

# Análise da Estabilidade de Taludes Rochosos com Base em Mapeamento Estrutural e Análises Cinemáticas

Natalia Moschen Bottecchia

Engenheira Geotécnica, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, natalia.bottecchia.ext@sondotecnica.com.br

Daniela Santos Rangel

Geóloga Geotécnica, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, daniela.rangel@sondotecnica.com.br

Érica Pereira Affonso Guedes

Engenheira Geotécnica, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, erica.guedes@sondotecnica.com.br

Rafael Junqueira Villela

Coordenador de Geotecnia, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, rafael.villela@sondotecnica.com.br

Lucas de Araujo Estanqueiro

Engenheiro Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, lucasestanqueiro@gmail.com

**RESUMO:** A duplicação prevista para a Rodovia BR-386/RS, no trecho próximo ao município de Marques de Souza, no Rio Grande do Sul, envolve a execução de cortes em áreas predominantemente constituídas por maciços rochosos resistentes e heterogêneos, marcados por fraturas preferenciais e recobertos por camadas superficiais alteradas. Nessas regiões, foram realizadas inspeções de campo, sondagens mistas, mapeamentos geológicos e estruturais dos maciços expostos, além de análises cinemáticas. O objetivo foi definir os parâmetros de resistência para a determinação da segurança dos taludes de corte em maciços rochosos no programa RocSlope2 da RocScience, utilizando o critério de Barton-Bandis (1982) para descontinuidades sem preenchimento e o critério de Mohr Coulomb para aquelas preenchidas. Essa abordagem permitiu uma avaliação mais precisa dos mecanismos suscetíveis à ruptura. Para os trechos que apresentaram um fator de segurança abaixo do recomendado pelas normativas técnicas, foi proposto o abatimento do talude de corte ou uma solução de estabilização por meio da instalação de telas metálicas e chumbadores, visando mitigar os riscos associados à instabilidade de blocos rochosos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise de Estabilidade de Taludes Rochosos; RocSlope2; Mapeamento Estrutural; Análise Cinemática; Barton-Bandis; Mohr-Coulomb.

**ABSTRACT:** The planned duplication of Highway BR-386/RS, near the municipality of Marques de Souza, in the state of Rio Grande do Sul, involves the execution of cuts in areas predominantly composed of resistant and heterogeneous rock masses, characterized by preferential fractures and covered by superficial layers. In these regions, field inspections, mixed borehole investigations, and geological and structural mappings of the exposed rock masses were carried out, along with kinematic analyses. The objective was to define the strength parameters required to assess the stability of cut slopes in rock masses using the RocSlope2 program by RocScience, applying the Barton-Bandis (1982) criterion for unfilled discontinuities and the Mohr-Coulomb criterion for filled ones. This approach allowed for a more accurate assessment of mechanisms susceptible to failure. For sections that showed a factor of safety below the values recommended by technical standards, mitigation measures were proposed, including slope flattening or stabilization solutions through the installation of wire mesh and rock bolts, aiming to reduce the risks associated with block instability.

**KEYWORDS:** Rock Slope Stability Analysis; RocSlope2; Structural Mapping; Kinematic Analysis; Barton-Bandis; Mohr-Coulomb.

## 1 INTRODUÇÃO



A duplicação prevista para a Rodovia BR-386, no Rio Grande do Sul, busca maior segurança viária e redução do tempo de deslocamento diante ao aumento no volume de tráfego ao longo das últimas décadas, especialmente de veículos pesados.

No segmento localizado entre os km 323+056 e km 325+800, próximo ao município de Marques de Souza, a duplicação envolve a execução de cortes em maciços rochosos resistentes. Esses cortes constituem um desafio técnico relevante para a engenharia geotécnica, especialmente em regiões montanhosas, onde há a necessidade de vencer desníveis significativos. A escavação desses maciços altera o estado de tensões *in situ* e expõe superfícies de fraqueza previamente estáveis, favorecendo o desenvolvimento de mecanismos de ruptura.

As instabilidades podem ocorrer sob diversas formas, entre as quais se destacam o deslizamento planar, tombamento direto, tombamento flexural, deslizamento em cunha e rupturas circulares e/ou mistas. Essas últimas geralmente ocorrem em maciços com características homogêneas, como rochas intactas e brandas ou maciços rochosos muito alterados e fraturados, que não serão objeto de estudo deste artigo. Enquanto os demais mecanismos de instabilidade mencionados ocorrem em maciços rochosos com famílias de descontinuidades preferenciais, sendo influenciados pela orientação e persistência dessas descontinuidades em relação à face do talude, assim como pelas propriedades de resistência ao cisalhamento ao longo dos planos de fraqueza.

Quando não identificadas e tratadas adequadamente, essas instabilidades podem comprometer a segurança dos usuários da rodovia, além de gerar custos elevados com obras corretivas e interrupções operacionais. Nesse contexto, a caracterização geológico-geotécnica dos maciços rochosos, aliada à compreensão dos mecanismos de instabilidade, bem como à aplicação de ferramentas como as análises cinemáticas e análises de estabilidade determinísticas, são fundamentais para subsidiar os projetos de geometria e terraplenagem, bem como avaliar a necessidade de medidas de estabilização desses taludes.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo apresentar as análises de estabilidade determinísticas realizadas por meio do programa RocSlope2 para os cortes em rocha previstos na duplicação da Rodovia BR-386, no trecho próximo ao município de Marques de Souza (RS), caracterizado por maciços rochosos resistentes e com fraturamento preferencial.

## 3 METODOLOGIA

A metodologia para avaliação da estabilidade dos maciços rochosos compreendidos entre os km 323+056 e km 325+800 de duplicação da BR-386 consistiu no mapeamento geológico e estrutural de campo, na interpretação de resultados de sondagens mistas e na aplicação de análises cinemáticas conduzidas no programa Dips, da Rocscience. Na sequência, foram conduzidas análises de estabilidade determinísticas no RocSlope2, a partir da definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das descontinuidades. Para isso, adotaram-se os critérios de ruptura de Barton-Bandis (1982), para juntas sem preenchimento, e o de Mohr-Coulomb, para aquelas com preenchimento.

### 3.1 Mapeamento Geológico e Estrutural

Para cada maciço mapeado, foram identificados os contatos geológicos e geomecânicos, os litotipos presentes, bem como foram levantadas as orientações estruturais (em dip direction/dip) e coletados dados *in situ* relativos à rocha intacta, às descontinuidades e ao maciço como um todo, com base no sistema de classificação Rock Mass Rating – RMR (Bieniawski, 1989). Esse mapeamento está detalhado em Rangel *et al.* (2025).

### 3.2 Análises Cinemáticas – Dips

Foi utilizado o software Dips, da empresa Rocscience (versão 8.027), para elaboração das projeções estereográficas, no qual as principais descontinuidades mapeadas em campo foram representadas em estereogramas, juntamente com o plano do talude projetado em rocha. A partir das projeções, foram conduzidas análises cinemáticas com o objetivo de identificar a suscetibilidade geométrica à ruptura.

Foi adotado ângulo de atrito básico de  $30^\circ$  e para os limites laterais de ruptura planar e tombamento flexural, considerou-se um valor de  $20^\circ$ , intermediário entre os limites sugeridos na literatura, como Goodman (1989), que recomenda  $30^\circ$ , e Hoek & Bray (1974), que indicam  $10^\circ$ .

### 3.2.1 Condições de Ruptura

#### ○ Ruptura Planar:

Para que ocorra a ruptura planar, as discontinuidades presentes no maciço devem possuir uma direção de mergulho ( $\alpha^\circ$ ) maior do que o ângulo de atrito interno do maciço ( $\phi^\circ$ ) e menor do que a direção de mergulho da face do talude ( $\beta^\circ$ ), aflorando na face. Com uma variação de mergulho em torno de  $20^\circ$  da direção do talude. A instabilidade do plano se dará quando o polo da discontinuidade estiver contido na zona crítica, sendo que a suscetibilidade geométrica à ruptura planar do talude será obtida pela razão entre o número de polos contidos na zona crítica por todos os polos presentes no estereograma (Goodman, 1989).

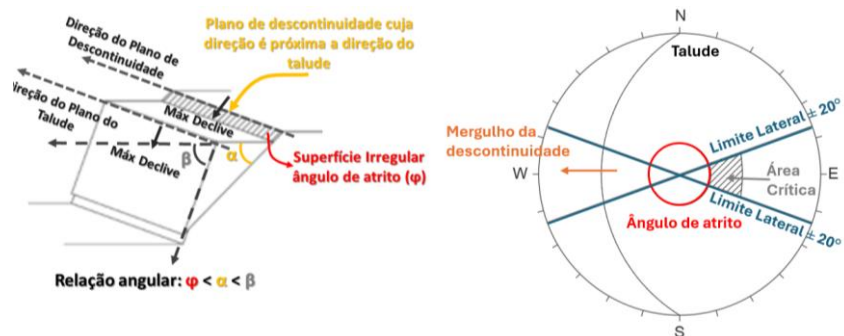


Figura 1 – Condição de ruptura planar.

#### ○ Ruptura em Cunha:

A ruptura em cunha ocorre quando há a intersecção de duas ou mais discontinuidades. A direção resultante do deslizamento é assumida como uma direção comum a ambas as superfícies. Para que a ruptura em cunha aconteça a linha da intersecção formada pelos planos deve aflorar na face do talude, conter um ângulo de mergulho ( $\alpha^\circ$ ) inferior ao ângulo do talude ( $\beta^\circ$ ) e superior ao valor do ângulo de atrito ( $\phi^\circ$ ). A suscetibilidade geométrica à ruptura por cunha no talude será obtida pela relação entre o número de intersecções presentes nas zonas críticas sobre o número de intersecções presentes no estereograma.

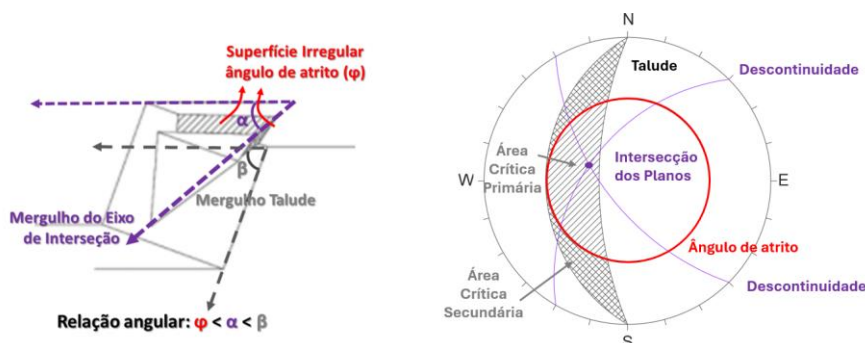


Figura 2 – Condição para ruptura em cunha.

#### ○ Tombamento:

O tombamento exige um deslizamento prévio entre as discontinuidades e ocorre quando estas se encontram quase paralelas à face do talude, apresentando direção de mergulho dentro de um intervalo lateral de  $\pm 20^\circ$ . A ruptura irá acontecer se a condição  $(90^\circ - \alpha) + \phi < \beta$  for atendida, sendo  $\alpha$  a inclinação da discontinuidade,  $\phi$  o ângulo de atrito e  $\beta$  a inclinação do talude. Na projeção estereográfica, isso significa que o polo da discontinuidade deve estar na zona crítica — área com inclinação maior que  $\phi$  abaixo da inclinação do talude. A suscetibilidade geométrica à ruptura por tombamento é dada pela proporção entre os polos contidos na zona crítica e o total de polos presentes no estereograma.

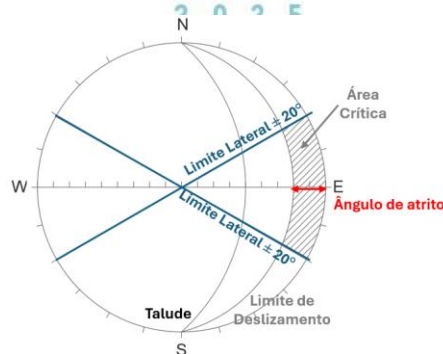


Figura 3 – Condição para ruptura por tombamento flexural.

### 3.3 Análise de Estabilidade Determinísticas – RocSlope2

As análises de estabilidade foram conduzidas no *software* RocSlope2, da Rocscience, que realiza avaliações tridimensionais a partir do método do equilíbrio limite de blocos instáveis controlados por descontinuidades geológicas. O programa permite simular diferentes mecanismos de ruptura, como planares, em cunha, tombamento direto e flexural, fornecendo os respectivos fatores de segurança. Além disso, também possibilita a consideração de forças externas, como cargas pontuais e pressão d'água, proporcionando maior realismo às análises.

Após a identificação dos mecanismos de ruptura presentes no talude de corte em rocha o FS foi calculado no *software*, utilizando os critério de ruptura de Barton-Brandis nos casos de juntas sem preenchimento, onde os parâmetros de *Joint Roughness Coefficient* (JRC), *Joint Compressive Strength* (JCS) e ângulo de atrito básico foram empregados e o critério de ruptura de Mohr-Coulomb para juntas abertas e preenchidas, onde determinou-se coesão ( $c'$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ) do material de preenchimento.

O perfil de rugosidade das juntas foi analisado a partir do levantamento de campo realizado com o pente de Barton. Na ausência de medições diretas, adotou-se  $JRC = 8$ . O JCS foi estimado em  $0,25C_0$  de acordo com Vargas e Marques (2022), onde  $C_0$  é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (223,38 MPa), valor obtido por martelo de geólogo em campo. Para o ângulo de atrito básico foi adotado o valor de  $30^\circ$ .

Conforme observado em campo, o material de preenchimento das juntas corresponde a um perfil de alteração. Dada a dificuldade na realização de ensaios de cisalhamento nesse tipo de material, optou-se por adotar, de forma conservadora, valores de coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ) representativos de materiais de baixa resistência característicos da região, a saber  $c=5\text{kPa}$  e  $\phi=24^\circ$ .

Além dos parâmetros de resistência, parâmetros geométricos do maciço rochoso fizeram parte da entrada de dados no programa, tais como: inclinação e altura do talude, inclinação e comprimento do topo do talude, inclinação e espaçamento das descontinuidades. Foi utilizado para peso específico do basalto o valor de  $27,1\text{ kN/m}^3$  de acordo com bibliografia técnica (Marques; Vargas, 2022).

A pressão d'água e sua variação ao longo da geometria do talude não foram considerados no cálculo do fator de segurança, uma vez que, caso haja presença de água em campo, serão instalados drenos horizontais profundos para eliminar essa pressão no maciço rochoso.

## 4 ESTUDO DE CASO

### 4.1 Geologia Local

A região de implementação do projeto de duplicação da Rodovia BR-386, está situada na Região Central do estado do Rio Grande do Sul, e integra a microrregião Lajeado-Estrela. A descrição das características geológicas locais foi amparada pela análise do Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul (Serviço Geológico do Brasil (SGB), 2006).

A unidade litoestratigráfica faz parte do Grupo Serra Geral e é composta por derrames basálticos, riolitos e riodacitos, sendo ela a Fácies Gramado (K1β gr), que é caracterizada pela presença de derrames basálticos granulares finos a médio, melanocrática cinza, horizontes vesiculares preenchidos por zeólitas, carbonatos, apofilitas e saponita, estruturas de fluxo e comuns, intercalações com os arenitos Botucatu (J3K1bt).

Durante o levantamento geomecânico, observou-se que a região é predominantemente constituída de cortes em rochas basálticas e dacitos/riodacitos, com cobertura de solo residual e/ou coluvial de pequena espessura, variando entre 0,5 m a 2,5 m. Em função dessas características, os principais cortes previstos para o trecho serão em maciços rochosos, classificados como materiais de 3ª categoria em escavação na terraplenagem.

## 4.2 Definição de Parâmetros Geológicos-Geotécnicos

No trecho de estudo foram identificados quatro maciços rochosos apresentados na Figura 4 e cuja extensão e altura crítica estão indicadas na Tabela 1.

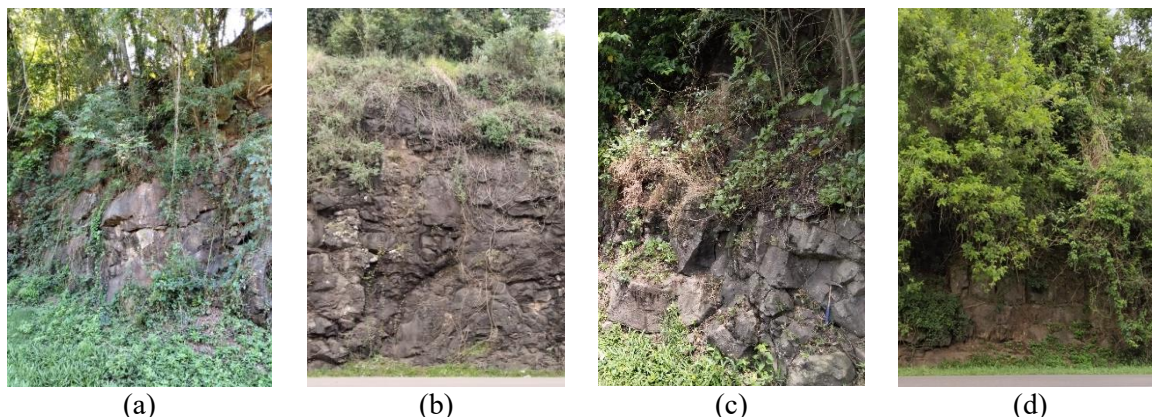


Figura 4 – (a) Maciço rochoso MR-KM323-01, (b) maciço rochoso MR-KM323-02, (c) maciço rochoso PONTO 11 e (d) maciço rochoso PONTO 12.

Tabela 1 – Maciços rochosos mapeados no trecho de estudo.

| Talude             | Km Inicial     | Km Final       | Extensão (m) | Seção crítica  | $h_{(máx)}$ (m) | $h_{(rocha)}$ (m) |
|--------------------|----------------|----------------|--------------|----------------|-----------------|-------------------|
| MR-KM323-01        | 323+325        | 323+535        | 210,00       | 323+400        | 20,20           | 16,67             |
| <b>MR-KM323-02</b> | <b>323+600</b> | <b>323+695</b> | <b>95,00</b> | <b>323+640</b> | <b>15,39</b>    | <b>8,10</b>       |
| PONTO 11           | 324+260        | 324+500        | 240,00       | 324+295        | 8,03            | 4,88              |
| PONTO 12           | 324+680        | 324+770        | 90,00        | 324+713        | 4,71            | 1,53              |

Dentre os trechos analisados, o estudo de caso será desenvolvido com base no maciço **MR-KM323-02**, situado entre os km 323+600 e km 323+695, em uma região de relevo montanhoso, cujas características geotécnicas apresentaram condições críticas para o projeto.

## 4.3 Análises Cinemáticas e Análises de Estabilidade Determinísticas

Para o MR-KM323-02 o mapeamento estrutural identificou a presença de quatro famílias de fraturas, denominadas FR1, FR2, FR3 e FR4. O talude projetado entre os KM 323+600 e KM 323+695 possui atitude de  $071^{\circ}/76^{\circ}$ . A Tabela 2 apresenta as orientações das famílias das descontinuidades mapeadas. Foi utilizado o limite lateral de  $20^{\circ}$  e o valor de ângulo de atrito básico de  $30^{\circ}$ , conforme mencionado na metodologia.

Tabela 2 – Resumo dos dados de entrada no dips referentes ao MR-KM323-02.

| Famílias de descontinuidades | Dip-Direction ( $^{\circ}$ ) | Dip ( $^{\circ}$ ) |
|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| FR1                          | 245                          | 60                 |
|                              | 244                          | 48                 |
|                              | 260                          | 48                 |
|                              | 242                          | 50                 |
|                              | 232                          | 45                 |
|                              | 261                          | 45                 |



|                  |     |    |
|------------------|-----|----|
|                  | 330 | 85 |
| FR2              | 350 | 80 |
|                  | 342 | 85 |
| FR3              | 130 | 80 |
|                  | 122 | 85 |
| FR4              | 256 | 10 |
|                  | 272 | 15 |
|                  | 263 | 20 |
| Talude 4(V):1(H) | 71  | 76 |

A partir da projeção estereográfica foram geradas as análises cinemáticas no *software* Dips, identificando a suscetibilidade geométrica a cada mecanismo de ruptura. Foi identificado potencial cinemático para ruptura por tombamento direto em 27,47% das discontinuidades analisadas e por tombamento oblíquo em 1,10%, conforme ilustrado na Figura 5(a). Para o tombamento flexural, o potencial cinemático foi de 35,71%, Figura 5(b). No caso de ruptura por cunha, 7,69% das discontinuidades apresentaram compatibilidade com esse mecanismo, Figura 5(c). Por fim, não foi identificado potencial cinemático para deslizamento plano, conforme Figura 5(d).

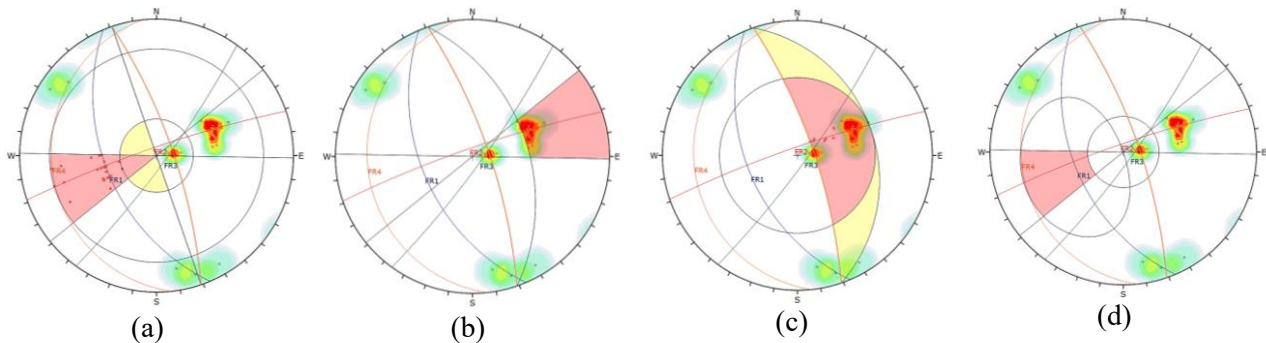


Figura 5 – Resultados das análises de cinemáticas para (a) tombamento direto e oblíquo, (b) tombamento flexural, (c) ruptura em cunha e (d) ruptura planar.

As análises de estabilidade foram conduzidas no RocSlope2 pelo método do equilíbrio limite. Os dados de entrada incluíram o peso específico do maciço, 27,1 kN/m<sup>3</sup>, as condições geométricas do talude projetado, conforme apresentadas na Figura 6, bem como os parâmetros de resistência para as discontinuidades do maciço rochoso definidos com base no modelo de ruptura adotado, Mohr Coulomb, para as famílias FR1, FR2, FR3 e FR4 que possuem preenchimento,  $c'=5\text{kPa}$  e  $\varphi=24^\circ$ . Outro parâmetro de entrada foi *overall base inclination*, que foi definido com base nas condições geométricas do talude e na orientação das famílias de fraturas nessa configuração.

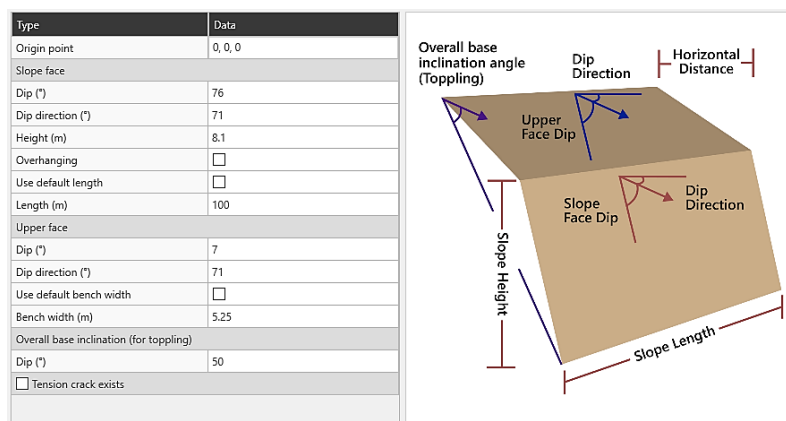


Figura 6 – Propriedades geométricas do talude de corte.

2 0 2 5

Uma vez identificado o potencial cinemático para ocorrência de ruptura por tombamento, foram inseridos no programa os valores de limite lateral de  $20^\circ$ , juntamente com o espaçamento das juntas da família da fratura responsável pela liberação lateral e as propriedades da família de fratura associada à liberação da base. Adotou-se um espaçamento mínimo de 60 centímetros, uma vez que espessuras inferiores a esse valor tendem a ser removidas durante o processo de escavação e limpeza (bate-choco).

Os resultados das análises de estabilidade para tombamento são apresentados na Figura 7, em que foi identificado um fator de segurança mínimo de **0,518**, sendo a família FR1 geradora da situação mais crítica. O programa não indicou a formação de rupturas planares. E por fim, a análise de estabilidade de ruptura por cunha indicou um fator de segurança de **1,478**, sendo a intersecção da família FR2 com a família FR3 a geradora da situação mais crítica, Figura 8.

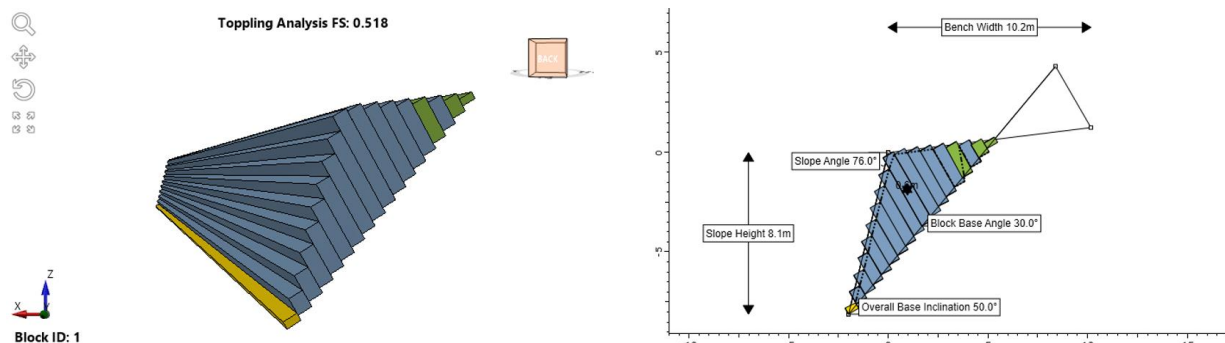


Figura 7 - Seção analisada para ruptura por tombamento com valor de  $FS=0,518$ .

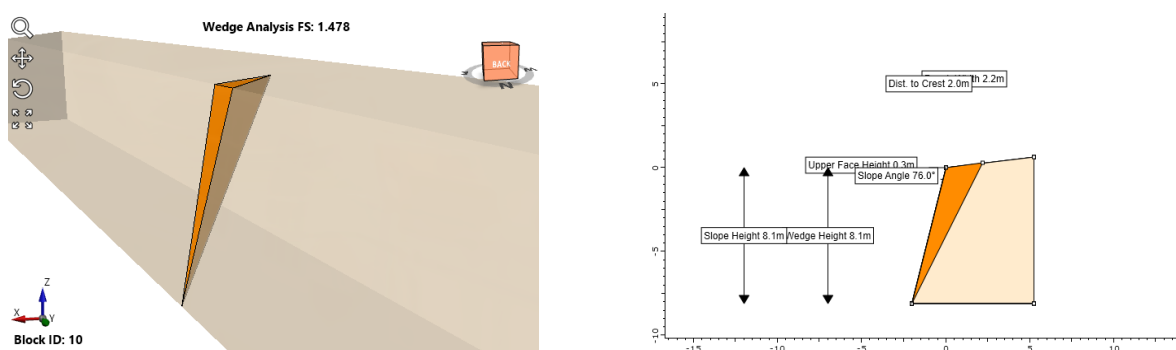


Figura 8 - Seção analisada para ruptura por cunha com valor de  $FS=1,478$ .

Observa-se que em ambos os casos não foi obtido um valor mínimo de  $FS$  de 1,5 indicando a necessidade de abatimento de talude de corte ou da implantação de solução de contenção com o uso de tela de alta resistência e chumbadores para estabilização do talude. Considerando que o abatimento do talude representa a alternativa de menor custo, a princípio, optou-se por essa solução. Com a nova inclinação de 1,00(V):1,00(H), foram realizadas novas projeções estereográficas e análises cinemáticas no software Dips. Foi identificado potencial cinemático para ruptura por tombamento direto em 12,09% e por tombamento oblíquo em 1,10% das descontinuidades analisadas, conforme Figura 9(a). Para os modos de tombamento flexural, Figura 9(b), ruptura por cunha, Figura 9(c), e deslizamento planar, Figura 9(d), não foi identificado potencial cinemático de ruptura.

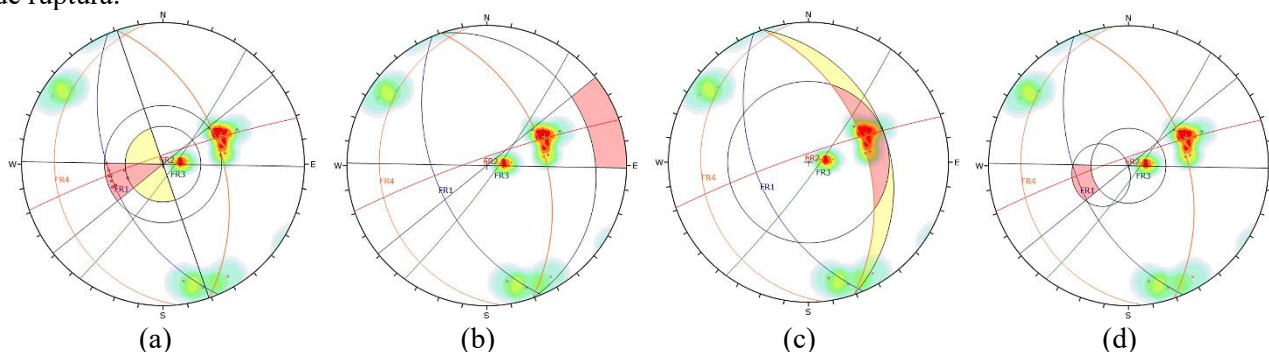


Figura 9 - Resultados das análises cinemáticas para (a) tombamento direto e oblíquo, (b) tombamento flexural, (c) ruptura em cunha e (d) ruptura planar.

Após o abatimento do talude, restaram apenas os modos por tombamento direto e oblíquo, indicando uma redução nas possibilidades de instabilidade. Foram conduzidas novas análises de estabilidade no RocSlope2 pelo método do equilíbrio limite para verificar a estabilidade da seção em relação ao tombamento. Essa análise é apresentada na Figura 10.

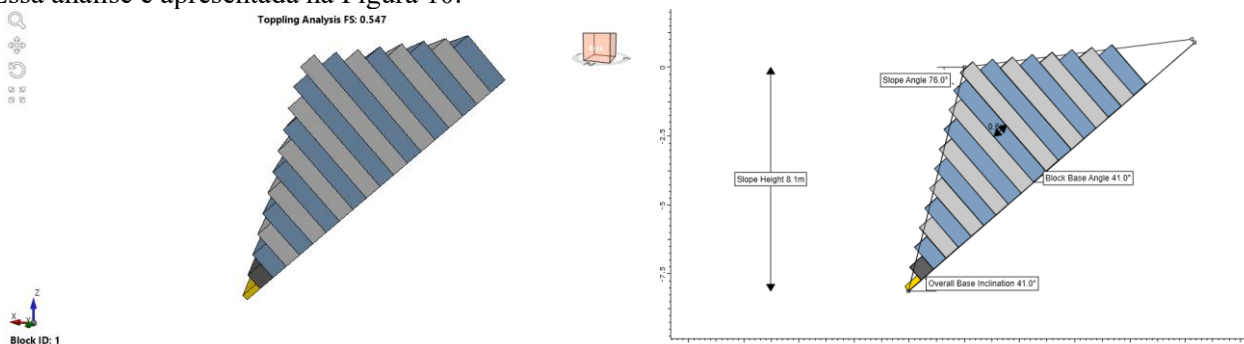


Figura 10 - Seção analisada para ruptura por tombamento com valor de  $FS=0,547$ .

Apesar da nova geometria com o abatimento do talude, observa-se na Figura 10 que a seção permaneceu instável. Diante disso, adotou-se como solução final de estabilização a aplicação de tela metálica de alta resistência TECCO® G45/2, associada a chumbadores tipo GEWI (Ø25 mm) com placa Spike Plate® P33. O comprimento dos grampos foi determinado a partir das superfícies críticas de ruptura obtidas nas análises do RocSlope 2, acrescido do comprimento mínimo de ancoragem, sendo este inferior a 3,0 m. Foi utilizado como referência o sistema GEOBRUGG, podendo ser adotados materiais equivalentes com desempenho igual ou superior.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um estudo de caso sobre a estabilidade de um talude de corte em rocha, no contexto do Anteprojeto de Duplicação da Rodovia BR-386/RS, no trecho compreendido entre os km 323+056 e km 325+309. A análise foi fundamentada no mapeamento geomecânico e estrutural dos maciços rochosos, bem como em análises cinemáticas.

A geometria típica adotada para os taludes de corte em rocha no trecho foi de 4,0(V):1,0(H). Embora tenha sido testado o abatimento do talude para uma inclinação de 1,0(V):1,0(H), essa medida mostrou-se insuficiente para garantir a estabilidade efetiva do maciço. Diante disso, adotou-se como solução final de estabilização a aplicação de tela metálica de alta resistência associada a chumbadores.

O estudo evidencia a relevância da caracterização geomecânica e estrutural, aliada às análises cinemáticas, para a estimativa adequada do fator de segurança (FS) em taludes rochosos e para a definição de soluções de estabilização técnica e economicamente viáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2009). *NBR 11682: Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- CCR Via Sul (2025). *Relatório Técnico VSL-386RS-323-325-DPL-ANT-RT-D3-002 – Estabilidade de Taludes. Projeto de Geotecnia, BR-386/RS*.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. Canada: John Wiley & Sons.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1974). *Rock slope engineering*. London: Institution of Mining and Metallurgy.
- Marques, E. A. G.; Vargas, E. A. (2022). *Mecânica das Rochas*. São Paulo.
- Rangel, D. S.; Souza, L. D. M.; Silva, J. M.; Bottecchia, N. B.; Melo, C. L. (2025). *Mapeamento Geomecânico e Estrutural e Análise Cinemática de Taludes Rochosos de Basalto em RS para Projetos Rodoviários*. Rio de Janeiro.
- Serviço Geológico do Brasil. (2006). *Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul*. Escala 1:750.000. Porto Alegre.