

ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES RODOVIÁRIOS EM BASALTO NA REGIÃO CENTRAL DO RS: MAPEAMENTO GEOMECÂNICO E ESTRUTURAL APLICADO A PROJETOS

Gabriela Macedo Miranda

Geóloga, JS Geologia Aplicada, São Paulo, SP, Brasil, gmiranda@jsgeo.com.br

Marcos Saito De Paula

Geólogo, JS Geologia Aplicada, São Paulo, SP, Brasil, msaito@jsgeo.com.br

Ricardo José Mirisola Rodrigues

Engenheiro Civil, MMF Projetos, São Paulo, SP, Brasil, ricardo.mirisola@mmfprojetos.com.br

Fernanda Castells Vidaller Laurino

Engenheira Civil, MMF Projetos, São Paulo, SP, Brasil, fernanda.castells@mmfprojetos.com.br

RESUMO: Rodovias em regiões serranas, em domínio de basaltos, na região central do Rio Grande do Sul são propensas a instabilidade de taludes devido ao intenso fraturamento dos maciços rochosos. As instabilidades são fenômenos recorrentes, colocando a segurança da via e dos usuários em risco e são pontos críticos para projetos e obras de engenharia, uma vez que estas rodovias são importantes corredores de carga e turismo. Este trabalho utilizou dados de projetos para estabilização de taludes rodoviários: foram estudados 43 taludes em rocha. O estudo teve como objetivo realizar a compartimentação dos taludes de basalto a partir de parâmetros geomecânicos, identificar os principais tipos de instabilidades: quedas de blocos a partir do talude, encostas a montante com potencial de rolamento de blocos, rupturas em cunha, planares e por tombamento e realizar uma análise da relação dos parâmetros geomecânicos e os índices de classificação de maciços rochosos. Os principais motivos para as instabilidades dos taludes foram: inclinações e métodos de escavação inadequadas ou mal dimensionados para a qualidade dos maciços, a abertura de fraturas a partir da vegetação e a falta de manutenção, de forma geral. Dos 43 taludes estudados, os problemas se distribuem em: quedas de blocos (93% dos casos), rupturas em cunha (52%), encostas a montante com potencial de rolamento de blocos (48%), rupturas planares (26%) e tombamento (26%). A comparação entre RMR e GSI obtidos de forma independente em campo resultou em uma correlação de 72% entre os dois parâmetros, considerada moderada a boa. A comparação entre os valores finais obtidos de RMR e os valores individuais de cada parâmetro do RMR mostrou que a água é o parâmetro mais homogêneo em todos os taludes e os demais parâmetros variam de forma consistente, mas o RQD, o espaçamento e condições das fraturas é que diferenciam os taludes dentro do mesmo compartimento. Foram utilizadas soluções de remoção de vegetação e bate-chocos, abatimento de talude, malhas de chumbadores com tela de alta resistência, muros de espera e barreiras dinâmicas para quedas de blocos.

PALAVRAS-CHAVE: Instabilidades, Taludes Rodoviários, Geomecânica, Basalto, Rio Grande do Sul

ABSTRACT: Highways in mountainous regions, within basaltic domains, in the central region of Rio Grande do Sul are prone to slope instability due to the intense fracturing of rock masses. These instabilities are recurring phenomena, posing risks to the safety of the road and its users and are critical points for engineering projects and works, as these highways are important corridors for freight and tourism. This work utilized data from projects aimed at stabilizing road slopes: 43 rock slopes were studied. The study aimed to compartmentalize the basalt slopes based on geomechanical parameters, identify the main types of instabilities: block falls from the slope, upstream slopes with potential block rolling, wedge failures, planar failures, and toppling, and perform an analysis of the relationship between geomechanical parameters and rock mass classification indices. The main reasons for slope instabilities were: inadequate or poorly dimensioned inclinations and excavation methods for the quality of the rock masses, the opening of fractures from vegetation, and a general lack of maintenance. Of the 43 slopes studied, the problems are distributed as follows: block falls (93% of cases), wedge failures (52%), upstream slopes with potential block rolling (48%), planar failures (26%), and toppling (26%). The comparison between independently obtained RMR and GSI in the

field resulted in a 72% correlation between the two parameters, considered moderate to good. The comparison between the final RMR values and the individual values of each RMR parameter showed that water is the most homogeneous parameter across all slopes, while the other parameters vary consistently, with RQD, spacing, and fracture conditions differentiating the slopes within the same compartment. Solutions such as vegetation removal and shotcrete, slope scaling, anchor meshes with high-strength nets, retaining walls, and dynamic barriers for block falls were used.

KEYWORDS: Instabilities, Highway slope, Geomechanics, Basalt, Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

Importantes rodovias brasileiras apresentam processos de instabilidade de taludes, que abrangem desde processos erosivos até movimentos gravitacionais de massas. Essas ocorrências geralmente são ocasionadas devido à uma investigação geológica-geotécnica insuficiente durante a concepção nas diferentes fases de projetos de engenharia (MATTOS, 2010).

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 1000 metros (SILVEIRA, 2016). Esse cenário geológico-geomorfológico apresenta grande susceptibilidade à ocorrência de instabilidades de taludes e movimentos de massa.

Diferentes parâmetros podem influenciar na ocorrência de instabilidades em encostas. Esses parâmetros podem ser associados a processos geológicos e geomorfológicos que atuaram no passado, e que, em muitos casos, ainda se fazem presentes (FERNANDES E AMARAL, 1998). As características da geomorfologia do terreno, as condições geológico-estruturais da rocha, a presença de água e a alternância de diferentes litologias apresentando camadas mais resistentes intercaladas com camadas menos resistentes e, sujeitas a sofrerem processos de degradação mais intensos, são exemplos de parâmetros que podem interferir na estabilidade de taludes.

Pinheiro (2000), descreve múltiplos processos de instabilidade em encostas no estado do Rio Grande do Sul e evidência que escorregamentos, quedas de blocos e rastejos em regiões de serra, em domínio de basaltos, são verificadas desde o ano de 1975. Outros estudos de investigações de instabilidades de taludes rodoviários no Rio Grande do Sul foram apresentados pelos autores: Bressani et al (1995) - Principais Tipos de Instabilidade de Taludes Junto a Rodovias do Estado do Rio Grande do Sul, Bianchini *et al.* (1998) - Estudo da Instabilidade de um Talude Rodoviário em São Jerônimo, RS., Bressani e Bica (1998) - Condicionantes Hidráulicos e Mecânicos de Algumas Rupturas de Taludes no Rio Grande do Sul, Ziebell (2017) - Mapeamento geotécnico dos principais condicionantes de ruptura de taludes de corte da duplicação da BR-116 entre São Lourenço do Sul e Barra do Ribeiro (RS), Porto (2018) - Análise de risco e probabilidade de ruptura em taludes de trecho de serra da BR-386, Rio Grande Do Sul, Nadalin *et al.* (2020) - Investigação geotécnica de taludes rochosos por meio da análise estrutural: estudo de caso da BR-116, Rio Grande do Sul.

Diante disso, é possível afirmar que fenômenos de instabilidades em taludes rodoviários no Rio Grande do Sul ocorrem ao longo décadas colocando a segurança da via e dos usuários em risco. Trata-se, portanto, de uma temática de atenção para projetos e obras de engenharia, uma vez que permeia diferentes setores da sociedade: social, econômico e ambiental. Dessa forma, é reforçada a necessidade da elaboração de estudos e metodologias técnicas na intenção de melhorar a segurança para estabilidade de taludes em rodovias, garantindo a aplicação de soluções adequadas de acordo com a patologia identificada para cada talude investigado.

2 ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO

O relevo da região central do Rio Grande do Sul é característico de escarpas serranas, sendo que as rodovias que cortam estas escarpas apresentam taludes verticais, com alturas que muitas vezes atingem 15 a 30 metros. Dentro desse contexto, esse trabalho utilizou dados de projetos de estabilização de taludes rodoviários em basalto na região central do Rio Grande do Sul. Foram estudados 21 trechos em rocha nas regiões dos municípios de Bento Gonçalves e Santa Maria. Cada trecho corresponde a um ou mais taludes, devido a compartimentação dos trechos (por homogeneidade de fraturamento e parâmetros geomecânicos). Com isso, o número resultante de taludes estudados foi de 43.

Afloram na região, rochas e solos residuais da Formação Serra Geral e Botucatu (Bacia do Paraná), como pode ser observado no mapa na Figura 1. As áreas de estudo são caracterizadas por rochas vulcânicas básicas a intermediárias: Basaltos, Dacitos, Latitos e Riodacitos. Ocorrem também, de forma pontual, rochas sedimentares: Arenitos. Os taludes analisados nesse estudo compreendem basaltos e dacitos da formação Serra Geral, conforme exemplos apresentados na Figura 2.

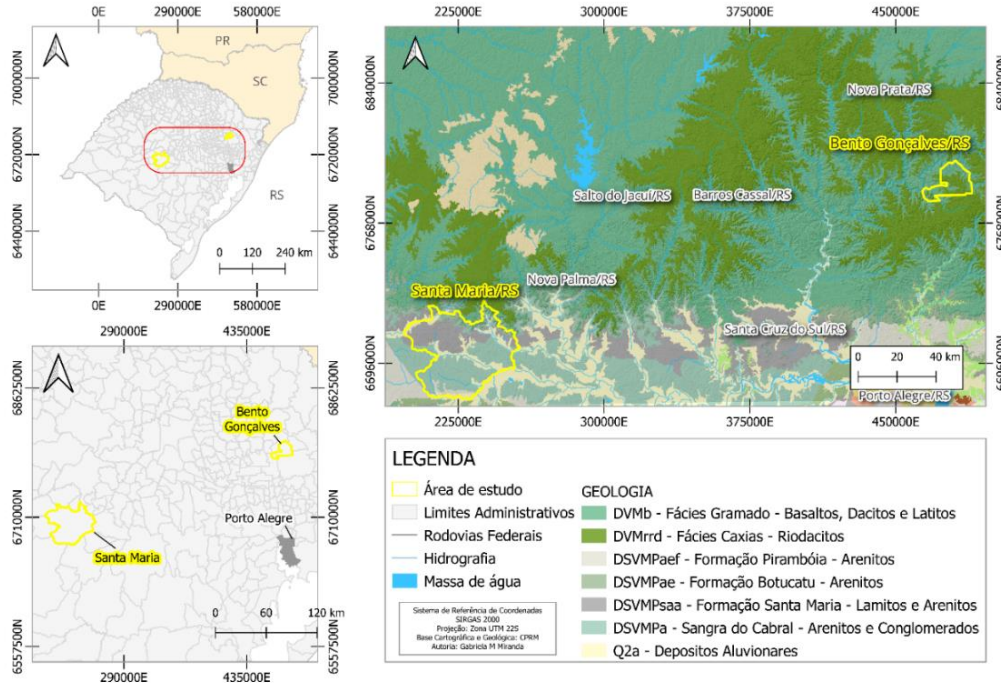


Figura 1. Mapa de localização e geológico da área de estudo. Fonte: Adaptado de CPRM, 2009.

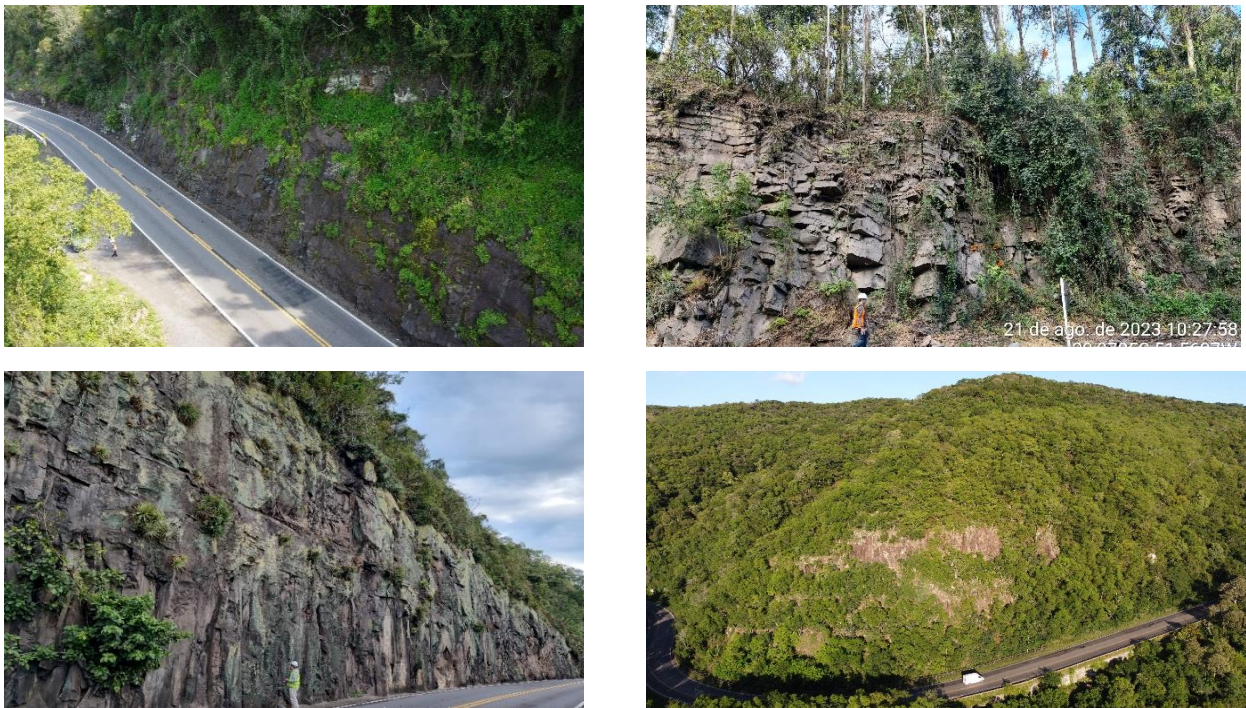


Figura 2. Registros gerais que ilustram alguns taludes alvo desse estudo.

3 METODOLOGIA

Através de inspeções de campo os taludes foram avaliados e mapeados. Os materiais foram descritos segundo o padrão de 1^a, 2^a e 3^a categoria, combinado com os seguintes horizontes de rocha e solo: – Solo de alteração de rocha (SAR) – 1^a categoria; Rocha alterada mole (RAM) – 2^a categoria; Rocha alterada dura (RAD) – 3^a categoria; Rocha sã (RS) – 3^a categoria, conforme a nomenclatura proposta por Vaz, (1996).

A classificação geomecânica foi realizada a partir dos sistemas de classificação *Rock Mass Rating* (RMR), (Bieniawski, 1989) e *Geological Strength Index* (GSI), (Hoek, 1994, 1997 e 2018), complementadas com alguns parâmetros do sistema Q (1977 *et al.* 1974). O propósito de se utilizar diversos métodos de classificação de maciço foi: a) utilizar o RMR em campo para compartimentar o maciço e guiar as diretrizes de soluções b) utilizar o GSI nas modelagens computacionais e c) utilizar parâmetros do Q, como Jr e Ja para auxiliar na definição de parâmetros como ângulo de atrito, útil nas análises cinemáticas e nas modelagens computacionais.

A análise da correlação entre os valores obtidos do RMR e do GSI e a comparação entre os valores obtidos do RMR e os valores individuais atribuídos para cada parâmetro do RMR - Resistência à compressão uniaxial (RCU), *Rock Quality Designation* (RQD), espaçamento, condição das fraturas e a presença de água, foram elaborados a partir da coleta de dados em campo, da compartimentação dos taludes e a elaboração de gráficos.

Foram elaboradas análises cinemáticas para avaliação das possibilidades de rupturas em cunha, tombamento e planares e os taludes foram compartimentados de forma que os riscos mapeados fossem setorizados.

Para a verificação das soluções geotécnicas, foram realizadas análises de estabilidade para as seções críticas dos trechos em estudo sendo então aplicadas soluções que mais se adequavam a cada caso.

A figura 3 apresenta algumas etapas de campo da metodologia desse trabalho.

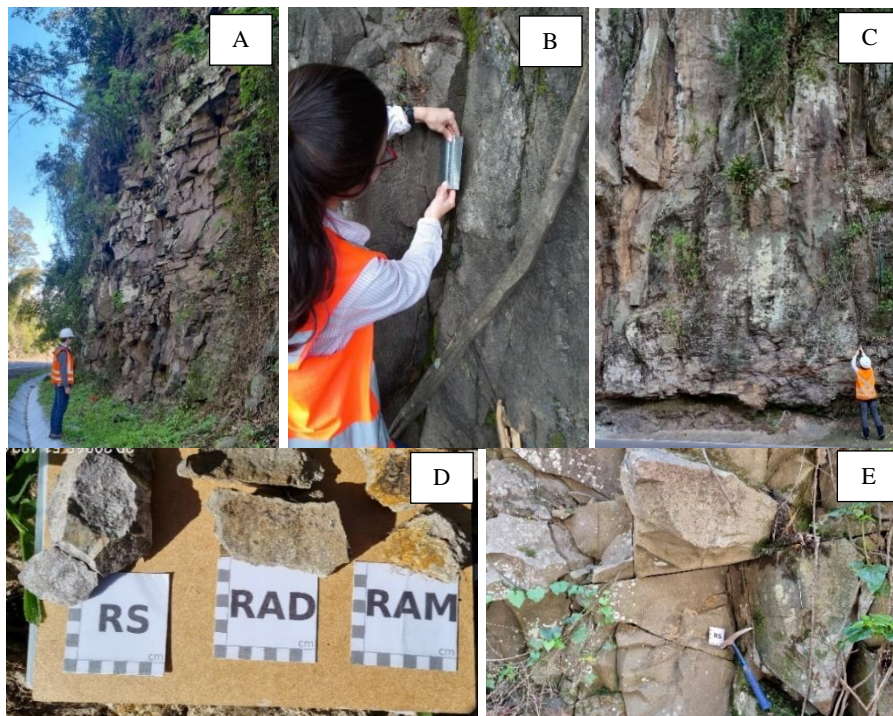


Figura 3. A: Análise visual dos aspectos geológico-geotécnicos do talude. B: Obtenção de parâmetros geomecânicos. C: Obtenção de medidas estruturais. D-E: Coleta de amostras de rocha.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os taludes se apresentaram muito fraturados, com fraturas preferencialmente em duas famílias: subverticais e subhorizontais. Foi possível visualizar, em alguns pontos, colunas formadas por esse tipo de litologia, também conhecidas como disjunção colunar. Em decorrência do alto grau de fraturamento foram

observados blocos caídos e rolados na região de pé do talude. Também foram notados taludes com inclinação negativa, e com fraturas mergulhando em direção a rodovia, colocando em risco o tráfego de usuários.

As análises cinemáticas identificaram os principais tipos de rupturas e problemas geológico-geotécnicos: rupturas planares, em cunha, por tombamento, rupturas em solo, quedas de blocos a partir do talude e encostas a montante com potencial de rolamento de blocos. Dos 43 taludes estudados, os problemas se distribuem em: quedas de blocos (93% dos casos), rupturas em cunha (52%), encostas a montante com potencial de rolamento de blocos (48%), rupturas planares (26%) e tombamento (26%). As porcentagens somam mais do que 100% pois o mesmo talude pode apresentar diversos tipos de ruptura simultaneamente.

Estes números mostram a recorrência de problemas geológico-geotécnicos em taludes na região, o que é refletido no grande número de ocorrências registradas e fechamentos das rodovias causados pelos fenômenos de ruptura listados.

Exemplos de estereogramas confeccionados para esse estudo podem ser visualizados na figura 4.

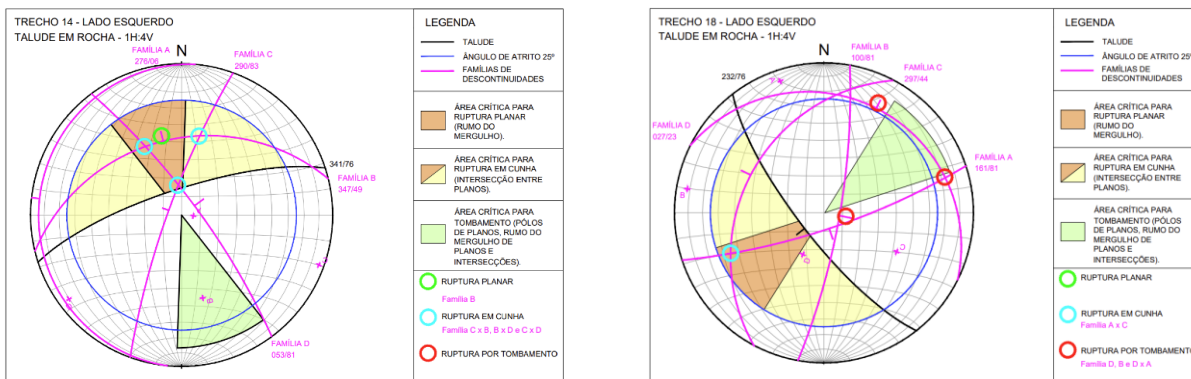


Figura 4. Exemplos de estereogramas gerados com os estruturas extraídas em campo.

A quantidade de 43 taludes estudados foi considerada satisfatória para que algumas tentativas de análise de relação entre parâmetros geomecânicos e índices de classificação de maciço rochoso fossem realizadas. É importante deixar claro que este trabalho não pretende tirar conclusões nem esgotar o assunto deste tipo de comparação, somente disponibilizar dados coletados em campo de forma criteriosa, para encorpar o conjunto de dados disponível na literatura técnica.

A primeira tentativa foi a comparação do comportamento dos índices RMR e GSI obtidos em campo. Os dados de cada sistema de classificação foram coletados de forma independente, ou seja, não foram utilizadas fórmulas de correlação para se obter um índice a partir de outro, cada método foi utilizado de acordo com as premissas estabelecidas pelos respectivos autores. Portanto os autores deste trabalho entendem que são dados valiosos e importantes de serem disponibilizados.

A relação entre os resultados obtidos do RMR e do GSI, conforme o gráfico apresentado na figura 5 demonstra uma correlação de 72%. Esse valor sugere uma relação moderada a boa. Isso indica que o método deste trabalho, de utilizar o RMR em campo para compartimentar o maciço e o GSI para as modelagens computacionais, foi satisfatório, uma vez que as notas dos dois índices segue a mesma tendência.

A segunda tentativa de comparação foi avaliar quais dos 5 parâmetros do RMR mais influenciam ou variam as notas obtidas pelos taludes. Em outras palavras: existem alguns parâmetros que são homogêneos para todos os maciços analisados e outros parâmetros é que governam a qualidade do maciço? Ou todos os parâmetros variam e os maciços são heterogêneos em todos os parâmetros geomecânicos? Para esta comparação, dos 43 taludes, foram selecionados 21 em 3 grupos: RMR > 70, RMR < 50 e RMR entre 50 e 70. Desta forma as análises agruparam taludes com RMRs próximos, para verificar se os parâmetros apresentam valores parecidos para resultarem nas mesmas notas finais.

Observando-se os gráficos apresentados nas Figuras 6, 7 e 8, pode-se notar que dois parâmetros em geral são homogêneos, com somente 1 ou 2 taludes em cada grupo de 7 sendo distintos: RCU e água. Desta primeira conclusão, nota-se que somente nos taludes com RMR < 50 é que as piores notas no parâmetro água resultaram nas piores notas gerais. Nos outros 2 grupos, as piores notas em água não são as piores notas gerais.

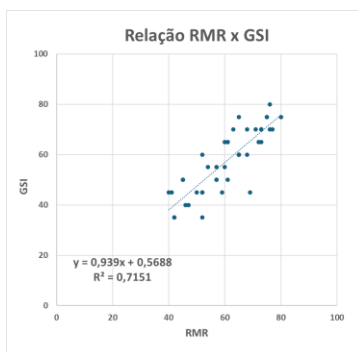


Figura 5. Relação entre os valores de RMR e GSI obtidos em campo para os 43 taludes analisados, de forma independente (não foram utilizadas fórmulas de correlação entre os métodos, cada método foi utilizado de acordo com as premissas estabelecidas pelos respectivos autores).

Da conclusão acima, resulta outra conclusão: os parâmetros RQD, espaçamento e condições das fraturas variam aparentemente sem padrão e com combinações diferentes resultam nas notas gerais de cada talude.

De forma geral, o parâmetro água é o mais homogêneo em todos os taludes. Os demais parâmetros variam de forma consistente entre os 3 grupos, mas o RQD, espaçamento e condições das fraturas é que diferenciam os taludes dentro do mesmo grupo.

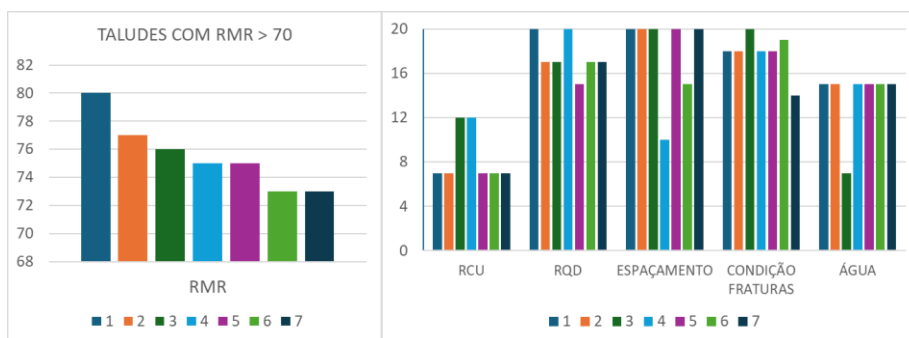


Figura 6. Taludes 1 a 7, com RMR > 70.

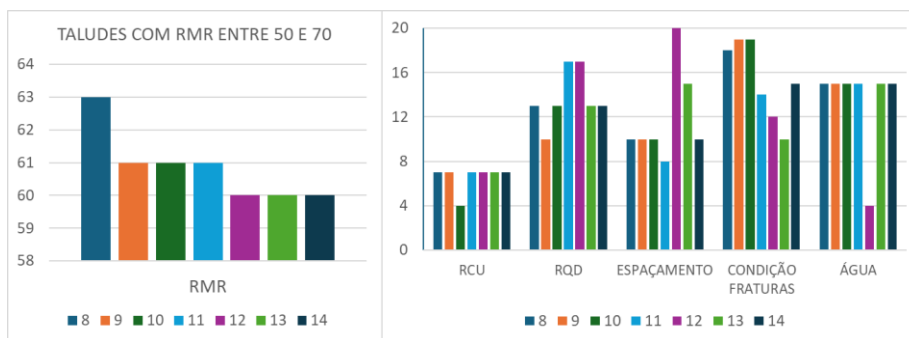


Figura 7. Taludes 8 a 14, com RMR entre 50 e 70.

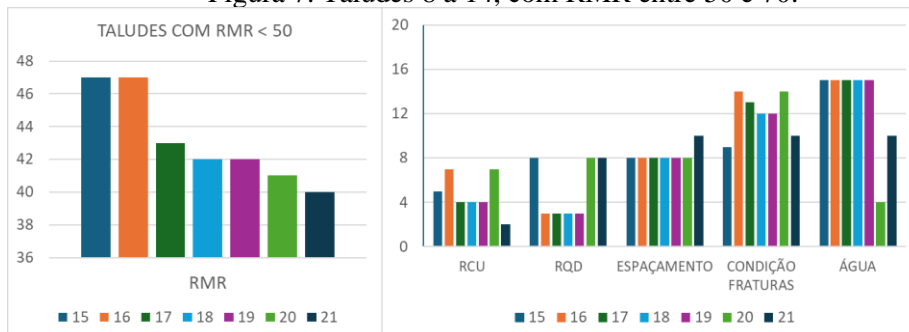


Figura 8. Taludes 15 a 21, com RMR < 50.

4 CONCLUSÕES

A partir da metodologia empregada nesse estudo, foi possível elaborar a compartimentação de 43 taludes rochosos em basalto, de forma que os riscos mapeados fossem setorizados, permitindo aplicação de soluções proporcionais e adequadas a cada trecho e talude.

Os principais motivos para as instabilidades dos taludes foram: inclinações e métodos de escavação inadequadas ou mal dimensionados para a qualidade dos maciços, a abertura de fraturas a partir da vegetação e a falta de manutenção, de forma geral.

Dos 43 taludes estudados, os problemas se distribuem em: quedas de blocos (93% dos casos), rupturas em cunha (52%), encostas a montante com potencial de rolamento de blocos (48%), rupturas planares (26%) e tombamento (26%). As porcentagens somam mais do que 100% pois o mesmo talude pode apresentar diversos tipos de ruptura simultaneamente.

A comparação entre RMR e GSI obtidos de forma independente em campo resultou em uma correlação de 72% entre os dois parâmetros, considerada moderada a boa. Este valor reforça o acerto na escolha da metodologia de projeto: RMR para compartimentação em campo e guia para diretrizes de soluções, e GSI para modelagens computacionais.

A comparação entre os valores de RMR, e os valores individuais de cada parâmetro RMR mostrou que: 1) a água é o parâmetro mais homogêneo em todos os taludes e 2) os demais parâmetros variam de forma consistente entre os 3 compartimentos, mas o RQD, espaçamento e condições das fraturas é que diferenciam os taludes dentro do mesmo grupo. Portanto, o que foi observado em campo, que o grau de fraturamento, a distribuição das fraturas e as condições delas são os principais fatores na instabilidade dos taludes rochosos, foi confirmado com esta análise.

É importante reforçar que a quantidade de dados (43 taludes) é somente razoável para os resultados apresentados, e estes resultados são tentativas de comparações, não conclusões definitivas. Outra ressalva importante é que estes resultados se aplicam somente aos basaltos do contexto geológico da área de estudo. Para outras rochas em outros contextos, estes resultados podem não ser válidos.

Nos taludes em maciços mais fraturados foi observado que a execução da escavação para construção da rodovia não foi satisfatória no que diz respeito a segurança da via. Há trechos em taludes com inclinação negativa e fraturas abertas, resultantes da má qualidade da escavação. Além disso, ficou claro que as características de comportamento estrutural padrão para esse tipo de rocha não foram levadas em consideração no momento da escavação.

Conforme as características dos taludes e as possibilidades de ruptura, diversos tipos de soluções de engenharia foram utilizados no projetos de estabilização das áreas de estudo. A partir dos dados dos taludes, foram efetuadas modelagens por equilíbrio limite Mohr-Coulomb, critérios de ruptura de Hoek-Brown, modelagens de rolamentos e queda de blocos, estabilidade de cunhas e de deslizamentos planares.

Foram adotadas soluções de remoção de vegetação e bate-chocos, abatimento de talude, malhas de chumbadores com tela de alta resistência, muros de espera e barreiras dinâmicas para quedas de blocos.

Se aplicados de forma correta, os projetos desenvolvidos podem viabilizar a segurança dos taludes estudados, reduzindo o número de acidentes e interdições nas rodovias, uma vez que foram adotadas soluções de forma criteriosa a partir de dados geológico-geomecânicas e observações de fenômenos em campo. Além disso, é de extrema importância que tais soluções considerem o comportamento característico do maciço como também, as características do relevo no qual ele está situado e que seja realizado o acompanhamento, monitoramento e manutenção periódica das soluções implantadas, uma vez que regiões de encostas e serras tem como evolução natural do relevo a ocorrência de fenômenos de dinâmica externa, como movimentos gravitacionais de massa: erosões, rolamentos de blocos e deslizamento..

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6, 189-236. Springer-Verlag.
- BARTON, N. & CHOUBEY, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics* (Springer-Verlag) 10, 1-54.

- BIANCHINI, M.R.; BRESSANI, L.A.; BICA, A.V.D.; PINHEIRO, R.J.B. (1998) Estudo da Instabilidade de um Talude Rodoviário em São Jerônimo, RS. In: XI COMBRAMSEG, Brasília. Anais: ABMS, v. II, p.1273-1280.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1989. Engineering rock mass classifications. New York: Wiley.
- BRESSANI, L.A.; BICA, A.V.D.; TONON, J. (1995) Principais Tipos de Instabilidade de Taludes Junto a Rodovias do Estado do Rio Grande do Sul. In: 29º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Cuiabá, MT. Anais: ABPv, v.2, p. 516-527.
- BRESSANI, L.A.; BICA, A.V.D. (1998) Condicionantes Hidráulicos e Mecânicos de Algumas Rupturas de Taludes no Rio Grande do Sul. In: PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL – GEOSUL'98, Porto Alegre. Anais: ABMS/CPGEC, p. 109-122.
- CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil). 2009. Mapa de Geodiversidade do Rio Grande do Sul. Disponível em <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/14710> (acessado pela última vez em 10/04/2024).
- FERNANDES, N.F. & AMARAL, C. P. (1996). Movimentos de Massa: uma Abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. Geomorfologia e Meio Ambiente. 1 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 123-186.
- MATTOS, T. B. De (2010). Retroanálise de ruptura planar em talude rodoviário – BR 101 Rodovia Rio Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2010. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001544.pdf>>. Acesso em: 10 março 2024.
- Nadalín, L. F., Fiori, A. P., Giusti, D. A., & Salamuni, E. (2020). Investigação geotécnica de taludes rochosos por meio da análise estrutural: estudo de caso da BR-116, Rio Grande do Sul. *Geologia USP. Série Científica*, 20(4), 235-255.
- PINHEIRO, R. J. B. (2000). Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da serra geral no estado do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- PORTO, M. S. (2018). Análise de risco e probabilidade de ruptura em taludes de trecho de serra da br-386, Rio Grande Do Sul. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- HOEK E. Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16 (1994).
- HOEK, E; BROWN, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Elsevier, vol. 34, nº 8, pp. 1165–186
- HOEK, E; BROWN, E. T. (2018). The Hoek-Brown failure criterion and GSI e 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Elsevier, vol. 11, 2019, pp. 445-463.
- SILVEIRA, R.M. Comportamento Geotécnico das Encostas. Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar, CREA-PR, 2016.
- VAZ, L. F. 1996. Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. *Solos e Rochas*, São Paulo, 19, (2): 117-136.
- ZIEBELL, A. (2017). Mapeamento geotécnico dos principais condicionantes de ruptura de taludes de corte da duplicação da BR-116 entre São Lourenço do Sul e Barra do Ribeiro (RS), Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.