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/COBRAMSEG2026.4/75

Estudo de alternativas para estabilização de talude rochoso no estado do Paraná.

Sergio Enrique Arguello Vera
Eng, Geotécnico, FG Moretti, São Paulo, Brasil, sergio.arguello@morettiengenharia.com.br

Danilo Martins Silva
Eng. Geotécnico, FG Moretti, São Paulo, Brasil, danilo.martins@morettiengenharia.com.br

Geraldo Moretti
Eng. Geotécnico, FG Moretti, São Paulo, Brasil, geraldo@morettiengenharia.com.br

Alexandre Castro Fernandes
Eng. Civil, DER/PR – Paraná, Brasil, alexandrecastro@der.pr.gov.br

Fernando Furiatti Saboia
Eng. Civil, DER/PR – Paraná, Brasil, fernando.furiatti@seil.pr.gov.br

RESUMO: O estudo de alternativas de estabilização de taludes rodoviários constitui etapa fundamental no processo de tomada de decisão em obras geotécnicas, ao permitir a comparação entre soluções com base em critérios operacionais, econômicos, ambientais e de segurança. Em um trecho de rodovia inserido em ambiente serrano, foi conduzido um estudo de alternativas para estabilização de um talude rochoso caracterizado por relevo acidentado, clima úmido e maciço rochoso granítico intensamente intemperizado, condições frequentemente associadas à ocorrência de processos de instabilidade e desprendimento de blocos. A metodologia adotada baseou-se na caracterização geológico-geotécnica do maciço, na realização de análises cinemáticas preliminares e na proposição de três alternativas de estabilização, avaliadas por meio de uma matriz qualitativa de apoio à decisão que considerou dimensões socioeconômicas, socioambientais e de segurança operacional, conforme diretrizes técnicas aplicáveis. Os resultados indicaram que a alternativa baseada na combinação de técnicas de estabilização ativa do maciço, associadas a sistemas de proteção superficial e interceptação de blocos, apresentou melhor desempenho global e maior compatibilidade com as restrições de contorno locais. O estudo demonstra que a integração de critérios ampliados e estruturados contribui para decisões mais consistentes em intervenções geotécnicas em ambientes rodoviários sensíveis.
PALAVRAS-CHAVE: Apoio à decisão; Solução geotécnica; Talude rochoso; Estabilização de encostas; Infraestrutura rodoviária.

ABSTRACT: The evaluation of stabilization alternatives for highway slopes constitutes a fundamental step in geotechnical decision-making, as it enables the systematic comparison of solutions based on operational, economic, environmental, and safety criteria. A case study was conducted on a rock slope located along a roadway segment in a mountainous environment, characterized by steep terrain, humid climate, and intensely weathered granitic rock mass, conditions commonly associated with slope instability and rockfall processes. The adopted methodology was based on the geological and geotechnical characterization of the rock mass, the performance of preliminary kinematic analyses, and the proposal of three stabilization alternatives, which were evaluated using a qualitative multicriteria comparative approach considering socioeconomic, environmental, and operational safety dimensions, in accordance with applicable technical guidelines. The results indicated that the alternative combining active rock mass stabilization techniques with surface protection systems and rockfall interception measures achieved the best overall performance and demonstrated greater compatibility with local boundary constraints. The study highlights that the integration of expanded and structured evaluation criteria contributes to more robust decision-making in geotechnical interventions in sensitive roadway environments.
KEYWORDS: Decision support; Geotechnical solution; Rock slope; Slope stabilization; Highway infrastructure.

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de processos de instabilidade em encostas adjacentes a diretrizes rodoviárias em regiões serranas representa um desafio estrutural e operacional crítico para a engenharia geotécnica. Cortes executados em maciços rochosos sob topografia acidentada frequentemente expõem descontinuidades estruturais sujeitas a mecanismos de ruptura condicionados por fatores geológicos e hidrológicos.

No trecho em estudo, inserido em uma escarpa de serra com relevo dissecado, a combinação de encostas íngremes, avançado intemperismo químico do maciço granítico-gnáissico e elevados índices pluviométricos resulta na ocorrência de quedas de blocos (rockfall) e movimentos de massa localizados. Estes eventos impactam diretamente a segurança do tráfego e a integridade da plataforma da pista.

O principal limitador para a escolha da solução de engenharia neste cenário é a severa restrição geométrica no pé do talude. A proximidade imediata da pista de rolamento e a impossibilidade de alteração do traçado viário ou de supressão vegetal extensa na crista reduzem o espaço físico disponível. Essa característica restringe a aplicação de soluções convencionais massivas, como retaludamentos expressivos (que demandariam grandes volumes de escavação e geração de bota-foras) ou estruturas de contenção rígidas de grande porte no pé do corte (que avançariam sobre a calha da rodovia).

Portanto, a seleção da intervenção definitiva exige uma análise integrada que avalie o fator de segurança estrutural em conjunto com a viabilidade construtiva dentro do espaço disponível. Este trabalho apresenta o diagnóstico geológico-geotécnico do talude, a caracterização cinemática dos blocos instáveis e aplica uma abordagem comparativa multicritério qualitativa para avaliar o cenário. Esta avaliação foi conduzida de forma direta sobre diferentes critérios de impacto, sem a atribuição de pesos numéricos ou ponderações estatísticas, visando selecionar a **solução de estabilização** mais compatível com as restrições de contorno do local.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Aspectos fisiográficos e pluviométricos

O talude em estudo insere-se no compartimento geomorfológico de escarpas da Serra do Mar (Mineropar, 2006). O trecho rodoviário apresenta elevada sinuosidade e severas variações de declividade. A amplitude altimétrica regional varia de 300 m a 900 m, situando-se o corte analisado na cota aproximada de 520 m, em encosta com declividade natural local superior a 40%. Esta configuração geométrica condiciona a altura dos cortes e potencializa processos gravitacionais.

O regime hidrológico atua como o principal fator deflagrador de instabilidades no maciço. Para fundamentar o gatilho hidrológico, foram levantados os dados da estação meteorológica automática de Morretes (Código: A864), operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023). No período crítico de outubro de 2023, a estação registrou um acumulado mensal de 543,4 mm. Desse total, destacam-se os eventos de precipitação diária concentrada de 71,6 mm em 04 de outubro e o pico de 85,6 mm em 12 de outubro de 2023. Esses volumes geram infiltração rápida, redução da sucção na cobertura pedológica e incremento de pressões neutras nas fraturas do maciço rochoso, desencadeando desprendimentos de blocos (rockfall).

2.2 Contexto geológico local

Regionalmente, a área posiciona-se no Cinturão Ribeira (Província Mantiqueira), especificamente na zona de transição entre o Terreno Curitiba e o embasamento da Microplaca Luís Alves (Heilbron et al., 2004). O local é caracterizado por rochas granítico-gnáissicas e migmatitos neoarqueanos a paleoproterozoicos, cortados por corpos graníticos tardios.

O maciço rochoso exposto no corte exibe avançado estado de intemperismo químico (grau de alteração W3 a W4), com desintegração granular localizada e formação de solo residual microfraturado na crista do talude. O arcabouço estrutural é controlado por três famílias principais de descontinuidades e fraturas de alívio de tensão subparalelas à face do corte, cuja persistência e preenchimento argiloso limitam a resistência ao cisalhamento e definem os blocos instáveis.

2.3 Caracterização geotécnica do maciço

A caracterização do maciço baseou-se em mapeamento geológico-geotécnico de superfície e análise estrutural. As medições de orientação foram obtidas com bússola digital integrada ao aplicativo Field Move Clino. A face do talude apresenta inclinação média de 78° e dip direction de 105°, geometria adotada como referência para a avaliação estrutural.

Foram identificadas cinco famílias principais de fraturas (Tabela 2.1). Esses dados estruturais fundamentaram a modelagem cinemática preliminar dos mecanismos potenciais de instabilidade (Hoek & Bray, 1981; ISRM, 2007).

Tabela 2.1 – Orientações médias das famílias de fraturas representativas do maciço (*DIP/DIPDIR*)

Família	***DIP***	***DIPDIR***
F1	85	17
F2	82	272
F3	45	185
F4	47	336
F5	56	125

A relação geométrica entre a face do corte e as descontinuidades foi projetada em uma seção geológico-geotécnica transversal representativa (Figura 2.1). Para a construção desta seção, as orientações reais das fraturas foram corrigidas para ângulos aparentes compatíveis com o plano de corte. O espaçamento entre os planos foi representado de forma esquemática para ilustrar o padrão de blocabilidade do maciço.

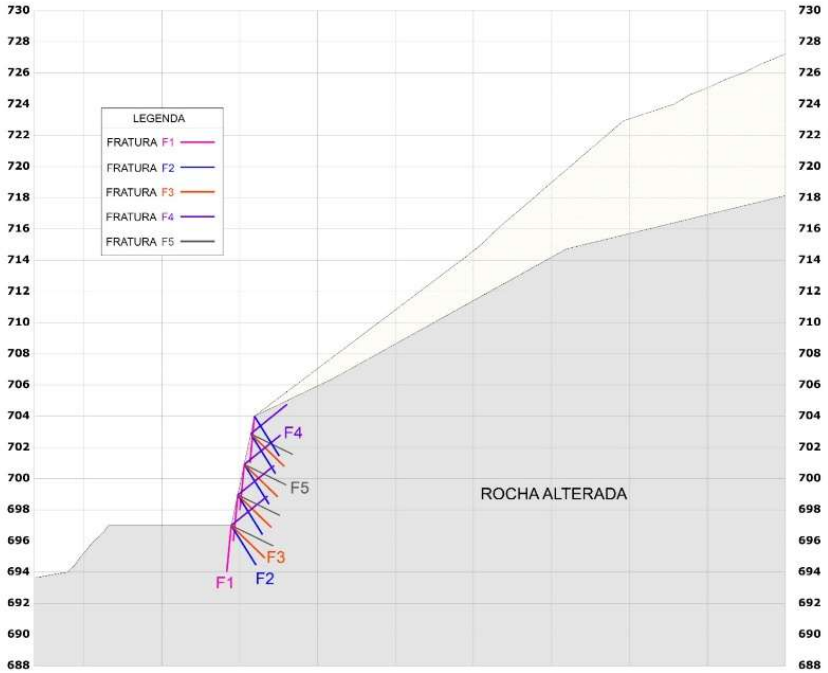


Figura 2.1 – Seção geológico-geotécnica representativa do trecho em estudo, com projeção das famílias de descontinuidades

3 DIAGNÓSTICO GEOTÉCNICO DO TALUDE.

A avaliação dos potenciais mecanismos de ruptura estruturalmente controlados foi realizada por meio de projeções estereográficas com análise de concentração de polos por contornos de densidade (Hoek & Bray, 1981). Adotou-se como envelope de resistência ao cisalhamento o ângulo de atrito básico da rocha sã recalibrado empiricamente em 35°, projetado como um cone de fricção concêntrico no estereograma.O plano médio da face do corte rodoviário (78°/105°) e sua respectiva zona limite de projeção delimitam as áreas críticas para cada modo geométrico de falha.

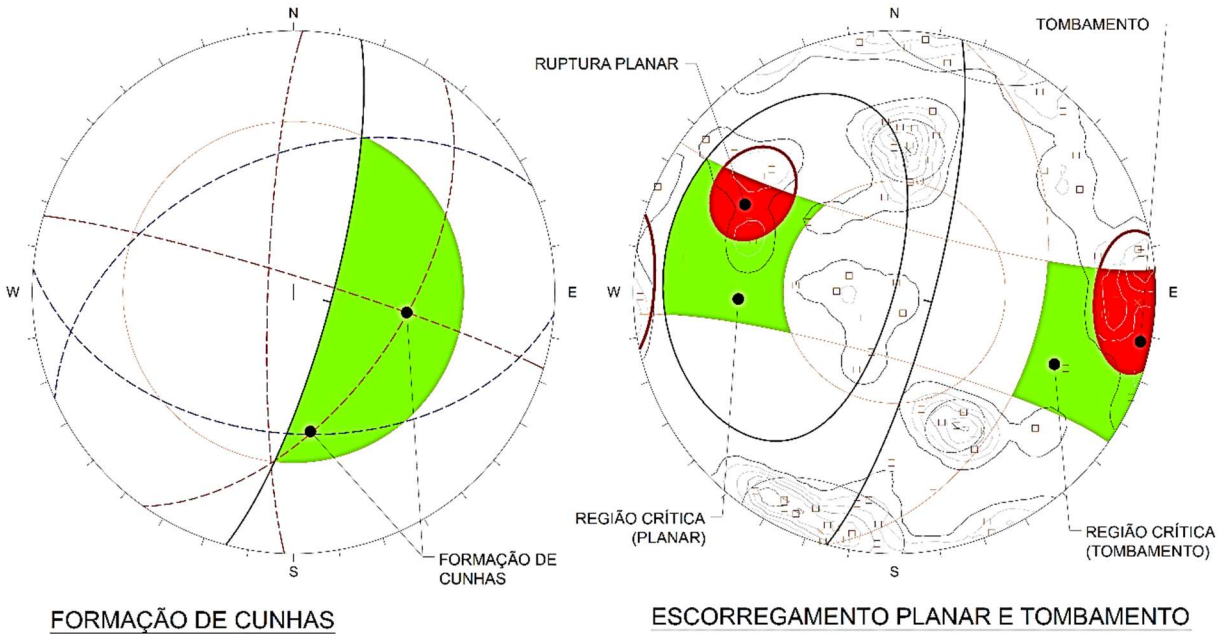
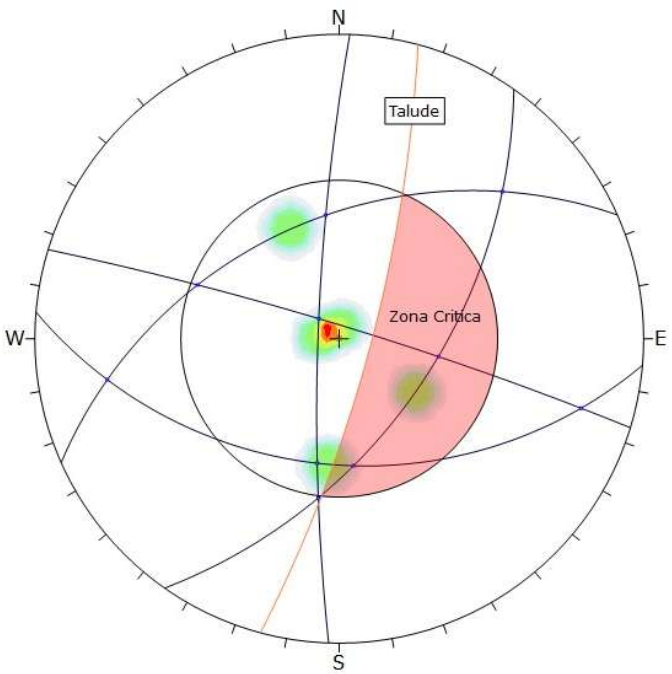


Figura 3.1 – Estereograma geral com plotagem de polos e grandes círculos correspondentes às cinco famílias de fraturas (F1 a F5) e à face do talude (78°/105°).

As análises cinemáticas automatizadas foram processadas de forma segregada para avaliar o risco de ruptura planar, ruptura por cunha e tombamento direto ou flexural (*toppling*). Os resultados gráficos estão apresentados nas Figura 3.2, 3.3 e 3.4.

A análise para ruptura planar (Figura 3.2) revelou baixa criticidade estatística. A orientação geométrica das famílias principais não satisfaz simultaneamente as condições cinemáticas necessárias, onde o *strike* da descontinuidade deve ser aproximadamente paralelo à face do talude e o mergulho da descontinuidade deve ser superior ao ângulo de atrito e inferior ao mergulho da face do talude (35°< dip < 78°). Menos de 2% dos polos totais mapeados situaram-se na zona de sombreamento crítico.



Symbol	Feature
▪	Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.40
	3.40 - 6.80
	6.80 - 10.20
	10.20 - 13.60
	13.60 - 17.00
	17.00 - 20.40
	20.40 - 23.80
	23.80 - 27.20
	27.20 - 30.60
	30.60 - 34.00

Contour Data	Dip Vectors
Maximum Density	33.20%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	78
Slope Dip Direction	105
Friction Angle	35°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	1	5	20.00%

Plot Mode	Dip Vectors
Vector Count	5 (5 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	10
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 3.2– Análise cinemática para o mecanismo de ruptura planar.

O mecanismo de ruptura por cunha (Figura 3.3) apresentou criticidade moderada a elevada. As interseções formadas entre os planos das famílias F1 e F5, e secundariamente entre F3 e F5, geram linhas de

interseção (eixos de cunha) que mergulham em direção ao espaço livre da rodovia com inclinações que superam o envelope de atrito interno. O cruzamento estrutural desses planos define blocos rochosos tetraédricos propensos ao escorregamento cinemático ao longo das linhas de interseção.

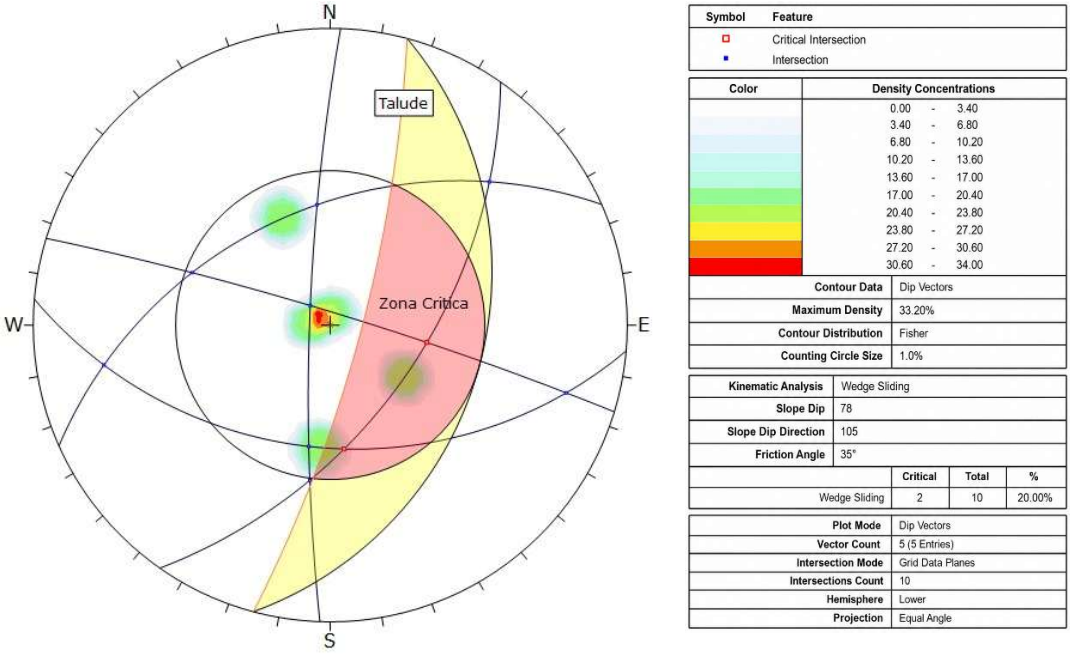


Figura 3.3 – Análise cinemática para o mecanismo de ruptura por cunha.

O modo de falha por tombamento flexural e direto (Figura 3.4) consolidou-se como o cenário de maior instabilidade física e volume potencial de mobilização no maciço. A família F2 (82°/272°) apresenta orientação quase perfeitamente oposta à face do talude (78°/105°), atendendo com precisão ao critério cinemático de instabilidade ao tombamento. A proximidade física dos polos de F2 na zona de criticidade indica que as fraturas verticais de alívio de tensão segmentam o maciço granítico intemperizado em colunas ou placas esbeltas. O desenvolvimento de pressões de água nas descontinuidades e o consequente incremento das pressões neutras durante os picos pluviométricos registrados atua como vetor cinemático de momento, gerando o deslocamento para fora da encosta e desencadeando eventos sucessivos de *rockfall* sobre a calha viária.

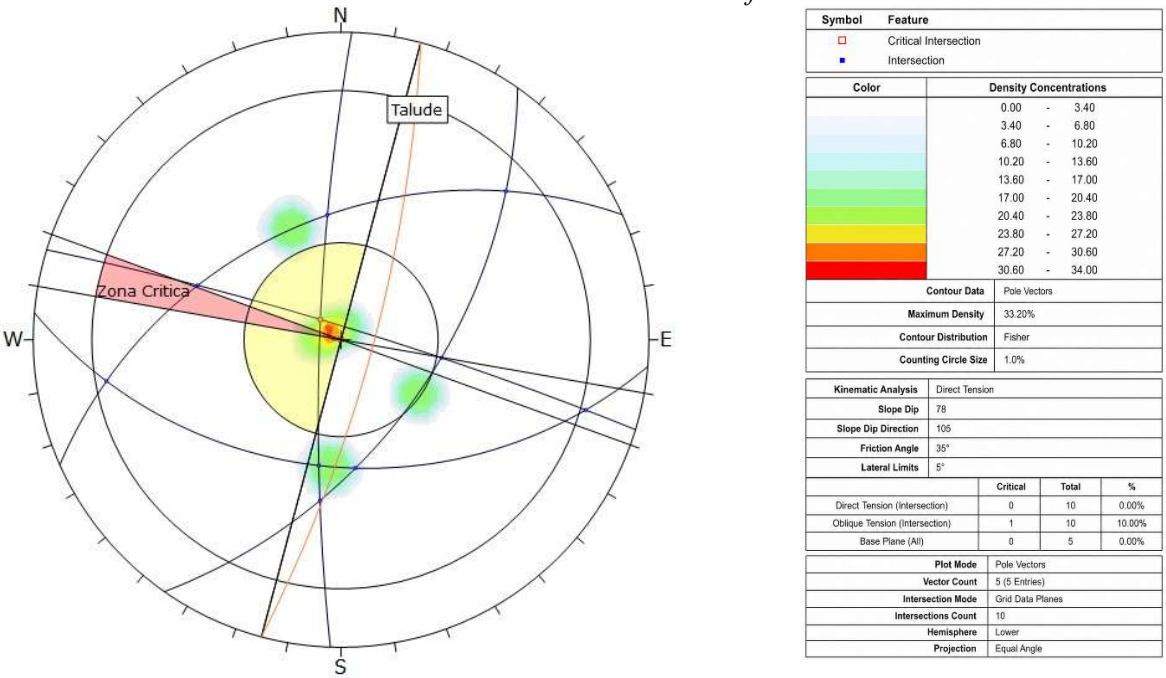


Figura 3.4 – Estereograma com a análise cinemática para ruptura por tombamento

De forma geral, o diagnóstico geotécnico evidencia que o comportamento do talude é fortemente condicionado pela orientação e pelas características das descontinuidades estruturais, com a coexistência de diferentes mecanismos potenciais de instabilidade. As análises cinemáticas realizadas fornecem a base técnica para a proposição e a avaliação das alternativas de estabilização discutidas nos capítulos subsequentes.

4 ALTERNATIVAS DE ESTABILIZAÇÃO PROPOSTAS

Com base nos mecanismos de ruptura identificados na análise cinemática — com dominância de tombamento de blocos e risco moderado de falhas em cunha —, foram estruturadas três alternativas técnicas de intervenção. As propostas foram condicionadas pela severa limitação de espaço físico no pé do talude, adjacente à pista de rolamento.

4.1 Alternativa 1: Retaludamento e limpeza de blocos instáveis

Esta alternativa consiste na modificação geométrica do corte por meio do abatimento da inclinação média atual de 78° para uma geometria de projeto com taludes escalonados em banquetas de descompressão. O processo prevê a execução de bermas de equilíbrio intermediárias para a interceptação de fragmentos menores e a remoção mecânica manual de todos os blocos rochosos identificados como instáveis na crista. Embora apresente elevada eficiência técnica a longo prazo, esta solução demanda expressivo volume de escavação em rocha sã a parcialmente alterada, gerando elevado índice de bota-fora. Adicionalmente, o avanço da crista do talude exigiria supressão vegetal massiva em área de preservação ambiental permanente e o uso de fogachos ou desmonte mecânico com restrição total de tráfego na rodovia.

4.2 Alternativa 2: Proteção passiva por estrutura de contenção rígida no pé

A Alternativa 2 propõe a manutenção da geometria atual do talude, associada à implantação de uma barreira física rígida fixada diretamente no pé do corte. A estrutura projetada consiste em um muro de gravidade em concreto ciclópico associado a uma cortina de amortecimento dútil de solo-pneu no tardoz, dimensionada para absorver a energia cinética e interceptar o impacto de blocos provenientes de eventos de *rockfall*. O principal limitador desta solução é a restrição de contorno geométrica da plataforma rodoviária. A largura necessária para a fundação e para o corpo do muro de gravidade avança sobre a calha de drenagem existente e reduz a largura útil da pista de rolamento, comprometendo o gabarito operacional da via e gerando risco de colisões diretas dos veículos contra a face da estrutura.

4.3 Alternativa 3: Estabilização ativa com proteção superficial e interceptação subparalela

A terceira alternativa adota uma abordagem combinada de intervenção ativa na face do maciço e contenção flexível periférica, baseada nas diretrizes de projeto para cortes em rocha da *Federal Highway Administration* (FHWA, 2012). A solução subdivide-se em três sistemas integrados:

1. Estabilização Ativa do Maciço: Aplicação de chumbadores passivos em barra de aço (CA-50, Ø25 mm, comprimento de 4,0 a 6,0 m) injetados com calda de cimento em furos preenchidos sob pressão. O objetivo é costurar as descontinuidades verticais da família F2, impedindo o momento de tombamento das colunas rochosas e travando as cunhas formadas pelas famílias F1/F5.
2. Proteção Superficial: Revestimento da face do talude com tela metálica de alta resistência à tração (tipo malha de arame de aço de alta resistência) ancorada e tensionada pelas placas dos próprios chumbadores. O sistema atua no guiamento controlado de fragmentos gerados por desintegração granular (W3-W4).
3. Drenagem Profunda: Instalação de drenos subhorizontais profundos (DHPs) com tubos de PVC ranhurados (comprimento mínimo de 8,0 m) dispostos na base do corte para aliviar as pressões neutras induzidas por picos de precipitação.

5 MATRIZ QUALITATIVA DE APOIO À DECISÃO E DISCUSSÃO

A seleção da alternativa definitiva de intervenção foi estruturada por meio de uma matriz qualitativa de apoio à decisão. Conforme estabelecido na premissa metodológica deste trabalho, a abordagem consistiu em uma análise comparativa direta do impacto potencial de cada solução frente às condicionantes de contorno do trecho rodoviário, sem a atribuição de pesos numéricos, notas ou ponderações estatísticas às alternativas, evitando distorções matemáticas em parâmetros qualitativos.

Para a estruturação da matriz, as soluções foram confrontadas com três dimensões principais de impacto, subdivididas em subcritérios técnicos específicos:

- Dimensão Socioeconômica: Avalia o custo relativo de implantação (insumos e equipamentos), o tempo estimado de execução da obra e o nível de interferência no fluxo logístico e comercial (necessidade de interrupção total ou parcial do tráfego).
- Dimensão Socioambiental: Pondera a necessidade de supressão vegetal na crista do talude, o volume de escavação e geração de bota-foras em rocha e a degradação visual da encosta exposta.
- Dimensão de Segurança Operacional: Avalia o risco residual à segurança dos usuários após a intervenção e a complexidade de operação, inspeção e manutenção dos sistemas implantados.

Os resultados da análise comparativa qualitativa estão consolidados na Tabela 5.1

Tabela 5.1– Matriz de avaliação multicritério das alternativas de estabilização

Dimensão / Critério	**Alternativa 1: Retaludamento**	**Alternativa 2: Muro de Gravidade**	**Alternativa 3: Estabilização Ativa**
Socioeconômica			
Custo de Implantação	Elevado	Moderado	Moderado a Elevado
Prazo de Execução	Elevado	Moderado	Reduzido
Interferência no Tráfego	Crítica (Bloqueio total)	Moderada (Meia pista)	Baixa (Fluxo controlado)
Socioambiental			
Supressão Vegetal	Elevada	Nula	Baixa / Localizada
Geração de Bota-fora	Crítica (Alto volume)	Baixa	Nula
Segurança Operacional			
Risco Residual (Segurança)	Reduzido	Moderado (Risco de transbordo)	Reduzido
Complexidade de Manutenção	Baixa	Baixa	Moderada

A análise integrada da Tabela 5.1 fundamenta a seleção da Alternativa 3 como a solução de engenharia ideal para o cenário analisado. Embora a Alternativa 1 (Retaludamento) elimine na fonte o risco de instabilidade, sua viabilidade é anulada pelos impactos socioambientais e econômicos críticos. O desmonte de grandes volumes de rocha exigiria interrupções prolongadas no tráfego da rodovia e causaria severa degradação em área de preservação.

A Alternativa 2 (Muro de Gravidade), por sua vez, esbarra na restrição geométrica intransponível descrita no diagnóstico local. A ocupação física da fundação e do corpo do muro de concreto ciclópico no pé do talude estrangula a plataforma viária, eliminando os elementos de drenagem longitudinal e avançando sobre a faixa de rolamento, o que inviabiliza sua execução do ponto de vista de segurança viária operacional.

Dessa forma, a Alternativa 3 (Estabilização Ativa) consolida-se como a melhor escolha técnica. Ela atua diretamente no travamento estrutural das famílias de fraturas críticas (especialmente o tombamento da família F2 e cunhas F1/F5) e no alívio de pressões neutras via DHPs, garantindo um risco residual reduzido de forma equivalente ao retaludamento. O diferencial competitivo da Solução 3 reside na sua total compatibilidade com o espaço físico restrito: as perfurações e a instalação das telas de alta resistência operam paralelamente à pista, demandando apenas sinalização de fluxo controlado (meia pista intermitente), sem geração de bota-foras e com mínima supressão vegetal. Portanto, a Solução 3 equilibra o fator de segurança geotécnico com as severas restrições operacionais e ambientais do trecho.

6 CONCLUSÕES

O estudo de alternativas aplicado ao talude rochoso permitiu correlacionar o diagnóstico estrutural do maciço granítico-gnáissico a restrições geométricas severas de contorno, fundamentando conclusões fundamentais para a estabilização de diretrizes rodoviárias em ambientes de escarpa.

A modelagem cinemática evidenciou que o arranjo estrutural do maciço é controlado por descontinuidades com avançado estado de intemperismo químico (W3 a W4). O mecanismo de tombamento de blocos (*toppling*), condicionado pela orientação preferencial da família F2 (82°/272°), consolidou-se como o modo de falha prioritário e de maior risco para a operação viária. A validação do gatilho hidrológico,

fundamentada nos dados oficiais da estação de Morretes (INMET), demonstrou que o acumulado histórico de 543,4 mm em outubro de 2023, associado a picos diários de precipitação concentrada de até 85,6 mm, atua diretamente na deflagração das instabilidades devido à rápida infiltração e consequente incremento de pressões neutras nas fraturas de alívio de tensão.

No âmbito da engenharia de intervenção, a aplicação da matriz multicritério qualitativa provou que as condicionantes geométricas locais exercem caráter eliminatório sobre as soluções convencionais. A Alternativa 1 (Retaludamento) demonstrou-se inviável devido à magnitude do desmonte de rocha exigido e aos impactos socioambientais decorrentes da supressão vegetal na crista e do volume de bota-fora gerado. De igual modo, a restrição física da plataforma rodoviária invalidou a execução da Alternativa 2 (Muro de Gravidade em Concreto Ciclópico), visto que o espaço requerido para a base estrutural comprometeria a calha de drenagem longitudinal e reduziria a largura útil da faixa de rolamento.

Por conseguinte, a Alternativa 3 (Estabilização Ativa) consolidou-se como a solução que apresentou o melhor desempenho comparativo na matriz qualitativa de apoio à decisão, mostrando-se a mais compatível com as restrições de contorno identificadas. Ao alinhar de forma equilibrada as dimensões socioeconómica, socioambiental e de segurança operacional, a associação de chumbadores passivos para o travamento estrutural do plano de tombamento da família F2, malha metálica de alta resistência para o guiamento de fragmentos superficiais e drenos sub-horizontais profundos (DHPs) para o alívio das subpressões hídricas garante o reestabelecimento do fator de segurança do talude. Esta solução concilia a estabilização geotécnica definitiva à manutenção da capacidade operacional da via, operando sem a necessidade de interrupções críticas de tráfego ou danos severos à morfologia local.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao DER/PR pela autorização para publicação do presente artigo. Agradecem igualmente às equipes FG Fundações e Geotecnia e Moretti Engenharia Consultiva que tornaram possível a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Províncias estruturais brasileiras. In: Geologia do Brasil. São Paulo: Edusp, 2000.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. Rock Slopes: Design, Construction, and Maintenance. Publication No. FHWA-NHI-99-007. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2012.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. C.; SILVA, L. C.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. A. A Província Mantiqueira. In: Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004.

HOEK, E.; BRAY, J. Rock Slope Engineering. 3rd ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa: Dados Diários e Mensais da Estação Automática de Morretes (A864) - Outubro de 2023. Brasília: INMET, 2023. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS - ISRM. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. Lisbon: ISRM, 2007.

MINEROPAR – Minerais do Paraná S.A. Atlas Geológico do Estado do Paraná. Curitiba: Mineropar, 2006.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. Rock Slope Engineering: Civil and Mining. 4th ed. London: Spon Press, 2004.