporal (timeplots), revela que a estabilidade do maciço no km 71+450 não é estática, mas sim dependente da velocidade de dissipação da poropressão. Observa-se que repetidos picos de intensidade pluviométrica diária geram respostas imediatas nos tiltmeters, caracterizando uma sensibilidade hidráulica elevada da camada de aterro. No entanto, a interpretação técnica deve focar na persistência da velocidade de deformação pós-evento climático: se a curva de velocidade retorna rapidamente ao patamar basal após a cessação da chuva, o sistema interpreta o evento como uma acomodação elástica. Caso a velocidade se mantenha elevada ou apresente aceleração residual, os dados indicam que o maciço entrou em um regime de deformação plástica.

No que tange ao Ábaco de Decisão, a interpretação dos pontos plotados no espaço cartesiano (Velocidade vs. Chuva Acumulada) permite identificar o "limite de resiliência" da encosta. A distribuição dos dados demonstra que o Coeficiente de Precipitação Crítica de 72h atua como um previsor do estado limite de estabilidade. Quando o par de coordenadas migra para a zona de transição, a interpretação técnica é de que o fator de segurança do talude reduziu a níveis próximos à unidade. O ábaco, portanto, funciona como um tradutor da probabilidade de ruptura.

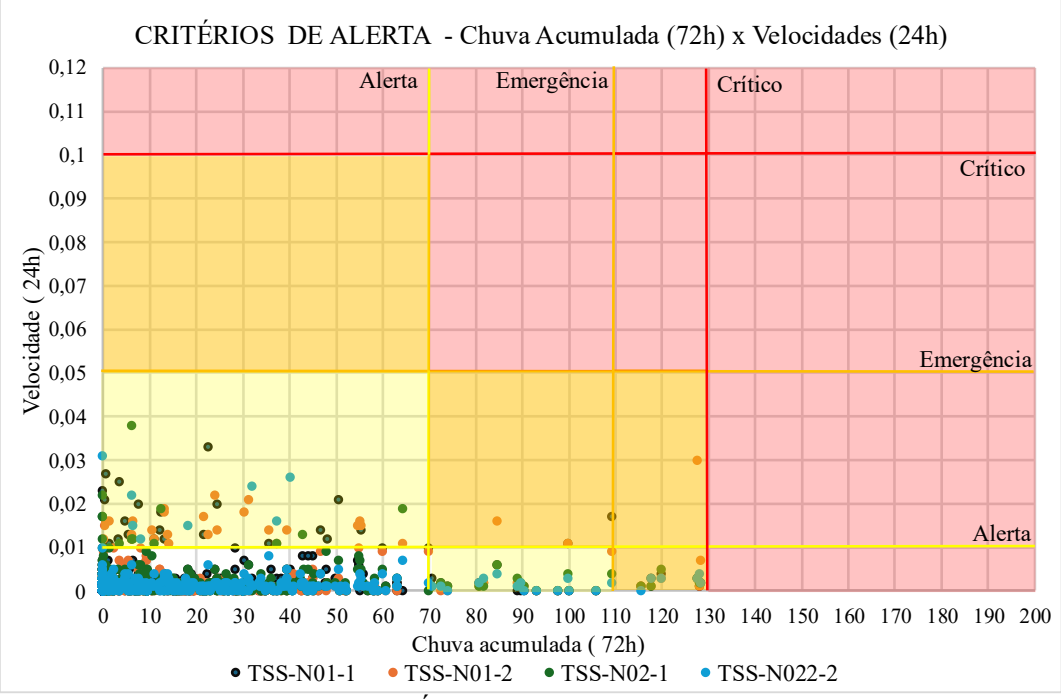


Figura 4. Ábaco de Tomada de decisão.

A análise comparativa entre os pontos de chuva acumulada e as velocidades médias registradas no Ábaco de Decisão revela uma correlação direta e positiva, evidenciando que o maciço responde quase instantaneamente aos ciclos de saturação. Podendo ser observada em picos de velocidades com acumulados chuvas pequenos (abaixo de 40mm).

A interpretação técnica dos dados coletados permite identificar um "ponto de inflexão" crítico: ao atingir a faixa entre 70 mm de chuva acumulada na janela móvel de 72h, o talude apresenta uma mudança de comportamento, onde as velocidades médias de inclinação diminuem mas tornam-se mais constantes.

Portanto, o Ábaco de Decisão deixa de ser apenas um registro histórico para se tornar uma ferramenta preditiva de alta precisão. Ao correlacionar as velocidades médias com as janelas de 72h, o sistema consegue isolar o ruído de chuvas isoladas e focar na energia acumulada que de fato gera instabilidade. A identificação desse "lugar" específico de aceleração acima de 70mm pode permitir que a operação com uma margem de segurança técnica, engatilhando as ações do plano de contingência antes que a deformação se torne irreversível, transformando dados brutos em resiliência climática ativa para a rodovia.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento e a implementação do sistema de gestão de risco no KM 71+450 da BR-459 demonstram que a resiliência climática de infraestruturas rodoviárias não depende exclusivamente de obras estruturais, mas da capacidade de processar dados em tempo real para a tomada de decisão preventiva. A integração das metodologias de Tatizana et al. (1987) e Uchimura et al. (2015) permitiu a criação de um modelo de alerta precoce que une a causa (saturação por chuvas acumuladas) ao efeito (velocidade de deformação angular).

Como principais conclusões, destacam-se:

- Redução da Subjetividade: O Ábaco de Tomada de Decisão pode substituir o julgamento empírico por limiares quantitativos, garantindo que as avaliações de interdições ocorram apenas em cenários de risco tecnicamente comprovado.

- Antecipação de Eventos: O uso do Coeficiente de Precipitação Crítica (CPC) para janelas de 72h mostrou-se eficaz na identificação do estado de pré-ruptura, permitindo que a gestão operacional possa mobilizar planos de contingência antes que danos físicos atinjam a rodovia.

- Eficiência Operacional: A instrumentação automatizada é uma opção para reduzir o gap temporal das leituras manuais quinzenais, proporcionando uma vigilância contínua necessária para enfrentar o aumento da severidade dos eventos climáticos extremos.

Conclui-se que o sistema é replicável e essencial para a adaptação da malha viária brasileira às mudanças climáticas. A resiliência não é medida apenas pela robustez das obras de contenção, mas pela capacidade da gestão de interpretar sinais invisíveis da natureza e transformá-los em ações preventivas eficazes. O sucesso do modelo no KM 71+450 demonstra a viabilidade técnica de sistemas automatizados de baixo custo na gestão de ativos viários, estabelecendo diretrizes replicáveis para o setor de concessões rodoviárias no país.

Este modelo estabelece um novo paradigma para a gestão de taludes e encostas sob concessão no Brasil, provando ser uma solução replicável e de baixo custo comparada aos impactos sociais e econômicos de sinistros rodoviários.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método proposto e aplicado no KM 71+450 da BR-459 representa um avanço significativo para a engenharia geotécnica nacional. Ao aliar o rigor acadêmico de referências clássicas e modernas com a tecnologia de captação de dados, a gestão de risco deixa de ser um exercício de probabilidade para se tornar um protocolo de certeza técnica.

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo EPR e a MMF PROJETOS pelo disponibilzação dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE). A*nais do 5º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. São Paulo*: ABGE, v. 2, 1987.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. *Landslide Types and Processes*. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (Eds.). Landslides: Investigation and Mitigation. Washington, D.C.: Transportation Research Board, Special Report 247, p. 36-75, 1996.

EPR SUL DE MINAS. *Estudos Realizados para Estabilização e Monitoramento do Talude* – KM 68 BR-459. Relatório Técnico ESM-459MG-068+000-TAL-RT-V1-001-R3. Pouso Alegre, 2025.

TATIZANA, C. et al. *Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos – Serra do Mar,* Município de Cubatão. In: Anais do 5º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, v. 2, p. 225-236, 1987.

UCHIMURA, T. et al. *Precaution and early warning of surface failure of slopes using tilt sensors*. Soils and Foundations, v. 55, n. 5, p. 1086-1099, 2015.