



Mapeamento Geomecânico e Estrutural e Análise Cinemática de Taludes Rochosos de Basalto em RS para Projetos Rodoviários

Daniela Santos Rangel

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

Mestranda, PPGG/UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Luís Diego Moraes Sousa

Geólogo, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, diego.moraes@sondotecnica.com.br

Natalia Moschen Bottecchia

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

Cleyson Lima Melo

Engenheiro Geotécnico, Sondotécnica, Rio de Janeiro, Brasil, cleyson.melo@sondotecnica.com.br

Jonas Mendes da Silva

Geólogo, UFRRJ, Rio de Janeiro, Brasil, jonasufrj@hotmail.com

RESUMO: Rodovias em regiões serranas com maciços rochosos íngremes, de grandes alturas e intensamente fraturados estão sujeitas a movimentos de massa, exigindo a estabilização dos taludes instáveis. Identificar quais fatores levam à ocorrência de movimentos de massa em maciços rochosos é muito importante para demarcar áreas de suscetibilidade e coordenar investimentos em obras de contenção. A região estudada corresponde a um trecho da Rodovia BR-386/RS, inserida no contexto geológico da Formação Serra Geral, na Bacia do Paraná. Este estudo teve como objetivo o mapeamento de maciços rochosos com previsão de cortes para duplicação prevista na rodovia, utilizando o sistema de classificação geomecânico RMR (Bieniawski, 1989) e o uso do *software Dips* para gerar análises cinemáticas probabilísticas para identificação de possíveis rupturas e de suas probabilidades. Os maciços rochosos mapeados foram classificados com qualidade geomecânica entre regular (classe III) e ruim (classe IV), utilizando o RMR. A pior classe identificada está associada à penalização relacionada às orientações desfavoráveis das descontinuidades no talude de corte em rocha. Estudou-se a influência das inclinações do talude projetado de corte em rocha, verificando-se que a adoção de uma inclinação de 1,00(V):1,00(H), correspondente 45°, é eficaz na redução e até eliminação dos principais mecanismos de ruptura atuantes.

PALAVRAS-CHAVE: Classificação Geomecânica, Análise Cinemática, Instabilidades, Taludes Rodoviários, Basalto.

ABSTRACT: Highways in mountainous regions with steep, high, and heavily fractured rock masses are subject to mass movements, requiring the stabilization of unstable slopes. Identifying the factors that lead to mass movements in rock masses is crucial for delineating susceptibility zones and guiding investments in slope stabilization works. The study area corresponds to a section of the BR-386/RS Highway, located within the geological context of the Serra Geral Formation in the Paraná Basin. This study aimed to map rock masses where cuts are planned for highway construction, using the RMR geomechanical classification system (Bieniawski, 1989) and the *Dips* software to perform probabilistic kinematic analyses for identifying potential failure modes and their associated probabilities. The mapped rock masses were classified as having fair (Class III) to poor (Class IV) geomechanical quality, according to the RMR system. The lowest classification identified is associated with penalties related to the unfavorable orientations of discontinuities in relation to the rock cut slope. The influence of the designed rock cut slope angles was analyzed, and it was found that adopting a slope inclination of 1.00(V):1.00(H), corresponding to 45°, is effective in reducing or even eliminating the main active failure mechanisms.

KEYWORDS: Geomechanical Classification, Kinematic Analysis, Instabilities, Highway Slopes, Basalt

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Rodovias em regiões serranas com maciços rochosos íngremes, de grande altura e intensamente fraturados estão sujeitas a movimentos de massa, exigindo estabilização dos taludes instáveis identificados ao longo de seu traçado. As rodovias situadas nas regiões de serra no estado do Rio Grande do Sul, em domínio de basaltos da Formação Serra Geral, estão inseridas em um contexto geomorfológico de escarpa da Serra Geral com altitudes que podem oscilar entre 300 a 1.000 metros (SILVEIRA, 2016). Neste contexto, a Rodovia BR-386/RS localiza-se em uma região de grande suscetibilidade à movimentos de massa em maciços rochosos, com histórico de instabilidade de taludes rochosos.

Determinar quais fatores levam à ocorrência de movimentos de massa associados a maciços rochosos é muito importante para demarcar as áreas de risco e coordenar os investimentos em obras de contenção, de maneira a evitar que mais vidas sejam afetadas por esse tipo de acidente (BLAUDT et al., 2021).

Com o objetivo de antecipar, impedir ou mitigar esses eventos, sistemas de classificação geomecânica são amplamente utilizados para a caracterização quantitativa da qualidade dos maciços rochosos, com base em propriedades geomecânicas e estruturais. Esses sistemas visam prever o comportamento geomecânico dos maciços rochosos e de suas descontinuidades, fornecendo subsídio para análises de estabilidade e para a definição de estruturas de contenção adequadas.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

O trecho de estudo está localizado entre os km 323+056 e km 325+800 da Rodovia BR-386/RS, situado próximo ao município de Marques de Souza/RS. Com base no Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul (SGB/CPRM, 2006), a região de interesse desenvolve-se integralmente sobre a Fácies Gramado ($K1\beta$ gr) da Formação Serra Geral, pertencente ao Grupo São Bento, conforme apresenta a Figura 1. Essa formação é composta por derrames basálticos, riolacitos e riólitos. A Fácies Gramado ($K1\beta$ gr) caracteriza-se por 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.

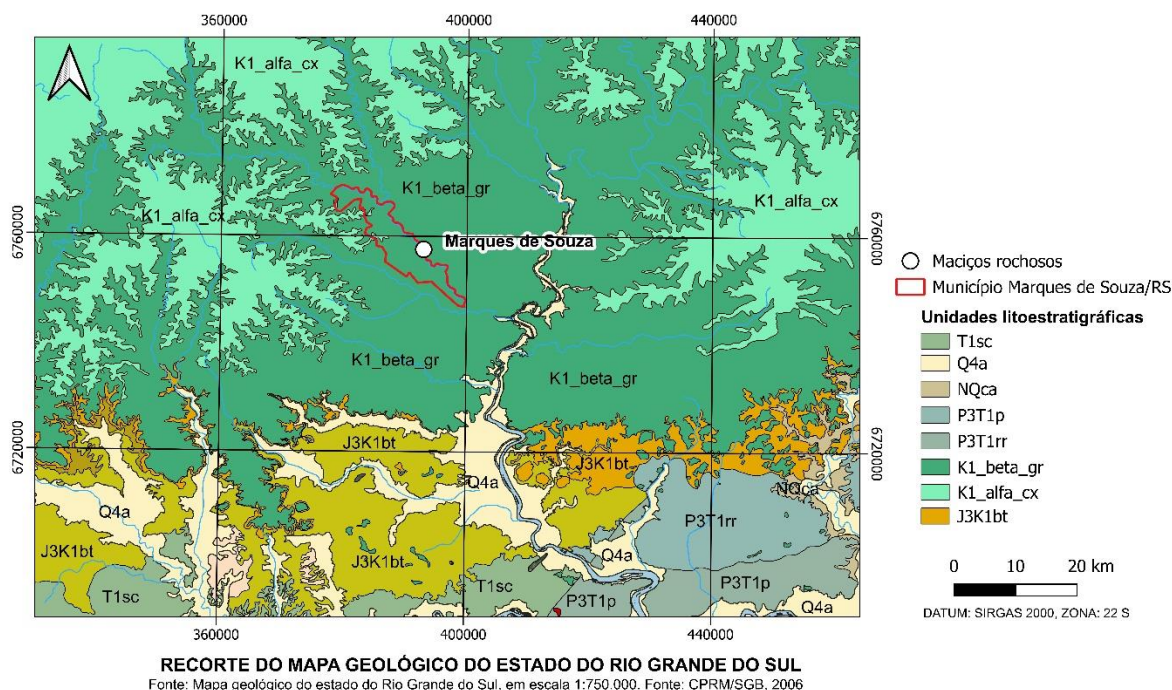


Figura 1 - Recorte do mapa geológico regional do Estado do Rio Grande do Sul, em escala 1:750.000, com destaque para a delimitação do município Marques de Souza/RS, em vermelho, com a localização dos maciços rochosos mapeados. A unidade litoestratigráfica identificada corresponde as rochas ígneas basálticas da Fácies Gramado ($K1\beta$ gr), pertencente à Formação Serra Geral. Fonte: SGB/CPRM, 2006.

3 METODOLOGIAS

A classificação geomecânica foi realizada a partir do sistema de classificação *Rock Mass Rating* - RMR (Bieniawski, 1989). Além disto, buscou-se avaliar as possibilidades de ocorrência de rupturas através de análises cinemáticas probabilística, com a utilização do *software Dips*.

3.1 *Rock Mass Rating* - RMR (Bieniawski, 1989)

A classificação geomecânica dos maciços rochosos foi feita utilizando o sistema *Rock Mass Rating* - RMR (Bieniawski, 1989), com o objetivo de prever o comportamento dos maciços rochosos e de suas descontinuidades em taludes de cortes em rocha. Para cada maciço rochoso mapeado buscou-se identificar os litotipos, contatos geológicos e geomecânicos, além de serem aferidas as medidas dos dados estruturais em dip direction/dip, bem como a coleta de dados in situ da rocha intacta, das descontinuidades e do maciço rochoso através do sistema de classificação geomecânica *Rock Mass Rating* - RMR (Bieniawski, 1989).

O RMR avalia seis grupos de parâmetros geomecânicos considerados importantes para o comportamento de maciços rochosos com a atribuição de pesos, cujas pontuações combinadas resultam em classes geomecânicas que agrupam setores nos maciços rochosos de comportamentos similares. Essas classes variam de Classe I a V, com pontuação de 0 a 100 pontos, onde a Classe I (100 a 80 pontos) representa um maciço de comportamento excelente e a Classe V (20 pontos) indica um maciço com comportamento geomecânico extremamente fraco, conforme apresentado abaixo:

1. Resistência da rocha intacta (Mpa) - peso: 0 a 15;
2. *Rock Quality Designation* - RQD (%) - peso 3 a 20;
3. Espaçamento entre descontinuidades - peso: 5 a 20;
4. Padrão das descontinuidades - peso: 0 a 30;
5. Ação da água subterrânea - peso: 0 a 15 e
6. Orientação das descontinuidades - peso: 0 a - 60.

O peso relativo à condição das descontinuidades (grupo de parâmetros geomecânicos 4) é determinado pela soma dos cinco parâmetros: persistência, abertura, rugosidade, preenchimento e grau de alteração.

Destaca-se o parâmetro orientação das descontinuidades (parâmetro geomecânico 6), que considera o efeito das orientações das descontinuidades em relação à orientação do talude de corte, proporcionando uma aplicação dos dados estruturais dos planos das descontinuidades mapeadas de forma prática à classificação geomecânica. Trata-se de um parâmetro de ajuste com a penalização dos pontos somados, subtraindo os valores de ajuste variando de 0 a - 60 pontos e, portanto, podendo penalizar o maciço rochoso em até 60% dos pontos somados considerando os demais parâmetros.

3.2 *Dips*

Utilizou-se o *software Dips*, da empresa *Rocscience* (versão 8.027), para gerar projeções estereográficas, nas quais as principais descontinuidades mapeadas em campo são representadas em um estereograma, em conjunto com o plano do talude projetado de corte em rocha. A partir da projeção estereográfica gerou-se análises cinemáticas probabilísticas, para se identificar as possibilidades de ocorrência de rupturas.

Buscou-se avaliar as possibilidades de ocorrência de rupturas através de análises cinemáticas probabilísticas com a utilização de dados estruturais das principais descontinuidades mapeadas em campo, em conjunto com o plano do talude projetado de corte em rocha e o parâmetro de ângulo de atrito básico adotado como 30°. Para os limites laterais de ruptura planar e tombamento flexural, considerou-se um valor de 20°, intermediário entre as referências da literatura, onde Goodman (1989) sugere 30° e Hoek e Bray (1974) recomendam 10°.

A ruptura planar ocorre quando uma descontinuidade individual apresenta orientação aproximadamente paralela à direção do talude (dip-direction semelhante) e um mergulho (dip) inferior ao do talude, mas ainda suficientemente inclinado para permitir o deslizamento ao longo do plano. Essa condição exige que a superfície de descontinuidade seja desfavorável em termos de atrito e contenha ou intercepte a face do talude.

A ruptura em cunha acontece quando duas ou mais descontinuidades se interceptam formando uma "cunha" que pode deslizar ao longo da linha de interseção dessas estruturas. A direção dessa linha de interseção

deve estar aproximadamente paralela ao dip-direction do talude, e sua inclinação (dip) deve ser maior que o ângulo de atrito e menor que a inclinação do talude.

O tombamento é um modo de ruptura típico de maciços rochosos caracterizado pela rotação de blocos em torno de um eixo horizontal, geralmente na direção da face do talude, devido à perda de equilíbrio ou suporte lateral. Esse mecanismo ocorre quando as descontinuidades são subverticais ou apresentam altos ângulos de mergulho e estão orientadas aproximadamente perpendiculares ao dip-direction do talude, criando condições para a instabilidade por rotação.

4 RESULTADOS

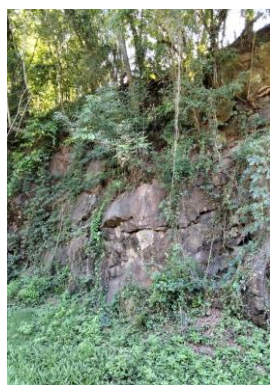
De forma geral, os maciços rochosos mapeados foram identificados como basalto, com intercalações pontuais de riódacitos, pertencentes à Fácies Gramado (K1β gr), com coloração cinza amarronzado e textura afanítica, com amígdalas esparsas preenchidas por minerais zeólitas, com alturas inferiores a 20 metros. São classificados como mediantemente resistentes (R3) a resistentes (R4). O índice de qualidade da rocha é classificado como regular (50-75%), com grau de fraturamento mediantemente fraturado. O afastamento entre as descontinuidades varia de 20 a 60 cm e sua persistência pode variar de pequena (1 a 3 m) a média (3 a 10 m), constituídas por superfícies pouco rugosas a rugosas. As descontinuidades apresentam aberturas de moderadamente abertas (1-5 mm) a abertas (>5 mm). O material de preenchimento é mole com espessuras de menores ou maiores que 5 mm e o grau de alteração das paredes das descontinuidades é levemente alterado. Esse comportamento foi confirmado em campo, com a observação visual de maciços rochosos secos, sendo identificado pontos molhados e úmidos. Ocorrem também camadas de solo residual e/ou coluvionar no topo dos maciços rochosos, variando entre 0,5 m a 1,0 m.

Os maciços rochosos mapeados foram classificados com qualidade geomecânica entre regular (classe III) e ruim (classe IV), sendo a pior classe associada ao parâmetro de ajuste com a penalização relacionada às orientações desfavoráveis das descontinuidades no talude de corte em rocha.

A Tabela 1 apresenta as informações referentes aos taludes, enquanto a Figura 2 apresenta os registros fotográficos de campo desses taludes.

Tabela 1 - Maciços rochosos mapeados no trecho de estudo, com destaque para o MR-KM323-02.

Talude	Km inicial	Km final	Extensão (m)	Seção crítica	h _(máx) (m)	h _(rocha) (m)	Classe RMR
MR-KM323-01	323+325	323+535	210,00	323+400	20,20	16,67	III REGULAR
MR-KM323-02	323+600	323+695	95,00	323+640	15,39	8,10	IV RUIM
MR-KM323-03	324+260	324+500	240,00	324+295	8,03	4,88	IV RUIM
MR-KM323-04	324+680	324+770	90,00	324+713	4,71	1,53	IV RUIM



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2 – (a) Maciço rochoso MR-KM323-01, (b) Maciço rochoso MR-KM323-02, (c) Maciço rochoso MR-KM323-03 e (d) Maciço rochoso MR-KM323-04.

Através das análises cinemáticas geradas com o *software Dips*, observou-se que os maciços rochosos classificados com qualidade geomecânica ruim, enquadrados na classe geomecânica IV, necessitavam de inclinação 1,00(V):1,00(H), de aproximadamente 45°, ao invés do valor mais usual de 4,00(V):1,00(H), para se reduzir e até eliminar mecanismos de rupturas nos taludes projetados de corte em rocha. Neste contexto,

será apresentado os resultados referentes ao maciço rochoso identificado como MR-KM323-02. A Tabela 2 apresenta os dados de entrada utilizados no *software Dips* ao maciço rochoso MR-KM323-02.

Tabela 2 - Dados de entrada no *software Dips* referentes ao maciço rochoso MR-323-02 e os dois cenários analisados de inclinações de corte do talude projetado.

Famílias de descontinuidades	Dip-Direction (°)	Dip (°)	Limite Lateral (°)	Ângulo de Atrito (°)
F1	245	60	20	30
	244	48		
	260	48		
	242	50		
	232	45		
	261	45		
F2	330	85		
	350	80		
	342	85		
F3	130	80		
	122	85		
F4	256	10		
	272	15		
	263	20		
Talude 1	071	76		
Talude 2	071	45		

A Figura 3 apresente o estereograma do maciço rochoso MR - KM323-02 com os planos médios das principais famílias mapeadas e seus respectivos pólos, além plano referente ao Talude 1 de inclinação 4,00(V):1,00(H), de aproximadamente 76°, e do Talude 2 de inclinação 1,00(V):1,00(H), de aproximadamente 45°.

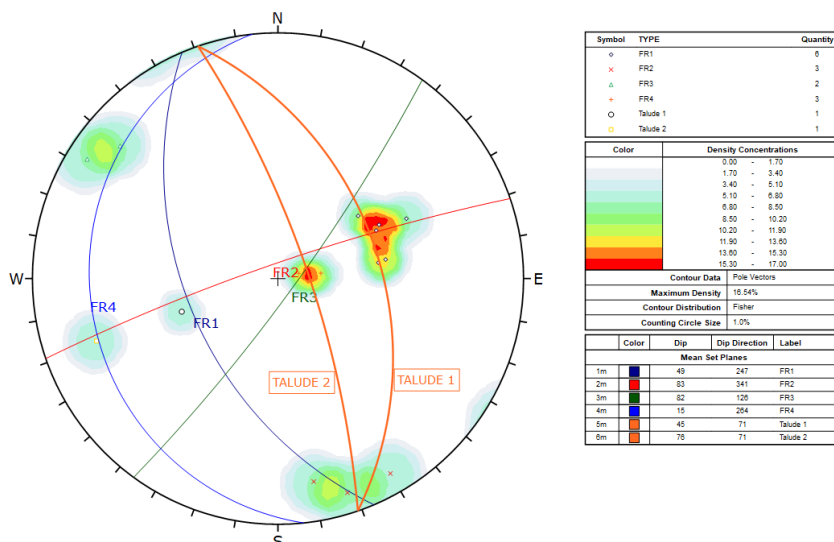


Figura 3 - Estereograma do MR-KM323-02 com os planos médios das principais famílias de descontinuidades e seus respectivos pólos, além do plano do Talude 1 e 2.

A partir da projeção estereográfica, gerou-se análises cinemáticas probabilísticas no *software Dips*, identificando-se as possibilidades de ocorrência de rupturas, considerando dois cenários de inclinações para o talude projetado de corte em rocha.

No primeiro cenário, ao analisar o Talude 1, de inclinação de corte 4,00(V):1,00(H), de aproximadamente 76°, observou a probabilidade de ocorrência de ruptura por tombamento direto de 27,47% (vide Figura 4), de tombamento flexural de 35,71% (vide Figura 5) e probabilidade de 7,69% para ruptura em cunha (vide Figura 6). Os demais modos de ruptura apresentaram probabilidade nula de ocorrência.

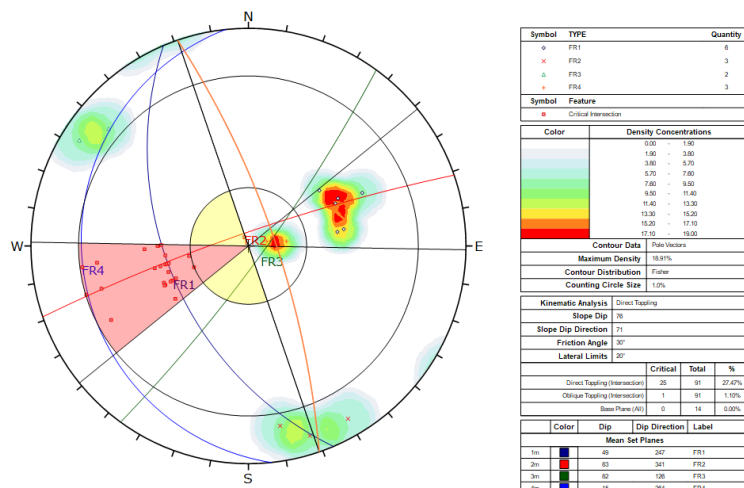


Figura 4 - Resultado da análise cinemática-probabilística do MR-KM323-02 com atitude do talude de corte de $071^{\circ}/76^{\circ}$ para a condição de ruptura por tombamento direto com 27,47% de probabilidade de ruptura.

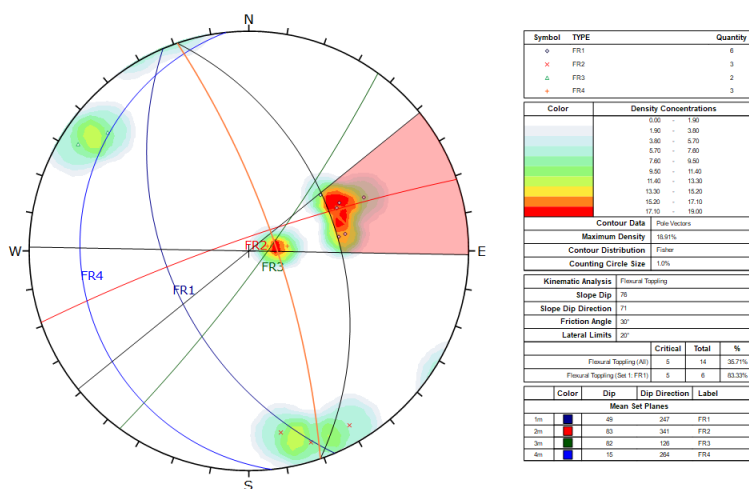


Figura 5 - Resultado da análise cinemática-probabilística do MR-KM323-02 com atitude do talude de corte de $071^{\circ}/76^{\circ}$ para a condição de ruptura por tombamento flexural com 35,71% de probabilidade de ruptura.

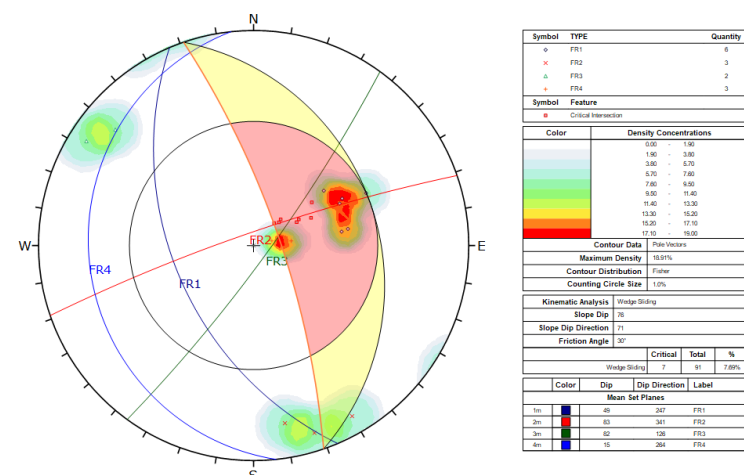


Figura 6 - Resultado da análise cinemática-probabilística do MR-KM323-02 com atitude do talude de corte de $071^{\circ}/76^{\circ}$ para a condição de ruptura em cunha com 7,69% de probabilidade de ruptura.

No segundo cenário, ao analisar o Talude 2, com o abatimento da inclinação do talude projetado de corte em rocha para 1,00(V):1,00(H), de aproximadamente 45° , observou-se redução da probabilidade para

tombamento direto em 12,09 % e a eliminação do tombamento flexural e da ruptura em cunha, conforme apresentado a seguir na Figura 7 a Figura 9.

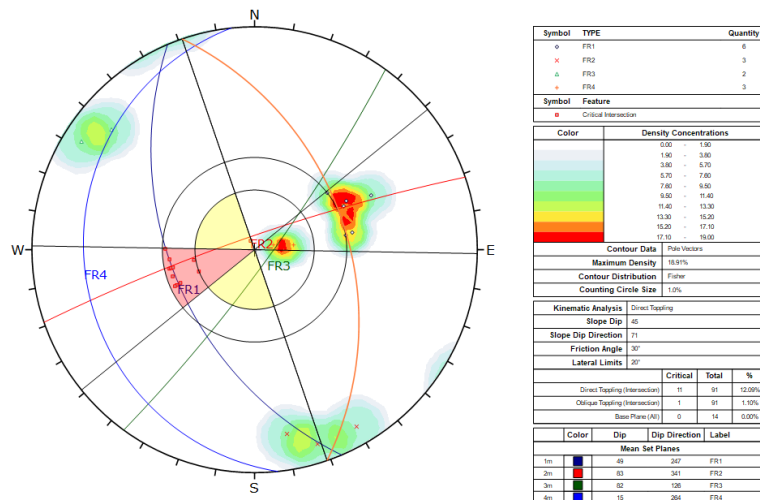


Figura 7 - Resultado da análise cinemática-probabilística do MR-KM323-02 com atitude do talude de corte de 071°/45° para a condição de ruptura por tombamento direto com 12,09% de probabilidade de ruptura.

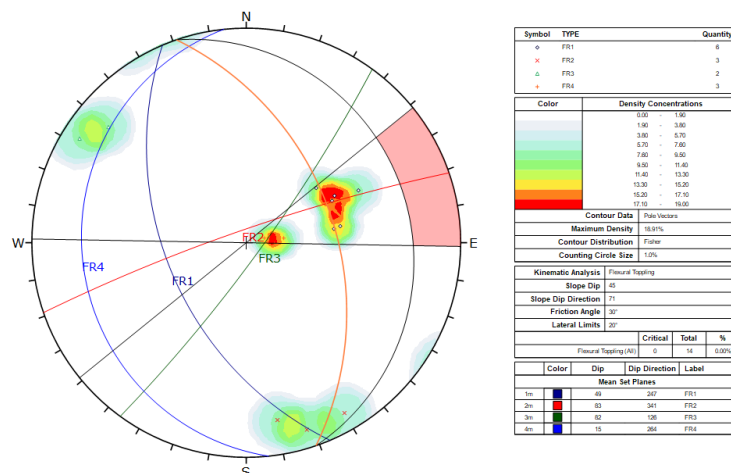


Figura 8 - Resultado da análise cinemática-probabilística do MR-KM323-02 com atitude do talude de corte de 071°/45° para a condição de ruptura por tombamento flexural com probabilidade de ruptura nula.

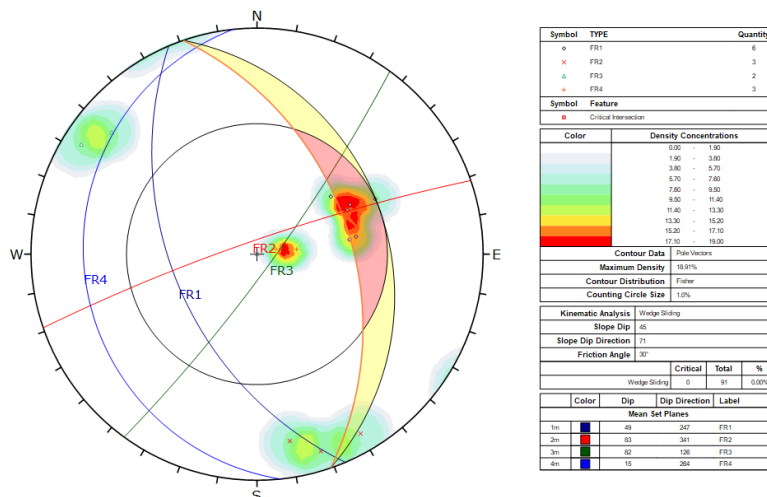


Figura 9 - Resultado da análise cinemática-probabilística do MR-KM323-02 com atitude do talude de corte de 071°/45° para a condição de ruptura em cunha com probabilidade de ruptura nula.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados do mapeamento geomecânico e estrutural dos maciços rochosos aflorantes na área de estudo, foi possível caracterizá-los em classes geomecânicas pela metodologia RMR (Bieniawski, 1989), permitindo a identificação dos maciços rochosos com as piores condições geomecânicas e o direcionamento de estudos mais detalhados.

Neste sentido, foram realizadas análises cinemáticas probabilísticas para o maciço rochoso MR-KM323-02, classificado com qualidade geomecânica ruim (Classe IV), cuja penalização no índice RMR esteve associada às orientações desfavoráveis das descontinuidades em relação ao talude de corte em rocha. Desta forma, estudou-se a influência das inclinações do talude projetado, verificando-se que a adoção de uma inclinação de 1,00(V):1,00(H), equivalente a aproximadamente 45°, foi eficaz na redução e até eliminação dos principais mecanismos de ruptura atuantes no maciço MR-KM323-02.

O estudo evidencia a importância do mapeamento geomecânico e estrutural detalhado associado à verificação dos dados estruturais das principais descontinuidades em relação à atitude do talude de corte em rocha através de análises cinemáticas. Tais estudos fornecem subsídios para estudos de estabilidade em taludes rochosos em obras rodoviárias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à empresa Sondotécnica Engenharia pela confiança e por oferecer um ambiente onde se valoriza e motiva o crescimento e aperfeiçoamento profissional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2009). *NBR 11682: Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York, USA.
- Blaudt, L. M.; Porto JR, R.; Garin, Y. *Condicionantes geológicas de movimentos de massa em maciços rochosos: estudo do acidente ocorrido na Rua Uruguai, Petrópolis, Rio de Janeiro, Brasil*. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- Bottecchia, N. M.; Rangel, D. S.; Guedes, E. P. A.; Villela, R. J.; Estanqueiro, L. A. (2025). *Análise da Estabilidade de Taludes Rochosos com Base em Mapeamento Estrutural e Análises Cinemáticas Probabilísticas*. Rio de Janeiro.
- CCR Via Sul (2024). *Relatório Técnico VSL-386RS-323-325-DPL-ANT-RT-D1-003 – Mapeamento Geomecânico e Classificação dos Maciços Rochosos, BR-386/RS*.
- CCR Via Sul (2025). *Relatório Técnico VSL-386RS-323-325-DPL-ANT-RT-D3-002 – Estabilidade de Taludes. Projeto de Geotecnia, BR-386/RS*.
- Gobbi, F. (2011). *Estudo do Comportamento Geomecânico de Rochas Efusivas da Formação Serra Geral e sua Aplicação na Modelagem Numérica de Túneis*. Porto Alegre.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. Wiley, 2nd ed., New York, USA.
- Silveira, R.M. *Comportamento Geotécnico das Encostas*. Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar, CREA-PR, 2016.